



---

---

**2025**

---

# НАУКОВІ ПРАЦІ

## НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

**Том 31 № 5**

*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. 3 from 30th of October, 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 № 3 від 30 жовтня 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 Гєдре 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 Полішук**  
**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 Лєскаускайте**  
**Daiva Leskauskaitė**

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

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

## ЗМІСТ

## CONTENTS

### Автоматизація та інформаційні технології

*Кривець О. Ю., Харкянен О. В.* Дослідження інтеграції штучного інтелекту у системи запобігання природно-техногенним загрозам

7 *Kryvets O., Kharkianen O.* Research on the integration of artificial intelligence into systems for preventing natural and technological hazards

*Погрібняк М. С.* Інтелектуальні системи автоматизації виробничих процесів на базі машинного навчання та інтернету речей

23 *Pohribniak M.* Intelligent systems for automation of manufacturing processes based on machine learning and the internet of things

*Полупан В. В., Міркевич Р. М.* Моделювання та візуалізація технологічних процесів з використанням доповненої реальності

32 *Polupan V., Mirkevych R.* Modeling and visualization of technological processes using augmented reality

*Романов М. О.* Онтології керування виробничими операціями у пивоварній промисловості

44 *Romanov M.* Manufacturing operations management ontologies for brewing industry

*Павлов С. Г., Лисенко В. П., Лендел Т. І., Наконечна К. В.* Метод Харрінгтона в системі експрес-оцінки якості біосировини для зброджування

63 *Pavlov S., Lysenko V., Lendel T., Nakonechna K.* Harrington's method in a system for rapid quality assessment of biogas feedstock for fermentation

### Біотехнології

*Лыч І. В., Стаднік Г. В.* Біотехнології в переробці молочної сироватки: отримання цінних продуктів

75 *Lych I., Stadnik H.* Biotechnology in whey processing: obtaining valuable products

*Ямковий О. О., Буценко Л. М.* Сучасні методи тестування геномодульовальної дії біологічно активних речовин

92 *Yamkovyi O., Butsenko L.* Modern methods of testing the genomodular effect of biologically active substances

### Biotechnologies

### Економіка, менеджмент і маркетинг

*Шеремет О. О., Страшинський В. І.* Підвищення якості олійно-жирової продукції як фактор посилення її конкурентоспроможності на ринку

111 *Sheremet O., Strashynskiy V.* Improving the quality of oil and fat products as a factor of strengthening its market competitiveness

*Капінус Л. В., Тур О. В., Лелека О. О.* Дослідження впливу цифрових маркетингових технологій на рекламну діяльність підприємств

126 *Kapinus L., Tur O., Leleka O.* Research on the impact of digital marketing technologies on the advertising activities of enterprises

### Economy, Management and Marketing

### Механічна та електрична інженерія

*Шпак В. В., Романюк В. Т., Зінкевич П. О.* Інноваційні технології та перспективи систем накопичення енергії в електроенергетиці

139 *Shpak V., Romaniuk V., Zinkevych P.* Innovative technologies and prospects of energy storage systems in the electric power industry

### Mechanical and Electrical Engineering

### Харчові технології

*Максимиук А. І., Павлюченко О. С., Кузьмін О. В.* Напрями удосконалення технології, організації виробництва та управління якістю вегетаріанських пудингів спеціального призначення для закладів ресторанного господарства

153 *Maksymiuk A., Pavliuchenko O., Kuzmin O.* Directions for improving technology, production organization and quality management of special-purpose vegetarian puddings for restaurant enterprises

### Food Technologies

- Білик О. А., Заброда А. В., Капрельянц Л. В., Непокротова Н. О. Порівняльне дослідження впливу сухої пшеничної клейковини та ферментного препарату для коригування хлібопекарських властивостей борошна 168 *Bilyk O., Zabroda A., Kaprelyants L., Nepokrytova N.* Comparative study of the influence of dry wheat gluten and enzyme preparation for adjusting the bakery properties of flour
- Мукоїд Р. М., Булій Ю. В., Кириленко Р. Г., Сарана В. В. Перспективи використання вітчизняних і закордонних сортів хмелю у пивоварінні 186 *Mukoid R., Bulii Yu., Kyrylenko R. Sarana V.* Prospects for the use of national and foreign hop varieties in brewing
- Юкало В. Г., Крупа О. М., Солопа М. Р. Дослідження казеїнових фракцій для характеристики протеїназ лактококів *L. lactis* ssp. *lactis* 196 *Yukalo V., Krupa O., Solopa M.* Use of casein fractions to characterize proteinases of lactococci *L. lactis* ssp. *lactis*
- Махінько Л. В., Махінько В. М., Грищенко А. М., Ковбаса В. М. Наукові підходи до оптимізації складу харчових концентратів типу мюслі 206 *Makhynko L., Makhynko V., Hryshchenko A., Kovbasa V.* Scientific approaches to the optimization of muesli food concentrate composition
- Годунко Є. В., Бондаренко Ю. В., Юрчак В. Г. Роль заквасок у формуванні якості та харчової цінності хлібобулочних і макаронних виробів 218 *Godunko Ye., Bondarenko Yu., Yurchak V.* The role of sourdough starters in shaping the quality and nutritional value of bakery and pasta products
- Демченко В. Л., Куницький Д. В., Маринін А. І., Рибальченко Н. П., Заремба П. Ю. Особливості структури та властивості полімерних мембран на основі полівінілового спирту і наночастинок Ag/ZnO 236 *Demchenko V., Kunitskyi D., Marynin A., Rybalchenko N., Zarembo P.* Structural features and properties of polymer membranes based on polyvinyl alcohol and Ag/ZnO nanoparticles

#### Новини освіти і науки

- Доробок українських науковців від видавництва CRC Press 247

УДК 004.852:504.05

## **RESEARCH ON THE INTEGRATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE INTO SYSTEMS FOR PREVENTING NATURAL AND TECHNOLOGICAL HAZARDS**

**O. Kryvets, O. Kharkianen**

*National University of Food Technologies*

---

**Key words:**

*Artificial intelligence  
Natural and technogenic  
hazards  
Emergency prediction  
Early warning systems  
Technogenic disasters  
Environmental security*

---

**Article history:**

Received 08.09.2025  
Received in revised form  
22.09.2025  
Accepted 13.10.2025

---

**Corresponding author:**

O. Kryvets

**E-mail:**

aleks.kryvets@gmail.com

**Citation:** Кривець О. Ю.,  
Харкянен О. В. (2025).  
Дослідження інтеграції  
штучного інтелекту у си-  
стеми запобігання природ-  
но-техногенним загрозам.  
*Наукові праці НУХТ*,  
31(5), 7—22.  
DOI: 10.24263/2225-2924-  
2025-31-5-3

**ABSTRACT**

The study is devoted to analyzing the integration of artificial intelligence (AI) into systems for preventing natural and technogenic hazards. This topic is highly relevant given the growing number of emergencies caused by both industrial factors and climate change. Traditional monitoring and forecasting methods often fail to provide the necessary level of accuracy, response speed, and adaptability to dynamic conditions. AI, with its ability to analyze large volumes of heterogeneous data in real time, offers new opportunities for early warning, event prediction, and risk minimization in both industrial and natural environments.

Three groups of risks were identified: technogenic disasters with environmental consequences, natural phenomena driven by climate change, and threats caused by human factors. Particular attention was given to the first two groups, including industrial accidents, hazardous substance leaks, infrastructure destruction, wildfires, droughts, and floods. The advantages of AI in developing decision support systems that enable governmental and environmental organizations to respond more effectively to emerging threats were described.

The use of machine learning algorithms to analyze critical industrial process indicators, detect anomalies in technical systems, forecast accidents, and optimize response plans. It also considers the role of AI in building integrated early warning systems that combine satellite data, meteorological observations, IoT sensors, and big data analytics were explored.

Based on the results of the conducted study, it was found that the integration of artificial intelligence systems into natural and technological hazard prevention frameworks significantly enhanced risk management efficiency, minimized the impact of the human factor, optimized decision-making processes in emergency situations, and ensured a more in-depth analytical approach to assessing potential threats. The implementation of intelligent technologies within monitoring and response structures was identified as a key direction in the development of automated environmental safety systems, aimed at increasing society's resilience to complex contemporary natural and technological risks.

---

**DOI:** 10.24263/2225-2924-2025-31-5-3

---

## ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕГРАЦІЇ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ У СИСТЕМИ ЗАПОБІГАННЯ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННИМ ЗАГРОЗАМ

О. Ю. Кривець, О. В. Харкянен

Національний університет харчових технологій

*Дослідження присвячено аналізу інтеграції штучного інтелекту (ШІ) у системи запобігання природно-техногенним загрозам. Тема є надзвичайно актуальною в умовах зростання кількості надзвичайних ситуацій, пов'язаних як з техногенними факторами, так і зі зміною клімату. Традиційні методи моніторингу та прогнозування не завжди здатні забезпечити достатній рівень точності, швидкості реакції й адаптивності до динамічних умов. ШІ, завдяки здатності аналізувати великі обсяги різномірних даних у реальному часі, відкриває нові можливості для раннього попередження, прогнозування розвитку подій та мінімізації ризиків у промислових і природних середовищах.*

*Розглянуто основні напрями використання ШІ для запобігання природно-техногенним загрозам відповідно до класифікації ООН. Виокремлено три групи ризиків: техногенні катастрофи з екологічними наслідками, природні явища, зумовлені кліматичними змінами, та загрози, спричинені людськими факторами. Особливу увагу приділено першим двом групам, зокрема промисловим аваріям, витокам небезпечних речовин, руйнуванню інфраструктури, пожежам, посухам і повеням. Описано переваги застосування ШІ у створенні систем підтримки прийняття рішень, що допомагають урядовим і екологічним організаціям швидше реагувати на загрози. Досліджено методи використання алгоритмів машинного навчання для аналізу критичних показників промислових процесів, виявлення аномалій у роботі технічних систем, прогнозування аварійних ситуацій та оптимізації планів реагування. Розглянуто роль ШІ у формуванні інтегрованих систем раннього попередження, що поєднують супутникові дані, метеорологічні спостереження, IoT-сенсори та аналітику великих даних. Окремо підкреслено значення нейронних мереж у прогнозуванні погодних умов і кліматичних трендів, особливо для передбачення екстремальних явищ, які можуть спричинити ланцюгові техногенні наслідки.*

*За результатами проведеного дослідження встановлено, що інтеграція систем штучного інтелекту в системи запобігання природно-техногенним загрозам суттєво підвищує ефективність управління ризиками, мінімізує вплив людського фактора, оптимізує процеси прийняття рішень у надзвичайних ситуаціях та забезпечує поглиблений аналітичний підхід до оцінювання потенційних загроз. Впровадження інтелектуальних технологій у структури моніторингу й реагування визначається як важливий напрямок розвитку автоматизованих систем екологічної безпеки, спрямований на підвищення стійкості суспільства до комплексних природно-техногенних ризиків сучасності.*

**Ключові слова:** штучний інтелект, природно-техногенні загрози, прогнозування надзвичайних ситуацій, системи раннього попередження, техногенні катастрофи, екологічна безпека.

**Постановка проблеми.** Сучасний розвиток цивілізації супроводжується зростанням кількості природно-техногенних загроз, що створюють значні ризики для життя, здоров'я людей, довкілля та економіки. Класифікація техногенних загроз за стандартами ООН включає такі категорії: хімічні, біологічні, радіаційні інциденти, аварії на транспорті, пожежі, вибухи та витоки небезпечних речовин. Ці явища мають різний характер і походження, але їх об'єднує складність передбачення та високий рівень небезпеки для сталого розвитку суспільства.

Однією з головних проблем є недостатня ефективність традиційних методів моніторингу, оцінки ризиків і прогнозування природно-техногенних загроз. Наявні підходи часто не враховують великої кількості змінних, що впливають на розвиток таких ситуацій, а також не здатні забезпечити своєчасне попередження про загрозу та забезпечити оперативну реакцію. В умовах стрімкого зростання урбанізації, інтенсифікації промислового виробництва та змін клімату ці виклики лише ускладнюються.

Штучний інтелект відкриває нові можливості для запобігання природно-техногенним загрозам завдяки здатності аналізувати великі обсяги даних у реальному часі, виявляти приховані закономірності та прогнозувати розвиток потенційно небезпечних ситуацій. Використання ШІ дозволяє вдосконалити системи раннього попередження, моделювати сценарії надзвичайних ситуацій і пропонувати оптимальні рішення для зменшення їхніх наслідків.

Проте, попри значний потенціал ШІ, його інтеграція у системи запобігання природно-техногенним загрозам залишається обмеженою. Відсутність уніфікованих підходів до використання технологій ШІ, складність збору і стандартизації даних, а також недостатня обізнаність щодо можливостей ШІ є основними стримуючими факторами. Це створює потребу у проведенні комплексних досліджень, спрямованих на розробку та впровадження методів запобігання природно-техногенним загрозам із використанням сучасних технологій штучного інтелекту.

Таким чином, дослідження методів запобігання природно-техногенним загрозам засобами ШІ є актуальним і стратегічно важливим завданням, сприятиме підвищенню безпеки суспільства, збереженню довкілля та сталому розвитку в умовах сучасних викликів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Існуючі дослідження щодо застосування штучного інтелекту для запобігання природно-техногенним загрозам підтверджують, що інтеграція сучасних технологій у системи моніторингу й управління ризиками є одним з ключових напрямків у розвитку цієї галузі.

Більшість праць з досліджуваної тематики присвячена використанню методів штучного інтелекту, машинного навчання та Інтернету речей для прогнозування екстремальних подій. Так, у (Effah, Bai, & Quayson, 2022; Hamid, & Elouadi, 2025) розглянуто потенціал штучного інтелекту для зменшення впливу екстремальних погодних явищ на стале виробництво. Автори зазначають, що поєднання технологій ШІ, IoT та блокчейну сприяє продовольчій безпеці й захисту екосистем.

Одним із важливих аспектів запобігання природним катастрофам є вчасне виявлення лісових пожеж. У (Okoro, Lopez, & Unuriode, 2024; Caron et al., 2025) досліджено вплив інтеграції ШІ, машинного навчання та 5G-технологій на управління лісовими пожежами у США. Запропоновано використання дронів та сенсорних IoT-пристроїв для активного моніторингу, що дозволяє оперативно реагувати на загрозу та мінімізувати її наслідки.

Дослідження (Camps-Valls, 2024/2025; Prapas et al., 2023) зосереджене на методологіях і викликах у застосуванні штучного інтелекту для моделювання та аналізу екстремальних подій. Автори наголошують на необхідності створення точних, прозорих і надійних моделей для підвищення ефективності прогнозування та заходів реагування.

Проведений аналіз результатів досліджень свідчить про те, що головною метою наукових зусиль є інтеграція штучного інтелекту у процеси прогнозування та запобігання природно-техногенним загрозам. Основний акцент робиться на розробці автоматизованих систем, що здатні швидко оцінювати ризики, зменшувати економічні збитки та мінімізувати вплив катастроф на суспільство та довкілля.

**Мета дослідження:** аналіз способів інтеграції методів штучного інтелекту в системи запобігання природно-техногенним загрозам для підвищення ефективності моніторингу, прогнозування й оперативного реагування на ризики та надзвичайні ситуації.

**Матеріали і методи.** Використані сучасні наукові публікації, технічна документація, класифікації природно-техногенних загроз, звіти та стандарти щодо існуючих автоматизованих систем керування та їх інтеграції з методами штучного інтелекту. Оглянуто сучасні приклади застосування Автоматизованих систем керування у різних країнах для запобігання природно-техногенним загрозам. Досліджено доступні рішення на базі ШІ для прогнозування ризиків, аналізу даних тощо.

**Викладення основних результатів дослідження.** Сучасний світ стикається з дедалі складнішими викликами, пов'язаними з природно-техногенними загрозами. Стихійні лиха, промислові аварії чи зміни клімату можуть мати руйнівні наслідки для суспільства, економіки та екосистем.

За даними ООН, кількість природних катастроф за останні 20 років зростає більш ніж удвічі порівняно з попередніми двома десятиліттями (On Some Limitations of Current Machine Learning Weather Forecasting Models, 2023), що свідчить про глобальну ескалацію ризиків. У контексті швидкого зростання обсягів даних і складності процесів, пов'язаних із прогнозуванням і запобіганням таким загрозам, традиційні підходи виявляються недостатньо ефективними.

Саме тут на допомогу приходять методи штучного інтелекту, які відкривають нові можливості для аналізу, прогнозування й управління ризиками. Завдяки здатності швидко обробляти великі масиви даних, виявляти приховані закономірності та генерувати прогнози в реальному часі ШІ стає ключовим інструментом у сфері запобігання природно-техногенним катастрофам (The Use of AI In Disaster Management and Predictive Modeling, 2025).

Застосування штучного інтелекту дозволяє не лише підвищити точність прогнозів, а й забезпечити швидке реагування, що має вирішальне значення у кризових ситуаціях. Це відкриває перспективи для побудови більш стійких і безпечних систем, що здатні мінімізувати наслідки таких загроз.

За стандартами ООН (UNDRR — Управління зменшення ризику катастроф), природно-техногенні загрози поділяються на такі три групи (The Use of AI In Disaster Management and Predictive Modeling, 2025):

- техногенні загрози з екологічними наслідками (індустріальні катастрофи);
- загрози, спричинені зміною клімату (глобальне потепління та його наслідки для природних систем);

- надзвичайні події, спричинені людськими факторами (масові вирубки лісів, які викликають зсуви та ерозії).

Техногенні загрози з екологічними наслідкам становлять одну з найсерйозніших проблем сучасності, оскільки їх вплив на довкілля часто має довготривалий характер і масштабні наслідки (Green et al., 2024). Одним із ключових проявів таких загроз є хімічне забруднення, яке виникає внаслідок аварій на хімічних підприємствах, неправильного поводження з токсичними відходами або надмірного використання пестицидів і добрив у сільському господарстві. Це призводить до забруднення води, ґрунтів і повітря, накопичення токсичних речовин у живих організмах, що викликає зниження біорізноманіття та загрожує здоров'ю людей.

Радіаційне забруднення є ще одним видом техногенних загроз, прикладами якого є аварії на атомних електростанціях, наприклад, Чорнобильська катастрофа чи інцидент у Фукусімі. Викиди радіонуклідів у навколишнє середовище спричиняють довготривалі мутації в екосистемах, деградацію природних ресурсів і вимушене переселення людей із забруднених територій.

До серйозних екологічних проблем також належить забруднення нафтопродуктами, зокрема під час аварій танкерів або витоків із нафтопроводів. Розливи нафти завдають значної шкоди водним екосистемам, викликаючи масову загибель флори і фауни, а також тривалий вплив на морські та прибережні екосистеми.

Забруднення атмосфери техногенного походження, викликане промисловими викидами та викидами транспорту, сприяє утворенню кислотних дощів, руйнуванню озонового шару та посиленню глобального потепління. Це явище загрожує стабільності кліматичних систем і створює нові екологічні ризики.

Після підриву Каховської гідроелектростанції у червні 2023 року Україна зіткнулася з однією з найбільших екологічних катастроф останніх десятиліть. Унаслідок руйнування дамби сталося масове затоплення населених пунктів, було зруйновано сільськогосподарську інфраструктуру, виник ризик забруднення води залишками нафтопродуктів, хімікатів і фекальних стоків, а також зафіксовано загибель фауни в акваторії Дніпра. Для оперативного реагування та прогнозування масштабів екологічних наслідків урядові структури, громадські організації та міжнародні партнери почали активно використовувати супутникові дані, дрони та моделі на основі штучного інтелекту.

Компанії, які надають супутниковий моніторинг (наприклад, Planet Labs і ICEYE), передавали регулярні знімки у високій роздільній здатності. Ці зображення оброблялися за допомогою алгоритмів глибокого навчання для побудови карт затоплень, аналізу змін ландшафту та прогнозування напрямку поширення води. У деяких випадках використовувалися моделі на основі CNN (convolutional neural networks) (Camps-Valls et al., 2025), натреновані на супутникових знімках до і після катастрофи.

Крім того, українські ІТ-спеціалісти в партнерстві з Європейським космічним агентством (ESA) розробили прототипи ШІ-моделей для виявлення критичних об'єктів, що опинилися в зоні ризику (очисні споруди, агрохімічні склади, електростанції тощо), що дало змогу оперативно планувати інженерні та санітарні заходи.

Цей приклад демонструє практичну цінність впровадження ШІ для управління екологічними техногенними ризиками в умовах надзвичайної ситуації. Подібні під-

ходи можуть і повинні стати частиною систем запобігання катастрофам на об'єктах підвищеної небезпеки.

Таким чином, техногенні загрози з екологічними наслідками потребують комплексного підходу до їх запобігання, який включає моніторинг, використання екологічно безпечних технологій та дотримання міжнародних екологічних стандартів. Ефективне управління природно-техногенними загрозами є ключовим фактором забезпечення стійкого розвитку та збереження природного середовища для майбутніх поколінь (Green et al., 2024).

За останні роки прогрес у галузі штучного інтелекту та машинного навчання суттєво змінив підхід до прогнозування та методи запобігання техногенним загрозам з екологічними наслідками.

Сучасні системи автоматизованого керування дозволяють ефективно інтегрувати штучний інтелект у різні процеси. Подібні системи поєднують передові алгоритми аналізу даних, машинного навчання та прогнозування, що допомагає оптимізувати управління в реальному часі. Завдяки інтеграції ШІ такі рішення можуть автоматизувати рутинні задачі, приймати більш обґрунтовані рішення й адаптуватися до змінних умов. Розглянемо можливості впровадження подібних систем в хімічній, фармацевтичній, харчовій промисловості та інших сферах.

Siemens SIMATIC PCS 7. Система автоматизованого управління процесами дозволяє інтегрувати ШІ для аналізу даних у реальному часі та оптимізації виробничих процесів. Наприклад, система використовує алгоритми машинного навчання для прогнозування стану обладнання і оптимізації роботи в хімічній, фармацевтичній, харчовій промисловості (Smith and Brown, 2023).

Honeywell Forge. Honeywell розробила платформу для індустрії 4.0, яка включає рішення для управління енергоспоживанням, прогнозного обслуговування й аналітики. Вона підключається до різного обладнання на підприємствах і використовує ШІ для обробки великих обсягів даних, що дозволяє виявляти аномалії в роботі обладнання і знижувати експлуатаційні витрати.

EcoStruxure. Розробка компанії Schneider Electric використовує ШІ для аналізу енергоспоживання, виявлення аномалій у роботі електротехнічного обладнання та прогнозного обслуговування, що сприяє зменшенню викидів парникових газів і підвищенню енергоефективності. Система FactoryTalk Analytics від Rockwell Automation застосовує цифрових двійників і алгоритми машинного навчання для виявлення потенційно аварійних ситуацій у технологічних лініях, запобігаючи аваріям із можливими екологічними наслідками.

OpreX Asset Operations and Optimization. Японська компанія Yokogawa розробила комплекс, який використовує адаптивні моделі для управління параметрами складних технологічних процесів. Це забезпечує стабільність режимів роботи, знижує ризик викиду токсичних речовин у довкілля та мінімізує вплив людського фактору. У свою чергу, система Aspen Mtell (AspenTech) застосовує глибоке навчання для ідентифікації закономірностей, що передують виходу з ладу обладнання, і на основі цього формує попередження з високим рівнем точності. Це особливо важливо на підприємствах хімічної та нафтопереробної галузей, де аварії можуть призводити до масштабного забруднення повітря, ґрунтів і водних ресурсів.

ABB Ability — платформа для автоматизації промислових процесів, яка застосовує штучний інтелект для обробки даних, зібраних з обладнання. ABB Ability підтримує функції прогнозного обслуговування, відстеження продуктивності й

енергозбереження. Система використовується в енергетиці, машинобудуванні та інших секторах для підвищення ефективності.

**SIMATIC MindSphere.** Промислова платформа від Siemens, яка використовує модулі штучного інтелекту для збору, зберігання, обробки та аналізу даних з промислового обладнання в реальному часі. Використовуючи алгоритми прогнозного обслуговування, MindSphere забезпечує раннє виявлення критичних змін у роботі агрегатів, запобігаючи витокам шкідливих речовин або перевантаженням, що здатні спричинити аварії з негативними екологічними наслідками.

**Hitachi Lumada.** Платформа використовує штучний інтелект для оптимізації промислових процесів, виявлення аномалій, управління ризиками та підвищення безпеки. Lumada дозволяє будувати цифрові двійники та моделювати наслідки технічних рішень для запобігання потенційним інцидентам, включно з екологічними.

**IBM Maximo Application Suite (AI-powered APM).** Інтелектуальна платформа управління активами, яка використовує AI та IoT для запобігання відмовам обладнання, прогнозного обслуговування та оптимізації життєвого циклу ресурсів. Система широко використовується в енергетиці, водопостачанні та транспорті для мінімізації впливу на довкілля.

**Rockwell Automation ThingWorx IIoT Platform.** Спільна розробка Rockwell Automation і PTC, яка використовує AI/ML для обробки даних із виробничих процесів. Система забезпечує моніторинг у режимі реального часу, виявлення аномалій, оптимізацію енерговитрат та прогнозування відмов. Вона дозволяє значно зменшити екологічні ризики завдяки ранньому втручанням.

**AVEVA Unified Operations Center.** Комплекс забезпечує централізовану платформу для об'єднання даних з різних джерел (технологічного обладнання, систем моніторингу довкілля та виробничих процесів) і підтримує прийняття рішень на основі аналізу в реальному часі. Штучний інтелект у цій системі використовується для розпізнавання критичних ситуацій, автоматичної корекції параметрів технологічних процесів та адаптації до змінних умов, зокрема й екологічних.

**ICONICS GENESIS64.** Інтеграційна платформа, що застосовується в автоматизованих системах керування енергоефективністю й технологічними процесами, передбачає використання аналітичних модулів на основі штучного інтелекту. Система забезпечує комплексну візуалізацію процесів, формує динамічні KPI, а також виконує аналіз трендів на основі історичних даних. Це дозволяє здійснювати стратегічне планування й оперативне реагування на потенційні загрози техногенного характеру.

**PI System.** Розробка компанії OSIsoft, яка після інтеграції до AVEVA стала частиною великої екосистеми промислової аналітики. PI System дозволяє збирати дані з різномірних джерел, зокрема з датчиків навколишнього середовища, виробничого обладнання та систем енергопостачання. ШІ-модулі в цій системі дають змогу виявляти потенційно небезпечні тенденції, аналізувати причинно-наслідкову зв'язки та генерувати попереджувальні сигнали для мінімізації ризиків.

**CtrlX AUTOMATION.** Інноваційна система від компанії Bosch Rexroth є складом новітньої архітектури автоматизації, яка активно інтегрує елементи штучного інтелекту, включаючи глибоке навчання, обробку відеопотоків та предиктивну аналітику. Ця система дозволяє створювати гнучкі сценарії контролю за критичними параметрами роботи обладнання, а також прогнозувати можливі збої, що

можуть призвести до порушення технологічних режимів і, як наслідок, до екологічних інцидентів.

Emerson DeltaV — система автоматизації, яка дозволяє використовувати штучний інтелект для управління хімічними процесами, переробки нафти і газу, а також фармацевтичного виробництва. DeltaV застосовує алгоритми ШІ для адаптивного керування процесами й автоматичного коригування параметрів для оптимізації продуктивності.

Розглянемо детальніше платформу Predix, що розроблена компанією General Electric (GE), яка використовується на промислових підприємствах для моніторингу обладнання та використання ШІ для прогнозування та запобігання збоєм, які можуть призвести до екологічного забруднення. На обладнанні встановлюються датчики (температури, вібрації, тиску, швидкості тощо), які збирають дані про його стан у реальному часі. Ці датчики передають інформацію в систему SCADA або інші системи АСК. Всі дані з датчиків збираються й обробляються системою керування. Проте без належної інтерпретації дані не мають особливої цінності для підтримки прийняття рішень, тому доцільно використати методи ШІ. Системи машинного навчання, зокрема глибокі нейронні мережі, можуть аналізувати історичні та поточні дані для пошуку закономірностей (Keisler, 2022). Проведений аналіз є основою для формування прогнозів щодо виходу з ладу обладнання. Використовуючи алгоритми машинного навчання (наприклад, рекурентні нейронні мережі або кластеризацію), система здійснить прогнозування можливих несправностей. Наприклад, якщо система виявляє аномалії у вібраціях двигуна, це може свідчити про можливу проблему з підшипником, якщо спостерігається нестандартна температура або тиск, система може передбачити, що насос вийде з ладу через кілька днів. У разі виявлення аномалій або прогнозованих збоїв, система може автоматично сформувати інформацію для прийняття рішення. Наприклад платформа може надіслати повідомлення оператору, що необхідне обслуговування певного обладнання. В критичних випадках система може автоматично зупинити обладнання, щоб запобігти серйозному аварійному стану.

На основі прогнозних моделей система ШІ може також автоматизувати оптимізацію роботи виробничих процесів. Наприклад, ШІ може запропонувати оптимальні режими роботи обладнання для економії енергії або підвищення продуктивності, автоматичне регулювання параметрів виробничого процесу залежно від поточного стану обладнання та зовнішніх умов.

Детально проаналізувавши принцип роботи цієї платформи, слід зазначити, що існують слабкі місця в методах запобігання загрозам. Наприклад, у результаті серйозних поломок система може сигналізувати оператору про те, що відбувся збій, і вказувати на місце збою, але допускається ризик того, що оператор може не знати шляхів виправлення помилки або алгоритму дій для запобігання аварії. Доцільно впровадити методи ШІ, навчивши модель необхідним інструкціям для автоматичного формування порядку дій оператора для уникнення аварії (Waqas et al., 2025).

У результаті проведеного дослідження інтеграцій ШІ з АСК можна стверджувати, що розглянуті системи досить ефективно вирішують проблему запобігання аваріям і прогнозування неполадок на підприємствах. Можливим покращенням є реалізація системи інформаційної підтримки операторів під час певних збоїв чи аварій методами ШІ.

Загрози, спричинені зміною клімату є глобальними викликами, які впливають

на екосистеми, економіку та соціальні системи в усьому світі. Основною причиною цих загроз є діяльність людини, зокрема надмірні викиди парникових газів, такі як вуглекислий газ, метан і оксиди азоту, що викликають посилення парникового ефекту і, як наслідок, глобальне потепління (Camps-Valls et al., 2025).

Одним із найпомітніших наслідків зміни клімату є підвищення рівня світового океану, спричинене таненням льодовиків і полярних льодових шапок. Це загрожує затопленням прибережних територій, знищенням екосистем і втратою місця проживання для мільйонів людей. Частота та інтенсивність екстремальних погодних явищ, таких як урагани, тайфуни, тропічні циклони, посухи й повені, значно зросли, що призводить до руйнування інфраструктури, втрат урожаю й соціально-економічної нестабільності (Lam et al., 2023).

Зміна клімату також впливає на водні ресурси. Підвищення температури спричиняє зміну режимів опадів, що призводить до посухи в одних регіонах і надмірних опадів в інших. Це ускладнює забезпечення населення питною водою та створює загрозу для сільськогосподарського виробництва. Крім того, підвищення температури океану змінює морські екосистеми, сприяє зниженню біорізноманіття та порушує харчові ланцюги, що негативно впливає на рибальство та продовольчу безпеку.

В українському контексті наслідки зміни клімату мають чітко виражений регіональний характер і вже суттєво впливають на природні системи, водні ресурси, сільське господарство, міську інфраструктуру та здоров'я населення. За даними Українського гідрометеорологічного центру та звітів Світового банку, середньорічна температура в Україні зростає швидше за глобальний середній показник — приблизно на 0,4—0,6 °C за десятиріччя. Особливо виражене потепління спостерігається у степовій зоні — у Херсонській, Одеській, Запорізькій областях, де одночасно скорочується кількість атмосферних опадів, зростає частота й тривалість посух, збільшується дефіцит ґрунтової вологи та фіксується зростання ризику опустелювання (Sevgin, 2025).

Такі кліматичні зміни вже мають серйозні наслідки для аграрного сектору, який є основою української економіки. В умовах зменшення природної вологи та нестабільності опадів фермери зазнають значних втрат урожаю, особливо у вирощуванні зернових, олійних та овочевих культур. У Карпатському регіоні натомість зросла інтенсивність короткотривалих, але сильних опадів, що викликають паводки, зсуви ґрунту та руйнування транспортної інфраструктури. Яскравим прикладом став паводок у червні 2020 року, що охопив понад 300 населених пунктів у чотирьох областях, завдавши збитків на сотні мільйонів гривень. Такі екстремальні явища, як правило, мають катастрофічні наслідки через недостатню точність традиційних систем прогнозування й обмежену здатність місцевої інфраструктури до адаптації.

У зв'язку з цим в Україні все активніше розглядаються можливості використання штучного інтелекту для покращення адаптації до кліматичних ризиків. Уже зараз деякі українські стартапи та наукові установи, зокрема в межах проєктів за підтримки Horizon Europe та USAID, досліджують використання алгоритмів машинного навчання для прогнозування ризику посухи, ерозії ґрунтів і паводків. Наприклад, в агросекторі застосовуються моделі, що аналізують супутникові знімки, дані з метеостанцій та агрометеорологічні індекси для оптимізації термінів посіву, прогнозування врожайності й оцінки водного стресу рослин. Такі системи,

які працюють на основі Python та бібліотек машинного навчання (наприклад, TensorFlow, Scikit-learn), дозволяють аграріям ухвалювати більш обґрунтовані рішення та зменшити фінансові втрати.

Окрім того, перспективним є впровадження систем попередження про стихійні лиха на базі нейронних мереж, які здатні виявляти закономірності в історичних даних про паводки та циклони. Наприклад, створення інтегрованої платформи, яка об'єднує дані з гідрологічних сенсорів, супутникових джерел та метеорологічних станцій у режимі реального часу, може дозволити ШІ-моделям оперативно попереджати про наближення паводку або небезпечного зростання рівня води. Такий підхід вже частково апробується в межах екологічного моніторингу в басейнах річок Прут і Дністер.

Для ефективного протистояння загрозам, пов'язаним з кліматичними змінами, необхідно впроваджувати заходи щодо зменшення викидів парникових газів, переходу на відновлювані джерела енергії й адаптації до нових кліматичних умов. Важливу роль у цьому процесі відіграє створення та розвиток систем моніторингу опадів і прогнозування погоди, які дозволяють своєчасно й точно відслідковувати зміни в атмосферних умовах, попереджати про екстремальні погодні явища та мінімізувати їхні наслідки. Такі системи є ключовим інструментом для планування заходів із захисту населення, сільського господарства та інфраструктури, а також для забезпечення стійкості до змін клімату.

Нещодавно компанія Google розробила алгоритм штучного інтелекту DeepMind, що передбачив погоду на 10 днів з точністю 99,7%. Це точніше за передбачення провідного метеорологічного центру Європи, при цьому алгоритм справляється із прогнозами за кілька хвилин, тоді як суперкомп'ютерам метеорологів потрібні години. Це є доказом того, що використання ШІ для прогнозування природних явищ є ефективним рішенням.

Алгоритм GraphCast фахівці DeepMind навчали на даних 39 років спостережень Європейського центру середньострокових прогнозів погоди (ECMWF) (Lam et al., 2023). Для прогнозу GraphCast враховує понад 1300 параметрів, наприклад, температуру й вологість, та формує єдиний прогноз на 10 днів, передбачаючи циклони чи екстремальну спеку. Утім, попри майже 100-відсоткову точність, і розробники, і метеорологи застерігають, що наразі GraphCast не зможе замінити традиційні чисельні прогнози погоди, оскільки на відміну від них спирається лише на історичні дані та не випробовувався у різних умовах тривалий час. Фахівці сподіваються, що GraphCast зможе стати додатковим інструментом у прогнозах та допоможе в дослідженнях не лише погоди, а й клімату, екології і сільського господарства (Bouallegue et al., 2024). Отже, подібні розробки потребують довготривалого тестування перед повноцінним використанням.

Погодні явища є одними з найбільш динамічних і тому найскладніших у прогнозуванні явищ на Землі. Для створення прогнозу погоди метеорологи використовують дані мереж гідрологічних і агрометеорологічних станцій, намагаючись передбачити поведінку атмосфери. Утім підготовка цих прогнозів займає більш як кілька годин, навіть з використанням суперкомп'ютерів для обчислень. Прискорити роботу метеорологів могли б алгоритми штучного інтелекту, здатні аналізувати великі масиви даних та виявляти між ними закономірності.

Одним із сервісів, що надає доступ до даних, зафіксованих сейсмічними станціями, є Geofon. Сервіс забезпечує можливість отримання детальної інформації про

всі землетруси, що відбуваються на планеті, через API. Geofon дозволяє доступ до даних у різних форматах. Однак найбільш зручним є використання формату XML, оскільки його структура дозволяє легко обробляти дані за допомогою таких мов програмування як Python, Java, JavaScript або C#. Формат XML забезпечує чітке представлення даних про землетруси, включаючи координати епіцентру, глибину, магнітуду, час події та інші важливі параметри, що дає змогу ефективно аналізувати та використовувати ці дані у різних наукових і практичних застосуваннях.

Для прогнозування ураганів і повеней необхідні метеорологічні показники. Одним із сервісів, що надає доступ до таких даних є Wunderground (Pathak et al., 2022). Цей сервіс дозволяє за допомогою API отримувати не лише поточні показники опадів і швидкості вітру в різних місцях, але й доступ до історичних даних метеорологічних приладів за багато років. Можливість отримати історичні дані є надзвичайно корисною для аналізу попередніх загроз і розробки моделей прогнозування майбутніх подій.

За допомогою мов програмування Python або JavaScript можна здійснювати HTTP-запити для збору, обробки та структурування необхідних даних. Розглянуті джерела даних використовуються для навчання моделей. Вони надають API, за допомогою якого отримуються необхідні масиви інформації на основі HTTP-запитів. Завдання може бути вирішене із застосуванням різних мов програмування. Наприклад, мова JavaScript має бібліотеку *wretch* для формування і відправки запитів. Оскільки запити потрібно відправляти, змінюючи параметри, варто розробити спеціальні функції, які будуть підставляти необхідні параметри в запити до сервісів, формувати GET, POST запити та циклічно їх відправляти.

Для покращення подальшої обробки дані потребують приведення до єдиного формату. Використання формату даних JSON є зручним в обробці за допомогою мови JavaScript, а також підтримує конвертацію з інших форматів. Наприклад, XML можна конвертувати в JSON за допомогою бібліотеки *simple-xml-to-json*. Також цей формат, за необхідності, легко й зручно конвертувати в документи та колекції для зберігання в нереляційних базах даних, наприклад, MongoDB.

Розглянемо деталі створення власної автоматизованої системи прогнозування опадів, що допоможе запобігти повеням. У такому разі потрібно слідкувати за показниками опадів і швидкості вітру в реальному часі або дослідити показники попередніх періодів. Для отримання метеорологічних показників пропонується використати сервіс Wunderground. За допомогою API отримаємо показники температури, вологості, швидкості вітру та, застосувавши мову програмування JavaScript, збережемо отримані показники до бази даних PostgreSQL або MongoDB. Збережені дані не є достатньо корисними без належної інтерпретації. За допомогою методів машинного навчання зможемо проаналізувати історичні та поточні дані для пошуку закономірностей. На основі цього аналізу ШІ зможе передбачити прогноз погоди.

Надзвичайні події, спричинені людськими факторами є однією з основних категорій загроз, які виникають внаслідок діяльності людини або її бездіяльності. Ці події охоплюють широкий спектр ситуацій — від техногенних аварій до соціальних та антропогенних катастроф (The Use of AI In Disaster Management and Predictive Modeling, 2025). Основними прикладами таких подій є аварії на промислових підприємствах, транспортні катастрофи, пожежі, вибухи, витоки небезпечних речовин, а також акти тероризму, соціальні конфлікти та злочинність.

Техногенні аварії, такі як вибухи на заводах, витоки токсичних речовин або аварії на об'єктах критичної інфраструктури, створюють серйозні загрози для життя та здоров'я населення, а також можуть завдати значної шкоди довкіллю. Транспортні катастрофи, включно з аваріями на залізницях, авіаційними катастрофами та морськими інцидентами, спричиняють масові втрати людських життів і порушують економічну діяльність.

Соціальні конфлікти та акти тероризму є ще однією небезпечною формою загроз, пов'язаних з людськими факторами. Вони не лише призводять до загибелі людей, а й створюють тривалий вплив на соціальну стабільність, економіку та безпеку країн і регіонів. Пожежі, спричинені недбалістю чи порушеннями правил безпеки, можуть виникати в житлових районах, на промислових об'єктах або в природних зонах, завдаючи значних матеріальних і екологічних збитків.

Одним із найбільш показових прикладів надзвичайної ситуації, спричиненої людським фактором в Україні, є техногенна катастрофа на Калуському хімічному комбінаті (Івано-Франківська область). Протягом десятиліть неконтрольоване зберігання промислових відходів (зокрема гексахлорбензолу) та незадовільне технічне обслуговування об'єктів призвели до формування зон хімічного забруднення, підтоплення соляних шахт і загрози утворення карстових провалів. Це створює потенційну загрозу витоку токсичних речовин у підземні води та системи водопостачання регіону (Green et al., 2024).

Ситуація ускладнюється браком сучасної системи моніторингу та попередження, що могло б забезпечити оперативне виявлення ризиків обвалів або зсувів. Зважаючи на ці виклики, перспективним є впровадження систем на базі штучного інтелекту, здатних аналізувати в режимі реального часу гідрогеологічні параметри (вологість ґрунтів, тиск у шахтах, деформації поверхні) на основі даних із сенсорів, супутникових знімків і гідродинамічних моделей. Такі технології могли б не лише запобігти екологічній катастрофі, але й підтримувати прийняття рішень у сфері просторового планування та охорони здоров'я.

Іншим прикладом є пожежа на нафтобазі БРСМ-Нафта під Васильковим у 2015 році, яка стала однією з найбільших техногенних катастроф в Україні за останні десятиліття. Вибухи резервуарів із паливом спричинили загибель людей, масштабне забруднення повітря та ґрунтів, а також колосальні матеріальні збитки. Розслідування встановило, що значну роль у розвитку подій відіграли порушення технічних регламентів, відсутність систем раннього виявлення пожеж і неефективне реагування на початкову фазу аварії.

У контексті запобігання подібним подіям особливо актуальним є впровадження інтелектуальних систем нагляду на промислових об'єктах, які використовують глибокі нейронні мережі для обробки відеопотоку з камер спостереження, аналізу теплових аномалій і виявлення ознак перегріву або витоків горючих речовин. Так, моделі на базі YOLO або EfficientNet можуть бути адаптовані для детекції нестандартної поведінки в зоні ризику (наприклад, накопичення диму, відхилення температури від нормативних значень тощо) та запуску систем екстреного оповіщення.

У сфері транспорту найбільш резонансним інцидентом останніх років стала аварія пасажирського автобуса під Житомиром у 2021 році, внаслідок якої загинуло понад 20 осіб. Одним із чинників трагедії стало недотримання водієм правил безпеки та втома, що є типовою проблемою у сфері пасажирських перевезень.

Впровадження ШІ-систем, що аналізують поведінку водія за допомогою камер у салоні (наприклад, системи Driver Monitoring Systems на базі OpenCV та Mediapipe), дозволяє виявляти ознаки сонливості або неухважності та автоматично активувати запобіжні механізми (сигнал тривоги, гальмування тощо).

Також в Україні триває інтеграція систем відеоаналітики з елементами штучного інтелекту в систему «Безпечне місто». Зокрема, у Києві та Харкові функціонують аналітичні комплекси, здатні виявляти скупчення людей, агресивну поведінку, залишені підозрілі об'єкти та порушення ПДР. Такі системи використовують алгоритми глибокого навчання для аналізу відеопотоку з тисяч камер і надають можливість правоохоронним органам оперативно реагувати на потенційні загрози, зменшуючи ймовірність терористичних актів або масових заворушень.

У майбутньому можливим є створення інтегрованої національної платформи управління техногенними ризиками, що поєднує моніторингові системи, геоінформаційні сервіси та інструменти штучного інтелекту для прогнозування й управління надзвичайними ситуаціями. Така платформа дозволить у режимі реального часу отримувати інформацію про стан критичної інфраструктури, ідентифікувати потенційні вогнища небезпеки, а також здійснювати автоматизовану координацію служб реагування (ДСНС, швидка допомога, поліція).

Для ефективного протистояння таким загрозам важливо впроваджувати системи моніторингу та попередження, які дозволяють своєчасно ідентифікувати ризики та швидко реагувати на надзвичайні ситуації. Особливу увагу слід приділяти навчанню населення правилам поведінки під час надзвичайних подій, посиленню технічного нагляду за об'єктами підвищеної небезпеки та вдосконаленню систем управління кризовими ситуаціями. Також ключовим аспектом є розробка та впровадження систем прогнозування, зокрема моніторингу потенційно небезпечних ситуацій у промисловості, транспорті та соціальній сфері, що мінімізує наслідки подібних подій і підвищує загальну безпеку.

Для ефективного протистояння надзвичайним подіям, спричиненим людськими факторами, доцільним є широке впровадження систем, заснованих на штучному інтелекті. Завдяки своїй здатності до швидкої обробки великих обсягів даних і прийняття рішень у реальному часі, ШІ забезпечує новий рівень точності й оперативності в управлінні ризиками, моніторингу та прогнозуванні загроз.

Системи на основі ШІ можуть використовуватися для автоматичного моніторингу промислових об'єктів і транспортних мереж. Наприклад, спеціалізовані системи, такі як Predix від General Electric, аналізують дані з датчиків на підприємствах, виявляючи потенційні технічні несправності до того, як вони спричинять аварію. В транспортній сфері ШІ активно використовується для оптимізації маршрутів і запобігання дорожньо-транспортним пригодам, як це роблять автономні системи водіння, наприклад, у технологіях компаній Tesla або Waymo.

Також системи ШІ допомагають у боротьбі з тероризмом і злочинністю, аналізуючи поведінкові патерни в соціальних мережах, зображення з камер спостереження та інші джерела даних. Наприклад, системи розпізнавання облич, такі як Clearview AI, дозволяють швидко ідентифікувати потенційно небезпечних осіб.

Крім того, ШІ знаходить застосування у прогнозуванні та ліквідації наслідків природних і техногенних катастроф. Наприклад, платформи на основі машинного навчання, такі як Google AI for Disaster Response, можуть аналізувати супутникові знімки для оцінки зон затоплення або руйнувань у разі землетрусів чи пожеж.

Для забезпечення комплексного підходу до управління кризовими ситуаціями ШІ може інтегруватися в централізовані системи, які поєднують моніторинг, прогнозування та координацію дій у надзвичайних ситуаціях. Наприклад, IBM Watson Decision Platform for Emergency Management використовує ШІ для аналізу даних у реальному часі, що допомагає швидко приймати оптимальні рішення під час криз (The Use of AI In Disaster Management and Predictive Modeling, 2025).

Таким чином, використання штучного інтелекту є не лише доцільним, а й необхідним кроком для підвищення ефективності управління загрозами, спричиненими людськими факторами. Інтеграція таких технологій у різні сфери діяльності дозволяє мінімізувати ризики, скоротити час реагування та зменшити масштаби негативних наслідків надзвичайних подій.

### Висновки

Інтеграція штучного інтелекту в системи запобігання природно-техногенним загрозам показує високу ефективність. Зокрема, вона успішно реалізована в автоматизованих системах управління промисловими об'єктами, що дозволяє значно покращити контроль і забезпечити безпеку.

Точність прогнозування погодних явищ досягає 99,7%, що є надзвичайно високим результатом. Однією з важливих переваг є значне скорочення часу обробки даних порівняно з традиційними методами.

Проте є кілька напрямків для подальшого вдосконалення. Так, необхідно провести тривале тестування нових алгоритмів штучного інтелекту, аби забезпечити їхню стабільність і ефективність у різних умовах. Важливо розробити системи підтримки для операторів у випадку аварій, щоб швидко реагувати на непередбачувані ситуації.

Впровадження штучного інтелекту в системи запобігання природно-техногенним загрозам є важливим кроком для підвищення ефективності захисту та значного зменшення негативного впливу таких загроз на навколишнє середовище та суспільство в цілому.

### Література

Andrychowicz, M. et al. (2024). GenCast: A 15-day global ensemble weather forecaster trained on decades of reanalysis data. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2312.15766> (отримано 12 травня 2025).

Bi, K. et al. (2023) Accurate medium-range global weather forecasting with 3D neural networks. *Nature*, 619(7970), 533—538. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06185-3> (отримано 3 червня 2025).

Bihlo, A. (2024). A survey on machine learning in numerical weather prediction. *Artificial Intelligence for the Earth Systems*, 3(4). <https://doi.org/10.1175/AIES-D-23-0071.1> (отримано 18 липня 2025).

Bodnar, C. et al. (2024). Aura: A foundation model for global weather prediction. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2406.13565> (отримано 22 квітня 2025).

Bonev, B. et al. (2023). Spherical Fourier Neural Operators for global weather forecasting. Proceedings of the 37th Conference on Neural Information Processing Systems (*NeurIPS 2023*). [https://proceedings.neurips.cc/paper\\_files/paper/2023/file/spherical-fno.pdf](https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2023/file/spherical-fno.pdf) (отримано 30 вересня 2025).

Bouallegue, Z. B. et al. (2024) The rise of data-driven weather forecasting: A first statistical assessment of machine learning models. *Geophysical Research Letters*, 51(12). <https://doi.org/10.1029/2024GL109354> (отримано 14 серпня 2025).

Camps-Valls, G. et al. (2025) Artificial intelligence for modeling and understanding extreme climate events. *Nature Communications*. <https://www.nature.com/articles/s41467-025-56573-8> (отримано 27 жовтня 2025).

Chattopadhyay, A., Sun, Y. Q., and Hassanzadeh, P. (2023). Challenges of learning multi-scale

dynamics with AI weather models: Implications for stability and one solution. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2304.07029> (отримано 5 травня 2025).

Chen, K. et al. (2023). Towards an end-to-end artificial intelligence driven global weather forecasting system. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2312.12462> (отримано 19 червня 2025).

Chen, L. et al. (2024). FuXi: A cascade machine learning model for global subseasonal forecasting. *Nature Machine Intelligence*, 6, 303—313. <https://doi.org/10.1038/s42256-024-00812-5> (отримано 11 липня 2025)

Espeholt, L. et al. (2022). Deep learning for twelve hour precipitation forecasts. *Nature Communications*, 13, 5149. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32487-x> (отримано 25 квітня 2025).

Goodfellow, I. (2014). Generative adversarial networks. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/1406.2661> (отримано 8 жовтня 2025).

Green, L. et al. (2024). Challenges and opportunities in the use of artificial intelligence for predicting environmental disasters. *Proceedings of the International Conference on Environmental Science*, 67—78 (отримано 16 вересня 2025).

Han, Z. et al. (2024). FengWu: Pushing the skill of numerical weather prediction with deep learning. *Science Advances*, 10(15). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adn0891> (отримано 2 серпня 2025).

Keisler, R. (2022). Forecasting global weather with graph neural networks. *arXiv*, 3 <https://arxiv.org/abs/2202.07575> (отримано 20 квітня 2025).

Kent, C. et al. (2025). Skilful global seasonal predictions from a machine learning model. *npj Climate and Atmospheric Science*. <https://www.nature.com/articles/s41612-025-01198-3> (отримано 28 жовтня 2025).

Kim, B. (2025). AI in extreme weather events prediction and response. *Frontiers in Environmental Science*. <https://www.frontiersin.org/journals/environmental-science/articles/10.3389/fenvs.2025.1659344/full> (отримано 10 червня 2025).

Kingma, D. P., and Welling, M. (2013). Auto-encoding variational Bayes. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/1312.6114> (отримано 23 липня 2025).

Kurth, T. et al. (2023). FourCastNet v2: High-resolution global weather forecasting with vision transformers. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2310.01414> (отримано 1 травня 2025).

Lam, R. et al. (2023). GraphCast: Learning skillful medium-range global weather forecasting. *Science*, 382(6677), 1416—1421. <https://doi.org/10.1126/science.adi2336> (отримано 17 жовтня 2025).

LeCun, Y., Bengio, Y., and Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436—444. <https://doi.org/10.1038/nature14539> (отримано 29 вересня 2025).

Lessig, C. et al. (2024). Pangu-Weather: A 3D high-resolution model for fast and accurate global weather forecast. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2211.14554> (отримано 6 серпня 2025).

Li, Z. et al. (2024). Auroga: A foundation model for the atmosphere. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2405.13063> (отримано 21 квітня 2025).

Nguyen, T. et al. (2023). ClimaX: A foundation model for weather and climate. *Proceedings of the 40th International Conference on Machine Learning (ICML 2023)*. <https://proceedings.mlr.press/v202/nguyen23b.html> (отримано 15 липня 2025).

Pathak, J. et al. (2022). FourCastNet: A global data-driven high-resolution weather model using adaptive Fourier neural operators. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2202.11214> (отримано 4 червня 2025).

Price, I. et al. (2025). Probabilistic weather forecasting with machine learning. *Nature*. <https://www.nature.com/articles/s41586-024-08252-9> (отримано 26 жовтня 2025).

Rasp, S. et al. (2020). WeatherBench: A benchmark for data-driven weather forecasting. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(11). <https://doi.org/10.1029/2020MS002203> (отримано 9 вересня 2025).

Ravuri, S. et al. (2021). Skilful precipitation nowcasting using deep generative models of radar. *Nature*, 597, 672—677. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03854-z> (отримано 30 квітня 2025).

Schmidhuber, J. (2015). Deep learning in neural networks: An overview. *Neural Networks*, 61, 85—117. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2014.09.003> (отримано 12 жовтня 2025).

Sevgin, F. (2025). Machine Learning-Based Temperature Forecasting for Sustainability. *Sustainability*, 17(5), 1812. <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/5/1812> (отримано 18 травня 2025).

Silver, D. et al. (2016). Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search. *Nature*, 529(7587), 484—489. <https://doi.org/10.1038/nature16961> (отримано 7 липня 2025).

Smith, J., and Brown, T. (2023). The integration of artificial intelligence in supervisory control and data acquisition (SCADA) systems. *Journal of Industrial Automation*, 45(3), 123—135 (отримано 24 серпня 2025).

Sønderby, C. K. et al. (2020). MetNet: A neural weather model for precipitation forecasting. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2003.12140> (отримано 22 квітня 2025).

Supto, S. T. J. et al. (2025). Next-Generation Climate Modeling: AI-Enhanced. *Climate*, 34(1), 15. <https://www.mdpi.com/3042-5743/34/1/15> (отримано 11 жовтня 2025).

Weyn, J. A. et al. (2021). Sub-seasonal forecasting with a large ensemble of deep-learning weather prediction models. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 13(7). <https://doi.org/10.1029/2021MS002502> (отримано 29 червня 2025).

Xu, P. et al. (2025). An artificial intelligence-based limited area model for high-resolution meteorological forecasting. *Communications Earth & Environment*. <https://www.nature.com/articles/s43247-025-02347-5> (отримано 25 жовтня 2025).

Zhang, H. (2025). Machine Learning Methods for Weather Forecasting: A Survey. *Atmosphere*, 16(1), 82. <https://www.mdpi.com/2073-4433/16/1/82> (отримано 13 вересня 2025).

Zhong, X. et al. (2024). Advances and prospects of deep learning for medium-range weather forecasts. *Geoscientific Model Development*. <https://gmd.copernicus.org/articles/17/2347/2024/> (отримано 1 серпня 2025).

On Some Limitations of Current Machine Learning Weather Forecasting Models. (2023). *Geophysical Research Letters*. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2023GL107377> (отримано 20 травня 2025).

An Efficient Machine Learning Technique for Weather Forecasting. (2024). *Procedia Computer Science*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050924007403> (отримано 6 липня 2025).

Validating Deep Learning Weather Forecast Models on Recent High-Resolution Events. (2024). *Artificial Intelligence for the Earth Systems*, 4(1). <https://journals.ametsoc.org/view/journals/aies/4/1/AIES-D-24-0033.1.xml> (отримано 19 жовтня 2025).

AI Weather Models and Dubai's Unprecedented 2024 Storm. (2025). *arXiv*. <https://arxiv.org/html/2505.10241v1> (отримано 28 вересня 2025).

Forecasting the Future with Future Technologies: Advancements in Large Meteorological Models. (2024). *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2404.06668> (отримано 15 квітня 2025).

EWMoE: An effective model for global weather forecasting with mixture-of-experts. (2024). *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2405.06004> (отримано 2 червня 2025).

Agricultural Recommendation System based on Deep Learning. (2024). *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2401.11410> (отримано 27 липня 2025).

The Use of AI In Disaster Management and Predictive Modeling. (2025). *ResearchGate*. [https://www.researchgate.net/publication/376528789\\_The\\_Use\\_of\\_AI\\_In\\_Disaster\\_Management\\_and\\_Predictive\\_Modeling](https://www.researchgate.net/publication/376528789_The_Use_of_AI_In_Disaster_Management_and_Predictive_Modeling) (отримано 10 вересня 2025).

National Weather Service (NWS) Forecasters' Perceptions of AI/ML. (2024). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 105(11). <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/105/11/BAMS-D-24-0044.1.xml> (отримано 23 жовтня 2025).

Waqas, M. et al. (2025). Artificial intelligence and numerical weather prediction: A survey. *Environmental Modelling & Software*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266659212400091X> (отримано 4 жовтня 2025).

Yang, R. et al. (2024). Interpretable machine learning for weather and climate prediction: A survey. *Atmospheric Research*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231024004722> (отримано 29 жовтня 2025).

## **INTELLIGENT SYSTEMS FOR AUTOMATION OF MANUFACTURING PROCESSES BASED ON MACHINE LEARNING AND THE INTERNET OF THINGS**

**M. Pohribniak**

*National University of Food Technologies*

---

**Key words:**

*Internet of things  
Blockchain  
Machine learning  
Manufacturing processes  
Intelligent systems*

---

**Article history:**

Received 11.09.2025  
Received in revised form  
25.09.2025  
Accepted 16.10.2025

---

**Corresponding author:**

M. Pohribniak

**E-mail:**

maksym.pogribnyak@gmail.com

**Citation:** Погрібняк М. С. (2025). Інтелектуальні системи автоматизації виробничих процесів на базі машинного навчання та інтернету речей. *Наукові праці НУХТ*, 31(5), 23—31. DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-5-4

**ABSTRACT**

---

The study was focused on the integration of Machine Learning (ML) and the Internet of Things (IoT) into manufacturing processes, creating a new paradigm of automation. Machine Learning, a subfield of artificial intelligence, analyzes historical data to identify patterns and make predictions. IoT provides a network of physical devices for real-time data collection and transmission. The combination of these technologies allows for the collection and analysis of large volumes of data for monitoring and managing production.

ML algorithms analyze data, detect anomalies, predict equipment failures, and optimize processes, contributing to increased productivity and product quality. Intelligent systems automatically respond to problems and optimization opportunities, ensuring adaptation to changing conditions and continuous improvement. It was noted that data preprocessing methods such as cleaning, normalization, and filtering prepare data for analysis by ML algorithms, which identify patterns, anomalies, and predict potential equipment failures. The process by which intelligent systems generate recommendations or make automatic decisions to correct and optimize manufacturing processes, using standardized communication protocols and APIs for reliable communication between all system elements was also modeled in the article. The feedback loop described allows systems to self-learn, improve their models over time, and enhance manufacturing process efficiency.

Key trends such as edge computing, the implementation of 5G, the development of autonomous systems, and the creation of digital twins are highlighted. Possible future research directions are modeled, including the development of hybrid algorithms, improved cybersecurity, standardization, energy efficiency, and the expanded use of artificial intelligence, which will further the development of Industry 4.0 and provide competitive advantages for enterprises.

## ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ НА БАЗІ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ТА ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

М. С. Погрібняк

Національний університет харчових технологій

*Дослідження фокусується на інтеграції машинного навчання (ML) та Інтернету речей (IoT) у виробничі процеси, що створює нову парадигму автоматизації. Машинне навчання, підгалузь штучного інтелекту, аналізує історичні дані для виявлення закономірностей і створення прогнозів. IoT забезпечує мережу фізичних пристроїв для збору та передачі даних у режимі реального часу. Об'єднання цих технологій дає змогу збирати й аналізувати великі обсяги даних для моніторингу та управління виробництвом.*

*Алгоритми ML аналізують дані, виявляють аномалії, прогнозують збої обладнання й оптимізують процеси, що сприяє підвищенню продуктивності та якості продукції. Інтелектуальні системи автоматично реагують на проблеми та оптимізаційні можливості, забезпечуючи адаптацію до змінних умов і постійне вдосконалення. Вказано, що методи передобробки даних, такі як очищення, нормалізація та фільтрація, готують дані для аналізу алгоритмами машинного навчання, які виявляють закономірності, аномалії та прогнозують можливі збої обладнання. Також змодельовано процес, за яким інтелектуальні системи генерують рекомендації або приймають автоматичні рішення щодо корекції й оптимізації виробничих процесів, використовуючи стандартизовані протоколи зв'язку та API для надійної комунікації між усіма елементами системи. Описано цикл зворотного зв'язку, що дає змогу системам самонавчатися, покращувати свої моделі з часом і підвищувати ефективність виробничих процесів.*

*Вказано на ключові тенденції, такі як периферійні обчислення, впровадження 5G, розвиток автономних систем і створення цифрових двійників. Змодельовано можливі напрями майбутніх досліджень, включаючи розвиток гібридних алгоритмів, покращення кібербезпеки, стандартизацію, енергоефективність і розширене використання штучного інтелекту, що сприятиме подальшому розвитку індустрії 4.0 і забезпеченню конкурентних переваг для підприємств.*

**Ключові слова:** Інтернет речей, блокчейн, машинне навчання, виробничі процеси, інтелектуальні системи.

**Постановка проблеми.** У сучасних умовах розвитку промислового виробництва все більш актуальним стає застосування інтелектуальних систем для автоматизації виробничих процесів. Одним із перспективних напрямів є інтеграція машинного навчання і технологій Інтернету речей (IoT), що дає змогу значно підвищити ефективність і гнучкість виробничих систем. Машинне навчання забезпечує можливість обробки великих обсягів даних і побудови моделей, що дають змогу прогнозувати й оптимізувати роботу технологічного обладнання. Технології IoT

забезпечують збір і передачу даних у режимі реального часу, що створює передумови для побудови комплексних систем моніторингу та управління (Lee, Bagheri, & Kao, 2015).

Дослідження інтелектуальних систем автоматизації виробничих процесів на базі машинного навчання та Інтернету речей (IoT) є важливим напрямком, який має потенціал значно покращити ефективність, продуктивність і безпеку виробництва. Це обумовлено зростаючою складністю та динамічністю виробничих процесів, зростанням обсягу даних, появою нових технологій та потенційними перевагами, які може дати впровадження таких систем.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасні дослідження висвітлюють різні аспекти застосування машинного навчання та Інтернету речей (IoT) у промисловості для автоматизації виробничих процесів.

У статті (Подскребко, Квашук, & Берідзе-Стаховський, 2019) досліджуються технології машинного навчання для розпізнавання образів у промисловості, що підвищує якість і ефективність виробництва. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на інтеграцію розроблених методів розпізнавання з IoT-сенсорами для створення повністю автоматизованих систем контролю якості в реальному часі.

У праці (Akli, & Choug dali, 2023) аналізуються підходи до управління довірою в IoT за допомогою машинного навчання, що підвищує безпеку і надійність систем. Перспективним напрямом подальших досліджень є адаптація запропонованих моделей довіри до промислових IoT-мереж з великою кількістю підключених пристроїв, з урахуванням вимог до швидкодії, масштабованості та енергоефективності.

О. О. Шапуров розглядає інтеграцію IoT, блокчейн технологій і цифрових двійників для створення надійних систем автоматизації, що підвищує ефективність виробничих процесів (Шапуров, 2023). Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розробку методів синхронізації цифрових двійників із реальними об'єктами в режимі реального часу й оцінку ефективності використання блокчейну для забезпечення цілісності виробничих даних.

Практичні аспекти впровадження IoT у промислові системи автоматизації досліджуються у (Міщук, & Міщук, 2020), де підкреслюється їх потенціал для підвищення продуктивності. Перспективним є дослідження економічної ефективності впровадження IoT-рішень у виробництві та розробка моделей оцінки окупності інвестицій, враховуючи різні масштаби та галузі підприємств.

У праці (Rojko, 2017) підкреслюється важливість застосування машинного навчання та IoT у промисловості, визначаються перспективи розвитку інтелектуальних систем автоматизації виробничих процесів.

**Метою дослідження** є аналіз застосування інтелектуальних систем автоматизації виробничих процесів на базі машинного навчання та Інтернету речей (IoT) для підвищення ефективності, продуктивності та якості виробництва.

**Матеріали і методи.** Використані сучасні наукові матеріали, у яких досліджується застосування систем машинного навчання та Інтернету речей (IoT) у промисловості для автоматизації виробничих процесів. Вони включають огляд найкращих практик, досліджень, а також впровадження успішних проєктів у галузі. Як методичне забезпечення застосовано практичні інженерні методи розробки та

впровадження інтелектуальних систем автоматизації, описані в таких міжнародних і галузевих технічних стандартах, як серія стандартів VDI/VDE/VDMA 2632 (Lu, Morris, & Frechette, 2016).

**Викладення основних результатів дослідження.** Машинне навчання (ML) — це підгалузь штучного інтелекту, яка фокусується на розробці алгоритмів і моделей, здатних навчатися на основі даних. Алгоритми машинного навчання аналізують історичні дані для виявлення закономірностей і створення прогнозів або рекомендацій. Основні види машинного навчання включають контрольоване навчання, де модель навчається на основі розмічених даних; неконтрольоване навчання, яке використовується для виявлення прихованих структур у нерозмічених даних; навчання з підкріпленням, де модель вчиться шляхом взаємодії із середовищем і отримання винагород або покарань за свої дії (Ірлик, & Стопакевич, 2023; Подскребко, Квашук, & Берідзе-Стаховський, 2019). Перспективним є дослідження можливостей застосування навчання з підкріпленням у динамічних виробничих середовищах, зокрема для оптимізації роботи обладнання в умовах змінних виробничих параметрів та обмежених ресурсів.

Інтернет речей (IoT) — це мережа фізичних пристроїв, оснащених датчиками, програмним забезпеченням та іншими технологіями для обміну даними через інтернет. Ці пристрої можуть взаємодіяти один з одним та з іншими системами в режимі реального часу, що дає змогу збирати, передавати й аналізувати великі обсяги даних з різних джерел. IoT-технології забезпечують безперервний моніторинг та управління об'єктами і процесами, що значно підвищує їх ефективність і продуктивність.

Інтеграція інтелектуальних систем, машинного навчання та IoT у виробничі процеси створює нову парадигму автоматизації, яка значно підвищує ефективність, гнучкість і надійність виробництва. IoT-датчики, встановлені на виробничому обладнанні, збирають дані про його стан і робочі параметри в режимі реального часу. Ці дані передаються на аналітичні платформи, де вони обробляються алгоритмами машинного навчання.

Алгоритми машинного навчання аналізують отримані дані, виявляють закономірності та аномалії, прогнозують можливі збої обладнання й оптимізують виробничі процеси. Наприклад, моделі можуть передбачати час імовірного виходу з ладу певного компонента, що дає змогу здійснювати планове технічне обслуговування та уникати незапланованих простоїв (Zhang, & Xu, 2020). Також, машинне навчання може оптимізувати параметри роботи обладнання для досягнення максимальної продуктивності та якості продукції (Смоляр, Іляш, & Трофименко, 2021). Подальші дослідження можуть бути спрямовані на створення адаптивних моделей оптимізації, здатних самостійно змінювати параметри обладнання у відповідь на непередбачувані зовнішні та внутрішні фактори.

Інтелектуальні системи, інтегровані з IoT та ML, здатні автоматично реагувати на виявлені проблеми та оптимізаційні можливості. Наприклад, система може автоматично налаштувати параметри роботи машини, щоб зменшити споживання енергії або підвищити якість продукції. Крім того, ці системи забезпечують постійний моніторинг і зворотний зв'язок, що дозволяє їм адаптуватися до змінних умов виробництва і постійно вдосконалювати свої алгоритми на основі нових даних.

За даними аналізованих джерел, інтеграція інтелектуальних систем, машинного навчання та IoT підвищує адаптивність і надійність виробничих процесів, а також сприяє зменшенню простоїв і підвищує якість продукції. Конкретні кількісні показники залежать від галузі, масштабу виробництва та реалізованих технологічних рішень. Цей підхід забезпечує конкурентні переваги та відкриває нові можливості для розвитку індустрії 4.0.

Слід зазначити, що інтелектуальні системи автоматизації виробничих процесів базуються на комплексній архітектурі, що включає кілька ключових компонентів (табл. 1) (Прохорова, & Чобіток, 2023; Чанкветадзе, & Фешанич, 2023). Перспективним є подальше дослідження ефективності впровадження форсайтно-інноваційних механізмів управління у промислових IoT-системах, зокрема у контексті прогнозування технологічних ризиків.

*Таблиця 1. Архітектура інтелектуальних систем автоматизації*

Компонент	Опис	Функції
Датчики (Sensors)	Основні пристрої збору даних	Вимірювання параметрів (температура, тиск, вологість, вібрація, рівень зносу)
Типи датчиків	Аналогові, цифрові, бездротові, провідні	Забезпечують високу точність і швидкість збору даних
Пристрої збору даних (Data Acquisition Devices)	Збирають дані з датчиків	Буферизація, фільтрація, передача даних через мережеві протоколи (MQTT, HTTP, CoAP)
Аналітичні платформи (Analytical Platforms)	Сервери або хмарні платформи для обробки даних	Зберігання даних, обробка та аналіз, візуалізація результатів, передача рекомендацій

Датчики, встановлені на виробничому обладнанні, збирають дані в режимі реального часу. Ці дані включають різноманітні параметри, такі як температура, тиск, вібрація, рівень зносу та інші критичні показники роботи обладнання. Пристрої збору даних агрегують цю інформацію і передають її на аналітичні платформи через мережу, яка може бути як локальною, так і хмарною. Цей етап є критичним для забезпечення безперервного потоку даних, необхідного для подальшого аналізу.

Аналітичні платформи отримують дані від пристроїв збору даних. На цьому етапі використовуються методи передобробки даних, такі як очищення, нормалізація та фільтрація, щоб підготувати дані до аналізу. Алгоритми машинного навчання обробляють ці дані для виявлення закономірностей, аномалій, трендів і для прогнозування майбутніх подій, наприклад, прогнозування збоїв обладнання. Типи алгоритмів, що застосовуються, можуть включати регресію, класифікацію, кластеризацію, аналіз часових рядів та інші методи, що дають змогу отримати глибокі інсайти з даних.

На основі результатів аналізу інтелектуальна система генерує рекомендації або приймає автоматичні рішення щодо корекції або оптимізації виробничих процесів. Ці рішення можуть бути передані назад до пристроїв збору даних і датчиків для негайного виконання. Наприклад, якщо прогнозується збій обладнання, система може автоматично зупинити виробничий процес для запобігання аварії та

ініціювати технічне обслуговування. Взаємодія між компонентами IoT та алгоритмами машинного навчання забезпечується через стандартизовані протоколи зв'язку та інтерфейси прикладного програмування (API), що забезпечує надійну та ефективну комунікацію між усіма елементами системи (Al-Badi, Tarhini, & Khan, 2018).

Дані про результати впроваджених рішень збираються та аналізуються, що дає змогу системі самонавчатися і покращувати свої моделі з часом. Цикл зворотного зв'язку забезпечує постійне вдосконалення алгоритмів машинного навчання та підвищення ефективності виробничих процесів. Система постійно адаптується до нових умов і вдосконалює свої прогностні можливості та управлінські функції.

Архітектура інтелектуальних систем автоматизації виробничих процесів базується на тісній інтеграції компонентів IoT та алгоритмів машинного навчання, що забезпечує високий рівень автоматизації, ефективності та адаптивності виробництва. Ця інтеграція дає змогу створювати самонавчальні системи, які з часом стають все більш точними та ефективними, що забезпечує конкурентні переваги для підприємств у швидко змінюваному виробничому середовищі (Міщук, & Міщук, 2020).

Прикладами алгоритмів, що застосовуються для аналізу та оптимізації виробничих процесів є:

1. Класифікація: використовується для розпізнавання типів дефектів на виробках або визначення категорій продукції. Наприклад, алгоритми нейронних мереж або дерева рішень можуть класифікувати продукти на основі зображень або інших характеристик.

2. Регресія: застосовується для прогнозування числових значень, таких як час до відмови обладнання або очікуваний рівень виробництва. Лінійна регресія або метод опорних векторів можуть використовуватися для побудови моделей, що передбачають ці значення на основі історичних даних.

3. Кластеризація: використовується для групування схожих об'єктів або виявлення патернів у даних. Алгоритми, такі як K-means або ієрархічна кластеризація, можуть ідентифікувати групи схожих виробничих процесів або визначати основні причини відхилень у виробництві (Козак, 2021).

Важливо, що інтелектуальні системи використовують дані з датчиків, встановлених на обладнанні, для оптимізації параметрів виробничих процесів. Наприклад, система може автоматично регулювати швидкість конвеєрної стрічки, температуру в печі або тиск у виробничих лініях, щоб забезпечити оптимальну продуктивність та мінімізувати витрати. Алгоритми машинного навчання аналізують історичні дані та поточні умови, щоб знайти найефективніші налаштування для кожного етапу виробництва. Це дає змогу знизити енергоспоживання та підвищити якість продукції.

Система здійснює моніторинг стану обладнання в режимі реального часу, використовуючи датчики, що вимірюють вібрації, температуру, тиск тощо. Алгоритми машинного навчання аналізують ці дані для виявлення аномалій, які можуть свідчити про наближення збоїв. Наприклад, система може передбачити зношення підшипника у двигуні, дозволяючи планувати технічне обслуговування до того, як станеться аварія. Це запобігає незапланованим простоям, знижує витрати на ремонт і продовжує термін служби обладнання.

Інтелектуальні системи використовують прогнозу аналітику для управління ланцюгом постачань. Вони аналізують дані про попит, запаси та виробничі потужності, щоб оптимізувати планування постачань. Наприклад, система може прогнозувати збільшення попиту на певну продукцію в певний період і відповідно коригувати замовлення на сировину та компоненти. Це допомагає уникнути дефіциту матеріалів, мінімізувати витрати на зберігання та забезпечити своєчасне постачання продукції (Hebbar, & Pullela, 2023).

Отже, впровадження цих технологій у виробництві стає ключовим чинником конкурентоспроможності, дозволяючи підприємствам оптимізувати операції, зменшувати витрати та підвищувати якість продукції. Важливість дослідження нових тенденцій і технологій у сфері ML та IoT обумовлена їхнім потенціалом для революційних змін у промисловості. Дослідження у цій галузі є критично важливими для подальшого розвитку автоматизації виробничих процесів (Шапуров, 2023). Інновації в ML та IoT сприятимуть створенню більш інтегрованих, адаптивних і самовдосконалюваних систем, які зможуть забезпечити безпрецедентний рівень ефективності та гнучкості у виробництві. Враховуючи швидкий темп технологічного прогресу, вивчення нових тенденцій і технологій у цих сферах стане фундаментом для майбутніх досягнень і забезпечить підприємствам стійкі конкурентні переваги.

Нові тенденції та технології у сфері машинного навчання та IoT:

1. Периферійні обчислення стають важливою тенденцією у сфері IoT, особливо для виробничих процесів, де важлива швидкість обробки даних. Замість передачі всіх даних на центральний сервер або хмару, обчислення відбуваються безпосередньо на місці, на периферійних пристроях. Це дозволяє зменшити затримку, підвищити швидкість реакції системи та знизити навантаження на мережу.

2. Впровадження технології 5G надає нові можливості для IoT завдяки високій пропускну здатності та низькій затримці передачі даних. Це дозволяє більш ефективно використовувати пристрої IoT у виробничих процесах, забезпечуючи надійну та швидку передачу великих обсягів даних, що є критичним для реального часу моніторингу та управління.

3. Розвиток автономних систем і робототехніки, які використовують машинне навчання для самонавчання та адаптації до змінних умов, значно розширює можливості автоматизації. Роботи та автономні транспортні засоби можуть самостійно виконувати складні завдання, оптимізуючи виробничі процеси та знижуючи потребу в людській праці (Dong, Mingyue, & Guoying, 2017; Singh, Varkey, & Mohanraj, 2023).

Створення цифрових двійників фізичних виробничих систем дає змогу проводити моделювання та аналіз віртуальних копій реальних об'єктів. Це сприяє оптимізації процесів, прогнозуванню збоїв та підвищенню загальної ефективності виробництва. Використання машинного навчання в цифрових двійниках забезпечує швидку адаптацію до змін у виробничих умовах (Akli, & Chougali, 2023; Calarany, Indumathy, & Rahul, 2024; Sadeghi, Wachsmann, & Waidner, 2015).

Потенційними напрямками досліджень та інновацій у контексті автоматизації виробничих процесів є:

1. Розвиток гібридних алгоритмів машинного навчання: дослідження в області гібридних алгоритмів, які поєднують різні підходи машинного навчання (су-

первайзинг, несупервайзинг, підкріплювальне навчання), можуть значно підвищити ефективність аналізу даних та оптимізації процесів. Гібридні методи дозволяють враховувати специфіку виробничих процесів та забезпечувати більш точні прогнози та рішення.

2. Покращення кібербезпеки для IoT-систем: зі збільшенням кількості підключених пристроїв IoT питання кібербезпеки стає критично важливим. Дослідження в галузі захисту даних, розробка нових протоколів безпеки та використання машинного навчання для виявлення загроз можуть забезпечити захист виробничих систем від кібератак.

3. Інтероперабельність і стандартизація дають змогу створити єдині платформи для управління й аналізу даних з різних джерел, підвищуючи ефективність інтеграції та взаємодії між компонентами виробничих систем.

4. Енергоефективність і сталий розвиток: дослідження енергоефективних алгоритмів та систем управління можуть сприяти зниженню енергоспоживання виробничих процесів. Використання відновлюваних джерел енергії, оптимізація енергоспоживання та мінімізація відходів стануть важливими напрямками для забезпечення сталого розвитку виробництва.

5. Розширене використання штучного інтелекту (AI): інтеграція AI для автоматизації більш складних виробничих завдань, таких як управління якістю, прогнозування попиту й оптимізація логістики, відкриває нові можливості для підвищення продуктивності та гнучкості виробництва. Дослідження в галузі AI дають змогу створювати більш адаптивні й автономні системи управління виробництвом.

### Висновки

Впровадження інтелектуальних систем автоматизації виробничих процесів на базі машинного навчання та Інтернету речей (IoT) значно підвищує ефективність і продуктивність підприємств. Алгоритми машинного навчання оптимізують процеси в реальному часі, зменшуючи простой та витрати, а IoT забезпечує безперервний моніторинг стану обладнання, що підвищує якість продукції та дає змогу швидко виявляти дефекти.

Ці технології також знижують операційні витрати через оптимізацію використання ресурсів і передбачуване технічне обслуговування. Підвищення безпеки праці досягається завдяки контролю умов виробництва та автоматичному реагуванню на критичні зміни, що забезпечує швидке усунення потенційних загроз.

Крім того, інтелектуальні системи автоматизації забезпечують гнучкість та адаптивність виробництва, забезпечуючи можливість підприємствам швидко реагувати на зміни ринку та вимоги споживачів. Інтеграція різних виробничих систем через IoT створює єдину інформаційну середу, покращуючи координацію та управління процесами, що відкриває нові можливості для інновацій та підвищення конкурентоспроможності.

### Література

Ірлик, Ю. А., & Стопакевич, А. О. (2023). Аналіз перспектив застосування технологій штучного інтелекту для побудови автономних промислових систем автоматичного керування. *Журнал Одеського державного університету інтелектуальних технологій і зв'язку «Автоматизація технологічних і бізнес-процесів»*, 15, 8—13.

Козак, Є. (2021). Принципи впровадження моделей машинного навчання у сфері інтелектуального обслуговування промислового обладнання. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*, 3, 19—28. <https://doi.org/10.32851/tnv-tech>. 2021.3.3.

Мішук, Є., & Мішук, Д. (2020). Системи промислової автоматизації на основі IoT. У. М. Сукач (гол. ред.), *Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини: всеукр. зб. наук. праць*, 96, 42—50.

Подскребко, О. С., Квашук, Д. М., & Берідзе-Стаховський, А. К. (2019). Технології машинного навчання в промисловості з використанням методів розпізнавання образів. *Економіка та держава*, 6, 46—49. <https://doi.org/10.32702/2306-6806.2019.6.46>.

Прохорова, В. В., & Чобіток, І. О. (2023). Форсайтно-інноваційний механізм управління підприємствами в умовах цифровізації: теоретичні аспекти. *Бізнес Інформ*, 2, 78—85. <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2023-2-78-85>.

Смоляр, Л. Г., Іляш, О. І., & Трофименко, О. О. (2021). Трансформаційні ефекти цифровізації у забезпеченні розвитку промислового виробництва в умовах індустрії 4.0. *Журнал міжнародного університету фінансів «Економіка та управління підприємствами»*, 21, 24—30.

Чанкветадзе, Д., & Фешанич, Л. (2023). Перспективи розвитку систем промислової автоматизації в контексті індустрії 4.0. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*, 4, 234—239. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-76-31>.

Шапуров, О. О. (2023). Промислові інновації: інтернет речей, блокчейн, цифровий двійник. *Acta Academiae Beregsasiensis. Economics*, 4, 164—178. <https://doi.org/10.58423/2786-6742/2023-4-164-177>.

Al-Badi, A., Tarhini, A., & Khan, A. I. (2018). Exploring Big Data Governance Frameworks. *Procedia Computer Science*, 141, 271—277. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.10.181>.

Akli, A., & Chougali, K. (2023). *A survey on Machine Learning for IoT Trust Management*. In 2023 IEEE Global Conference on Artificial Intelligence and Internet of Things (GCAIoT). IEEE.

Calarany, C., Indumathy, M., Senthilraja, P., Suganya, D., Vardhan, V. G., & Rahul, Y. S. (2024). *Successful Integration of IoT and Blockchain Technologies Using Several Machine Learning Algorithms*. In 2024 IEEE International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (IC2PCT). IEEE.

Dong, L., Mingyue, R., & Guoying, M. (2017). Application of Internet of Things Technology on Predictive Maintenance System of Coal Equipment. *Procedia Engineering*, 174, 885—889. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.237>.

Hebbar, P. K., & Pulella, P. K. (2023). *Deep Learning in Object Detection: Advancements in Machine Learning and AI*. In 2023 International Conference on the Confluence of Advancements in Robotics, Vision and Interdisciplinary Technology Management (IC-RVITM). IEEE.

Schmid, R. (n. d.). Industrial IoT: How Connected Things are Changing Manufacturing. Взято з <https://www.ge.com/digital/blog/industrial-iot-how-connected-things-are-changing-manufacturing>.

Singh, V., Varkey, T. A., & Mohanraj, S. (2023). *Supporting Internet of Things Devices with DNS*. In 2023 International Conference on Power Energy, Environment & Intelligent Control (PEEIC).

Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2015). *A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems*. *Manufacturing Letters*, 3, 18—23.

Lu, Y., Morris, K. C., & Frechette, S. (2016). *Current standards landscape for smart manufacturing systems*. NIST.

Zhang, Y., & Xu, C. (2020). Machine learning for predictive maintenance: A review in industrial applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 56, 251—264.

Sadeghi, A. R., Wachsmann, C., & Waidner, M. (2015). *Security and privacy challenges in industrial IoT*. Proceedings of the 52nd Annual Design Automation Conference.

Rojko, A. (2017). *Industry 4.0 concept: Background and overview*. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, 11(5), 77—90.

Monostori, L. (2014). Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges. *Procedia CIRP*, 17, 9—13.

## MODELING AND VISUALIZATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES USING AUGMENTED REALITY

V. Polupan, R. Mirkevych

National University of Food Technologies

---

**Key words:**

*Centrifugal pump  
Tachometry  
Hydraulic parameters  
Industry 4.0  
Asynchronous motor  
Cloud technologies*

---

**Article history:**

Received 04.09.2025  
Received in revised form  
18.09.2025  
Accepted 09.10.2025

---

**Corresponding author:**

R. Mirkevych

**E-mail:**

roman.mirkevich@gmail.com

**Citation:** Полупан В. В., Міркевич Р. М. (2025). Моделювання та візуалізація технологічних процесів з використанням доповненої реальності. *Наукові праці НУХТ*, 31(5), 32—43.

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

**ABSTRACT**

---

The development of an integrated augmented reality system for modeling and visualizing technological processes in the specific context of centrifugal pump installations using a digital twin is presented in this work. In the context of Industry 4.0, augmented reality technology demonstrates high efficiency in optimizing production tasks, particularly in training, diagnostics, monitoring, and enhancing safety. As part of the study, a mathematical model of the pump system was implemented based on empirically determined coefficients and differential equations, which allowed for accurate reproduction of both steady-state and transient processes occurring within the installation. The hardware component features a variable-speed asynchronous motor and a pressure measurement and tachometry system. LabVIEW was used to visualize rotation speed and voltage parameters, while the augmented reality interface was implemented via Vuforia Studio with prior import of a CAD model created in Creo Parametric and integrated into the AR environment with spatial tracking support through the Model Target Generator. The visual interface includes three menus: displaying components and documentation, dynamic simulation of internal processes, and monitoring changes with visual warnings about process deviations. The web interface, with AWP command support, enables real-time data acquisition from the DAQ system and remote control of the system's parameters. The integrated implementation of a digital twin, augmented reality, and cloud technologies creates a robust platform for enhancing production reliability, reducing costs, and introducing innovative industrial automation tools. The developed system can be adapted to various types of pump equipment and scaled to meet the needs of smart factories within the framework of Industry 4.0.

## МОДЕЛЮВАННЯ ТА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ

В. В. Полупан, Р. М. Міркевич

Національний університет харчових технологій

У статті розглядається розробка комплексної AR-системи моделювання та візуалізації технологічних процесів у конкретному контексті відцентрових насосних установок із застосуванням цифрового двійника. В умовах Індустрії 4.0 технологія доповненої реальності демонструє високу ефективність для оптимізації задач виробництва, особливо в аспектах навчання, діагностики, моніторингу та підвищення безпеки. В рамках дослідження була реалізована математична модель насосної системи, заснована на емпірично визначуваних коефіцієнтах і диференціальних рівняннях, що дозволило точно відтворити як стаціонарні, так і перехідні процесів, які відбуваються в межах установки. Апаратна частина представлена асинхронним двигуном з регульованою швидкістю та системою вимірювання тиску і тахометрії. Для візуалізації параметрів обертання та напруги застосовувалася платформа LabVIEW, а інтерфейс доповненої реальності був реалізований за допомогою Vuforia Studio з попереднім імпортуванням CAD-моделі, створеної у Creo Parametric, та інтегрованої у AR-середовище з підтримкою просторового відстеження через Model Target Generator. Візуальний інтерфейс включає три меню: відображення деталей та документації, динамічну симуляцію внутрішніх процесів і моніторинг змін із візуальними попередженнями щодо процесних відхилень. Веб-інтерфейс з підтримкою AWP-команд дає змогу в реальному часі отримувати дані з DAQ-системи та дистанційно керувати параметрами установки. Комплексна реалізація цифрового двійника, доповненої реальності та хмарних технологій створює стійку платформу для підвищення виробничої надійності, скорочення витрат та впровадження інноваційних засобів промислової автоматизації. Розроблена система може бути адаптованою до різноманітних типів насосного обладнання та масштабована під потреби смарт-фабрик в умовах Індустрії 4.0.

**Ключові слова:** відцентровий насос, тахометрія, гідравлічні параметри, Індустрія 4.0, асинхронний двигун, хмарні технології.

**Постановка проблеми.** Доповнена реальність (augmented reality — AR) — це технологія, яка перебуває у фазі швидкого розвитку та має потенціал революціонізувати різні сфери промисловості. У контексті Індустрії 4.0 AR полягає у віртуалізації цифрової інформації з реального світу за допомогою цифрових сенсорних даних (відео, звуку, тривимірної графіки та даних GPS). За допомогою цієї технології користувачі можуть взаємодіяти з віртуальними об'єктами та інформацією в реальному середовищі, підвищуючи при цьому професійні навички щодо виконання певних задач та прийняття рішень. Однією з основних переваг AR в Індустрії 4.0 виступає її здатність підвищувати ефективність і продуктивність, зокрема в контексті спрощення навігації робітників на промислових ділянках у межах

складних процесів виробництва, в результаті знижуючи витрачений час і зусилля, необхідні для виконання задач. Ця технологія, крім підвищення загальної робочої ефективності, може покращити безпеку в промислових умовах, наприклад, за посередництва візуального попередження робітників про небезпечні ситуації, зокрема рухоме обладнання, або потенційно небезпечні предмети (Voinea, Gîrbacia, Duguleană, Boboc, & Gheorghe, 2023). До того її можна застосовувати для забезпечення інструкцій і навчальних керівництв у режимі реального часу.

Хоча AR потенціал здатний посприяти переосмисленню принципів виробництва у промислових контекстах, ця технологія є порівняно новою, що означає проблематичність її інтеграції в робочі процеси виробничих підприємств. Високі витрати на встановлення AR-архітектур, які можуть бути недоступними для деяких підприємств, є найбільш серйозною перешкодою їхньої інтеграції. Крім того, вивчення принципів технології AR робітниками може спершу негативно вплинути на загальні обсяги виробництва. У цьому контексті існує потреба детальнішого вивчення перспектив розробки більш ефективних архітектур з цією технологією та принципів їх інтеграції у промислові процеси.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Спершу варто зазначити, що інша перспективна галузь застосування AR-систем у промисловості полягає в обслуговуванні. Відповідно з результатами дослідження (Lamberti та ін., 2014), витрати на обслуговування промислового апаратного забезпечення можуть бути знижені на 30% за допомогою AR-систем. Типове застосування полягає у забезпеченні зв'язку між працівниками промислових ділянок і постачальниками техніки з метою забезпечення перших необхідною інформацією в необхідний час за допомогою показників роботи, вилучених у реальному часі (Leutert, & Schilling, 2015; Flatt, Koch, Röcker, Günter, & Jaspersmeite, 2015).

З іншого боку, технології доповненої реальності також можуть застосовуватися, зокрема у дослідженнях (Makris, Karagiannis, Koukas, & Matthaiakis, 2016; Michalos, Karagiannis, Makris, Tokçalar, & Chryssolouris, 2016), з метою підвищення безпеки при роботі як роботизованих станків, так і людей в однаковій виробничій ділянці шляхом візуалізації безпечних ділянок і можливих джерел небезпеки.

У праці (Deac, Popa, Ghinea, & Cotet, 2017) була представлена веб-орієнтована AR-система для архітектур розумного виробництва, яка надає користувачам доступ до технічних керівництв, схем експлуатації, історії обслуговування, навчальних відео та аналізу даних у реальному часі, при цьому будучи портативною на будь-якому пристрої.

У межах дослідження (Oscar, Fernández-Caramés, Fraga-Lamas, & Vilar-Montesinos, 2018) було проведено огляд сучасних промислових AR-застосунків для суднобудівництва та розумного виробництва, де були описані основні сценарії їхнього використання на корабельнях, а також відповідні апаратні та програмні рішення для них. Авторами було оцінена продуктивність системи з використанням трьох пристроїв з цими застосунками, двох комплексів засобів розробки AR та декількох маркерів у майстерні суднобудівного заводу.

Через серію порівняльних користувацьких досліджень у (Aschenbrenner та ін., 2019) надано рекомендації щодо застосування AR у виробництві. Результати були отримані на основі оцінок 160 робітників, які виконували однакову ремонтну за-

дачу на шафі керування промислового робота. В умовах одиночного та колективного використання в дослідженнях порівнювалися різні навчальні застосунки на базі AR на різних пристроях відображення (шолом, портативний планшетний ПК і проєкційна просторова AR) з традиційними процедурами (паперові інструкції та допомога від смартфона). Дослідження представляють чіткі докази щодо того, які стратегії реалізації AR-архітектури є особливо корисними в командній роботі на виробництві.

У праці (Garcia, Naranjo, Ortiz, & Garcia, 2019) пропонується створення віртуальної навчальної системи для встановлення, калібрування та вводу в експлуатацію HART-передатчиків (Highway Addressable Remote Transducer — віддалений адресний перетворювач з високою пропускнуною спроможністю) в динамічних і потенційно небезпечних середовищах, зокрема нафтогазових установках. Віртуальна та доповнена реальність у цьому контексті вважаються процесами, які здатні оптимізувати та скоротити час і витрати на навчання, що може забезпечувати краще ознайомлення з принципами гідродинаміки, роботи насоса й управління трубопровідними системами. За допомогою накладання віртуальних компонентів, тобто насосів, клапанів або трубопроводів, на фізичне навчальне середовище, підвищується цінність отримання практичного досвіду в контрольованих віртуальних умовах.

У праці (Cheng, Amerudin, & Yusof, 2019) описано розробку мобільного додатку доповненої реальності AR Pipeline Visualiser (ARPV) для візуалізації підземних водопровідних труб через камеру смартфона. Замість дорогих пристроїв і складної розмітки було використано рушій Unity3D, Marbox SDK та вбудовані датчики телефона, зокрема GPS та інерційний модуль. Геодані (GeoJSON) зберігаються на сервері Marbox, а при наведенні смартфона на будь-яку ділянку екрана накладається 3D-модель трубопроводу, замальована згідно з атрибутами (матеріал, діаметр, рік встановлення, тиск). У польових випробуваннях використання ARPV суттєво підвищує ситуаційну обізнаність і полегшує роботу на місці, але на бюджетних пристроях були виявлені зниження швидкості обчислення.

У межах дослідження (Choi, & Park, 2021) була запропонована AR-система для офшорного будівництва на основі Project Tango. Ключова інноваційна ідея полягає в точній реєстрації маркерів, тобто поєднанні фотограмметрії, натуральних ознак і кутових точок координатних міток, узгоджених за CAD-координатами. При значних рухах була передбачена гібридна оптимізація Bundle Adjustment, яка об'єднує дані міток та оточення, що забезпечує стабільне накладання моделі. Реалізовані функції прозорості, фільтрування за дисциплінами й автономна навігація до точок монтажу. У польових випробуваннях час інспекції скоротився у 2—8 разів порівняно з паперовими кресленнями.

У дослідженні (Chen, Videiro, & Guedes Soares, 2022) було розроблено комплексну модель цифрового двійника для трубопроводів, яка охоплює фази проєктування, будівництва, обслуговування та прогнозного подовження служби. При будівництві відбувається автоматична зйомка геометричних параметрів труб і зварних стиків за допомогою LiDAR, GPS/IMU та технологій комп'ютерного зору. В ході експлуатації цифрова модель оновлюється за рахунок даних інспекцій.

У дослідженні (Inoue та ін., 2023) було запропоновано Android-прототип на Unity+ARCore, який за рахунок GPS та розпізнавання площин поміщає 3D-модель

трубопровода безпосередньо в кадр камери. Моделі створюються за допомогою вбудованих інструментів Metamesh та ProBuilder, а для складних систем додатково підвантажуються дані з SHP-файлів (від GeoPandas до CSV).

Дослідження (Plakas, 2020) фокусується на впровадженні AR-технологій у реальне виробничо-логістичне оточення — у дистриб'юторський центр масштабно-го телеком-оператора. Мета роботи полягала в демонстрації того, як розумні окуляри Vuzix M300XL, поєднані з наявною WMS, можуть підвищити ефективність і точність процесу комплектування замовлень. Інтерфейс окулярів показує поточну позицію, наступну задачу, тривимірні стрілки та мікрокарту стелажа, а також дозволяє впроваджувати в процес текстові та голосові повідомлення від диспетчера. Ранні польові випробування підтвердили забезпечення легкості навчання нових співробітників і прогнозована крива адаптації.

Проте, з огляду на аналіз наведених вище наукових джерел варто зазначити, що питання, пов'язане з інтеграцією систем доповненої реальності у виробничі ланки промислових процесів, все ще залишається недостатньо дослідженим і потребує подальшого опрацювання.

**Метою дослідження** є обґрунтування методології застосування цифрових двійників і доповненої реальності для моделювання, моніторингу та візуалізації технологічних процесів у відцентрових насосних установках.

**Матеріали і методи.** Для проведення дослідження було використано комбінацію апаратних засобів, математичного моделювання та сучасних цифрових технологій, зокрема:

- використовувались методи математичного моделювання для опису роботи експериментальної установки;
- експериментальні дослідження для визначення основних параметрів експериментальної установки;
- розробка цифрового двійника для створення віртуальної моделі насосної установки із синхронізацією даних сенсорів у реальному часі;
- хмарні та веб-технології для інтеграція веб-інтерфейсу з AWP-командами для моніторингу та дистанційного керування параметрами насосної установки.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Відцентрові насоси вирізняються своїми характерними кривими, що задають напір  $H$ , який залежить від швидкості потоку  $Q$  та кутової швидкості обертання  $\omega$  у встановленому режимі роботи (Goppelt-Schneider, Hieninger, & Schmidt-Vollus, 2025). Базовий напір виражається таким чином:

$$H(\omega, Q) = h_{nn}\omega^2 - h_{n\omega}\omega Q - h_{\omega n}Q^2, \quad (1)$$

де коефіцієнти  $h_{nn}$ ,  $h_{n\omega}$  та  $h_{\omega n}$  визначаються емпіричним чином. У багатьох практичних сценаріях аналіз у встановленому, тобто стабільному режимі, є більш пріоритетним, ніж вивчення поведінки насоса в перехідних процесах. Базова перехідна поведінка відцентрового насоса, де залежність між його параметрами описується квадратичною функцією, моделюється шляхом доповнення рівняння (1) доданком, що містить похідну швидкості потоку:

$$H(t) = h_0\omega^2(t) - h_1\omega(t)Q(t) - h_2Q^2(t) - h_3\dot{Q}(t). \quad (2)$$

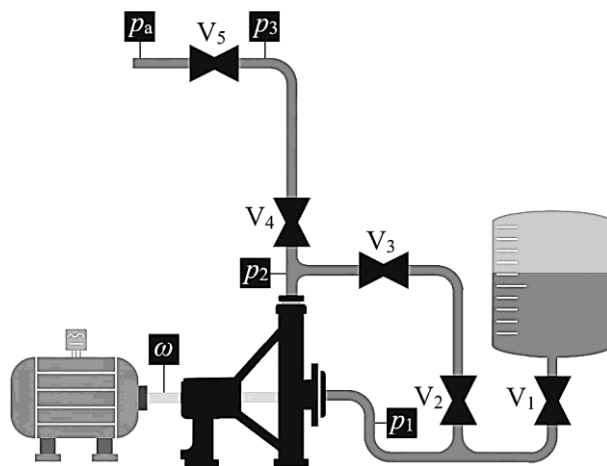
Варто зазначити, що невідома трубопровідна система з турбулентною течією завжди характеризується квадратичною залежністю та може моделюватися з урахуванням перехідних процесів з наступним диференціальним виразом, де  $a_f$  виражає геометричну інформацію трубопроводу:

$$H(t) = a_f Q' \dot{Q}(t) + h_{nr} Q^2(t) + H_{\text{стат.}} \quad (3)$$

Параметр  $h_{nr}$  може позначатися як конкретний коефіцієнт опору в трубопроводі, включаючи його коліна, дросельні клапани та інші елементи.

Це математичне моделювання представляється у ролі фундаменту для розуміння принципів роботи відцентрових насосів як у встановлених налаштуваннях, так і в динамічних умовах. Аналітичні вирази можуть мати прикладне застосування в контрольованих експериментальних умовах, оскільки вимірюються за допомогою сенсорів. Таким чином, з'являється можливість виявлення відхилень від ідеальної поведінки, емпірично деталізувати модельні коефіцієнти та оцінити продуктивність в умовах різного навантаження.

Системно-теоретичне моделювання відцентрового насоса базується на технологічній схемі, яка наведена на рис. 1. Вона складається з асинхронного електродвигуна з регульованою швидкістю обертання, під'єднаного до відцентрового насоса. Всмоктувальна сторона насоса під'єднується до резервуару з водою, а нагнітальна сторона з'єднується з трубопровідною системою. Наприкінці трубопроводу вода закачується у другий резервуар, який не враховується у рис. 1.



**Рис. 1. Технологічна схема тестувальної установки відцентрової насосної системи**

При розташуванні резервуару на більшій висоті порівняно з насосом сила тяжіння сприяє підтримці постійного статичного тиску в ділянці вхідного отвору насоса. Підтримка постійного тиску є критично важливою в контексті відтворення експериментальних результатів і точних сенсорних зчитувань. За такої умови зникає необхідність ручної підготовки насоса до роботи перед кожним тестовим циклом. З-поміж інших переваг такого розташування варто зазначити самоплив рідини в системі, що дозволяє проводити оцінку характеристик клапанів, поведінки

сенсорів і часу відгуку в умовах незначних навантажень та простою, що є корисним в контексті випробування безпечних аварійних режимів або мінімальних порогів працездатності компонентів.

Згідно з тестовою установкою, обертальна швидкість  $\omega$  можна вважати єдиною вхідною змінною, а вимірюванні вихідні змінні — двома перепадами тиску в різних точках. Диференціальний тиск застосовується або після самого відцентрового насоса, тобто  $p(t) = p_2(t) - p_a(t)$ , або в межах системи, тобто  $p_A(t) = p_3(t) - p_a(t)$ . Усі параметри тиску завжди пов'язані з постійним атмосферним тиском  $p_a(t)$ , порівняно з електричним нейтральним потенціалом електричного ланцюга.

Електроживлення системи відцентрового насоса забезпечується за допомогою 12-вольтового колекторного двигуна постійного струму Thurlby LB15, який розташовується на несучих кріпленнях зі сталі з обробленою алюмінієвою платформою товщиною 8 мм. Обертальні швидкості на вхідному та вихідному валах насоса вимірюються за допомогою двох тахометрів, які працюють на основі лазерних і світлодіодних джерел світла, забезпечують ручне налаштування чутливості та мають широкий діапазон виявлення — від 3 до 300 мм. Весь процес забезпечується за допомогою розташованих на обертальних валах світловідбивних маркерів, які ідентифікуються тахометрами та вимірюються у контексті періодичних змін відбиття протягом одного повного оберту. Джерело постійного струму забезпечує силу струму в 1 А та напругу з можливістю підлаштування до 15 В з метою уникнення дестабілізації в електроланцюгу під час перепадів. Вилучення даних з оптичних тахометрів забезпечується за допомогою модуля NI 9201 (діапазон  $\pm 10$  В), який під'єднується до CompactDAQ контролера NI 9133.

Вимірювання напруги та сили струму в системі здійснюється за посередництва вольтметра й амперметра. Сила струму має зберігатися постійною під час тестування, тоді як напруга може змінюватися, що реєструється через систему збору даних (data acquisition — DAQ). Амперметр під'єднується до джерела живлення та терміналу двигуна через гніздо під банановий штекер. Вольтметр під'єднується паралельно до терміналу мотора за допомогою двох гнізд (Pitzalis та ін., 2025).

Задля забезпечення зрозумілого уявлення про поведінку відцентрової насосної системи необхідно врахувати як параметри, які стосуються динаміки рідин, так і електричні параметри, які безпосередньо впливають на механічну роботу насоса. У налаштуванні поточної роботи колекторний двигун постійного струму запускає та підтримує роботу насоса, а його продуктивність чітко залежить від електричної потужності. Обертальна швидкість двигуна, яка визначає гідравлічний відгук насоса, у свою чергу, залежить від наявної напруги та сили струму.

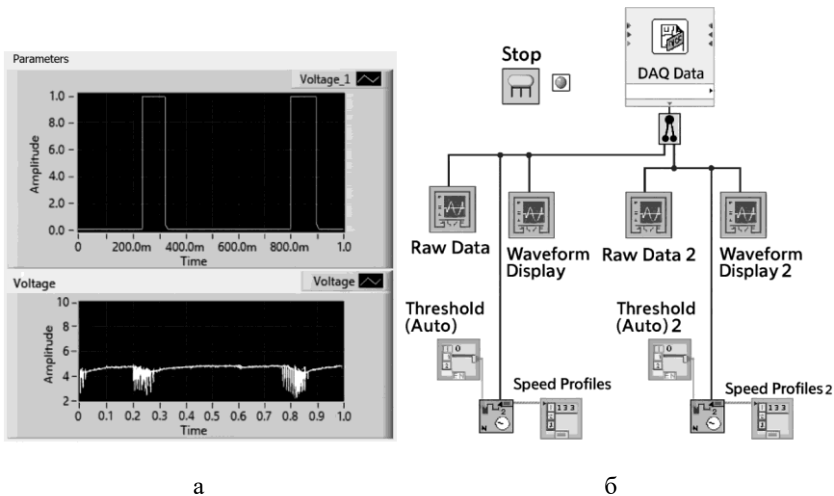
Зміни в напрузі живлення впливають на обертальний момент двигуна в динаміці, і таким чином — на обертальну швидкість, що, у свою чергу, впливає на генерований напір і швидкість потоку. Оскільки гідравлічний вихід насоса нелінійно пов'язаний з  $\omega$ , дестабілізації в поданій напрузі можуть безпосередньо переходити у гідравлічні аномалії.

Такий подвійний моніторинг є критично важливим не тільки у контексті аналізу обох типів поведінки системи: при стабільних умовах і під час змін, але також при виявленні аномалій, як, наприклад, кавітацій, перевантажень за обертальним

моментом або обмежень потоку. У випадку візуалізації за допомогою систем цифрових двійників (digital twin — DT) та доповненої реальності врахування як електричних, так і гідравлічних змінних сприяє підтримці симуляційної достовірності та дозволяє здійснювати точніші діагностику, тренування та прогнозне обслуговування обладнання (Perno, Hvam, & Haug, 2025).

Задля моніторингу, збереження та цільового відправлення в систему збору застосовується платформа та середовище розробки LabVIEW. Ця програмна архітектура містить інструменти графічної візуалізації за допомогою інтерфейсу для уточнення вхідних і вихідних параметрів (напруга, сила струму, швидкість). Контрольна панель має чотири дисплеї, на які відображаються час на осі x та амплітуда напруги пропорційно до вимірів тахометра на осі y. Час відображається як у мілісекундах, так і в секундах для установки тахометра та налаштування чутливості. Порогове налаштування визначає допустимий рівень сигналу тахометра.

Профіль швидкості на контрольній панелі відображає час активації оптичного тахометра та швидкість валу під час кожного імпульсу. На рис. 2, а зображено графік, який відображає вимірювання з одного оптичного тахометра в реальному часі. Верхня панель візуалізує силу сигналу залежно від виявлення поверхневої відбивної здатності, а нижні панелі показують тенденції в напрузі з плином часу. Загалом, цей профіль представляє відомості щодо кутової обертальної швидкості вала (shaft rotational speed — RPM) та витраченого часу для виконання повного обертального циклу в секундах як на вході, так і на виході насоса. Окремий індикатор відстежує електричну напругу живлення двигуна. На рис. 2, б також зображена блокова діаграма для визначення обробки сигналу та принципу з'єднання між собою кожного компонента системи інтерфейсом.



**Рис. 2.** Інтерфейс LabVIEW збору даних з тахометра: а — передня панель з даними напруги; б — блокова діаграма

Основна мета полягає у створенні AR інтерфейсу для моделі цифрового двійника відцентрової насосної системи, яка відобразить її основні компоненти,

динамічні характеристики відгуку та вимірювані параметри обертальної кутової швидкості, вилучені з оптичних тахометрів. Процес розробки включає аналіз і візуалізацію симуляцій системи шляхом семантичного пов'язування дестабілізацій у швидкості вала зі змінами у вхідній напрузі. Задля реалізації цього САД-збірки (Computer-Aided Design — комп'ютерне автоматизоване проектування) імпортуються до Vuforia Studio, яка являє собою платформу для створення та розгортання інженерних візуалізацій у AR середовищі (SphereGen, 2023). Vuforia Studio спрощує розробку користувацького інтерфейсу, що поєднує фізичні та віртуальні моделі шляхом інтеграції реальних сигналів, віджетів контрольної панелі та 2D/3D накладень безпосередньо на обладнання. Застосунок Vuforia View, який є сумісним із мобільними і носимими пристроями (wearable devices), передбачає застосування вбудованих камер для узгодження з фізичним простором і накладання інтерактивного AR-контенту, надаючи користувачам доступ до детальної телеметрії, навчальних анімацій або інших цифрових даних, пов'язаних із характеристикою роботи апаратного забезпечення.

Таким чином, задля створення загального середовища AR візуалізації для кожного компонента були розроблені в програмі для твердотілого моделювання Creo Parametric. Vuforia Studio має зчитувати пакетні файли PTC Creo View Structure у вигляді збірок і відображати компоненти за допомогою віджетів. Обрані компоненти підсвічуються за рахунок свого основного кольору, якщо компонент є зовнішнім, та зеленим — якщо внутрішнім, причому візуалізація всіх інших компонентів дефокусується за рахунок зниження непрозорості до 70%. Після розробки візуалізацій файли САД імпортуються до Vuforia. Програмний інтерфейс забезпечує можливість створення спливаючих контейнерів, пов'язаних з компонентами системи через віджети. Робочі дії програмуються для вхідних віджетів, як, наприклад, ізолювання секції відцентрового насосу при активації відповідного віджета.

У підсумку в межах користувацького інтерфейсу були розроблені три меню-панелі:

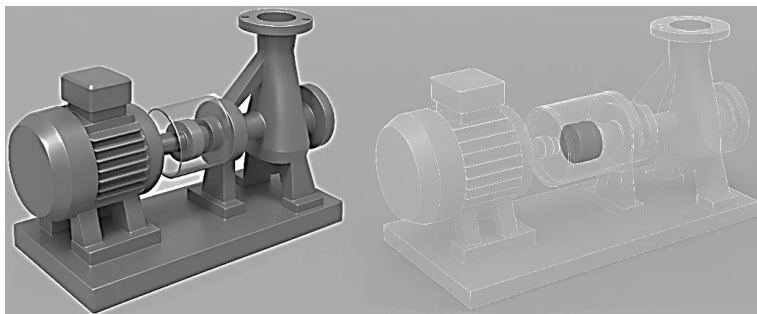
- перша (деталізована візуалізація конкретних частин), яка відображає систему та її внутрішні компоненти з їхніми характеристиками, посилаючись на PDF-специфікації виробника для детальної інформації. Натискання на першу кнопку має відкривати інтерфейс з 4 кнопками, 3 з яких мають відображати компоненти основної тестової установки (колекторний двигун постійного струму, відцентровий насос, каркас конструкції), а 4-а має повертатися у головне меню. Приклад візуалізації з цієї меню-панеллю наведено на рис 3;

- друга (симуляція тестової установки), яка відображає внутрішні компоненти відцентрового насоса та під'єднаної трубопровідної системи під час роботи. Різні швидкості можуть вибиратися для кращої візуалізації внутрішньої поведінки системи та механічного обертання під час руху. Ці швидкості суттєво відрізняються від реальних налаштувань, оскільки мета полягає лише в аналізі динаміки;

- третя (результати вимірювання швидкості обертання) показує підсумки експериментальної симуляції за допомогою графіків та анімацій. Обидва оптичних

тахометри та вібраційний сенсор мають постійно оцінювати робочий стан системи та відображати його у Vuforia View із передбаченими механізмами тривоги під час аномальних процесів у роботі.

Відстеження просторового положення моделі було реалізовано за допомогою завантаження розробленої 3D моделі у Model Target Generator (MTG). Таким чином, користувачі можуть наводити пристрої на конкретній відстані та під конкретним кутом відносно цільового реального об'єкта.



**Рис. 3.** Візуалізація моделі насосної установки в середовищі Vuforia View з детальним відображенням окремих частин зеленим кольором (у цьому випадку муфти вала між насосним валом і валом двигуна)

Для забезпечення віддаленого моніторингу та контролю тестової установки відцентрового насоса за допомогою стандартного браузера було розроблено веб-застосунок із можливістю передачі даних між веб-інтерфейсом і фізичною системою за допомогою Automation Web Programming (AWP), що є структурованим синтаксисом, який дозволяє вбудовувати доступ до змінних програмованого логічного контролера (ПЛК) безпосередньо в HTML-сторінки (Roа-Prada, 2023).

За рахунок застосування вихідних команд AWP, а саме `<!-- AWP_Out_Variable Name='PumpSpeed:CurrentRPM' -->`, здійснюється вилучення даних із DAQ-системи в реальному часі та їх відображення у вебпереглядачі. Подібним чином `<!-- AWP_In_Variable Name='MotorControl:SetVoltage' -->` забезпечує дистанційне налаштування робочих параметрів.

### Висновки

Проведено системно-теоретичне дослідження відцентрової насосної установки, яке базується на поєднанні методів математичного моделювання, експериментальних вимірювань і цифрових технологій візуалізації. Це дало змогу обґрунтувати підходи до відтворення як стаціонарних, так і перехідних процесів у насосній системі. Створений AR-інтерфейс на базі Vuforia Studio дозволив реалістично відобразити конструкцію установки з можливістю акцентування уваги на її внутрішніх елементах для візуалізації деталей, динаміки та результатів вимірів. Просторове відстеження було реалізовано за допомогою Model Target Generator, що забезпечило стабільну прив'язку віртуальної моделі до реального об'єкта, а введення дистанційного моніторингу через веб-інтерфейс надало можливість отримувати дані в реальному часі та контролювати параметри насоса. Отже, поєднання

концепцій цифрового двійника, доповненої реальності із засобами хмарного керування створило стійкий фундамент для вивчення, діагностики та оптимізації роботи насосного обладнання, що в перспективі має високий потенціал інтеграції у відповідні виробничі ланки промислових підприємств.

### Література

Voinea, G.-D., Gîrbacia, F., Duguleană, M., Boboc, R. G., & Gheorghe, C. (2023). Mapping the emergent trends in industrial augmented reality. *Electronics*, 12(7), 1719. <https://doi.org/10.3390/electronics12071719>.

Lamberti, F., Manuri, F., Sanna, A., Paravati, G., Pezzolla, P., & Montuschi, P. (2014). Challenges, opportunities, and future trends of emerging techniques for augmented reality-based maintenance. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, 2(4), 411—421.

Leutert, F., & Schilling, K. (2015). Augmented reality for telemaintenance and inspection in force-sensitive industrial robot applications. *IFAC-PapersOnLine*, 48(10), 153—158.

Flatt, H., Koch, N., Röcker, C., Günter, A., & Jaspermeite, J. (2015, September). A context-aware assistance system for maintenance applications in smart factories based on augmented reality and indoor localization. In *2015 IEEE 20th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)* (1—4). IEEE.

Makris, S., Karagiannis, P., Koukas, S., & Matthaiakis, A. S. (2016). Augmented reality system for operator support in human-robot collaborative assembly. *CIRP Annals*, 65(1), 61—64.

Michalos, G., Karagiannis, P., Makris, S., Tokçalar, Ö., & Chryssoulouris, G. (2016). Augmented reality (AR) applications for supporting human-robot interactive cooperation. *Procedia CIRP*, 41, 370—375.

Deac, G. C., Popa, C. L., Ghinea, M., & Cotet, C. E. (2017). Using augmented reality in smart manufacturing. In *Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium*, 727—732. DAAAM.

Oscar, B.-N., Fernández-Caramés, T. M., Fraga-Lamas, P., & Vilar-Montesinos, M. A. (2018). A practical evaluation of commercial industrial augmented reality systems in an Industry 4.0 shipyard. *IEEE Access*, 6, 8201—8218. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2808320>.

Aschenbrenner, D., Leutert, F., Çençen, A., Verlinden, J., Schilling, K., Latoschik, M., & Lukosch, S. (2019). Comparing human factors for augmented reality supported single-user and collaborative repair operations of industrial robots. *Frontiers in Robotics and AI*, 6, 37. <https://doi.org/10.3389/frobt.2019.00037>.

Garcia, C. A., Naranjo, J. E., Ortiz, A., & Garcia, M. V. (2019). An approach of virtual reality environment for technicians training in the upstream sector. In *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 748—753. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.08.222>.

Cheng, L. M., Amerudin, S., & Yusof, Z. M. (2019). Development of augmented reality pipeline visualiser (ARPV) application for visualising underground water pipeline. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-4/W16, 203—210. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W16-203-2019>.

Choi, S., & Park, J.-S. (2021). Development of augmented reality system for productivity enhancement in offshore plant construction. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(2), 209. <https://doi.org/10.3390/jmse9020209>.

Chen, B.-Q., Videiro, P. M., & Guedes Soares, C. (2022). Opportunities and challenges to develop digital twins for subsea pipelines. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(6), 739. <https://doi.org/10.3390/jmse10060739>.

Inoue, K., Ogake, S., Kobayashi, K., Tomura, T., Mitsui, S., Satake, T., & Igo, N. (2023). An AR application for the efficient construction of water pipes buried underground. *Electronics*, 12(12), 2634. <https://doi.org/10.3390/electronics12122634>.

Plakas, G. (2020). Augmented reality in manufacturing and logistics: Lessons learnt from a real-life industrial application. *Procedia Manufacturing*, 45, 112—119. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.227>.

Goppelt-Schneider, F., Hieninger, T., & Schmidt-Vollus, R. (2025). Modeling centrifugal pump

systems from a system-theoretical point of view. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 138, 3747—3763. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-15755-w>.

Pitzalis, R. F., Giordano, A., Di Spigno, A., Cowell, A., Niculita, O., & Berselli, G. (2025). Application of augmented reality-based digital twin approaches: A case study to industrial equipment. *Flexible Services and Manufacturing Journal*. <https://doi.org/10.1007/s10696-025-09605-w>.

Perno, M., Hvam, L., & Haug, A. (2025). Uses and challenges of digital twins-based augmented reality in operator training and data visualization in process manufacturing lines. *Flexible Services and Manufacturing Journal*. <https://doi.org/10.1007/s10696-025-09605-w>.

SphereGen. (2023, October 3). Using CAD files to build augmented reality applications. SphereGen. <https://www.spheregen.com/using-cad-files-to-build-augmented-reality-applications/>.

Roa-Prada, S. (2023). Cloud management of pumping systems using digital twins supported by augmented reality. In *IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1002357>.

## MANUFACTURING OPERATIONS MANAGEMENT ONTOLOGIES FOR BREWING INDUSTRY

**M. Romanov**

*National University of Food Technologies*

---

**Key words:**

*Ontologies  
Manufacturing  
Operations Management  
(MOM)  
Brewing Industry, Digital  
Twin  
Industry 4.0  
Industry 5.0  
Semantic Interoperability  
Knowledge Graphs  
Data Integration  
Craft Beer*

---

**Article history:**

Received 12.09.2025  
Received in revised form  
29.09.2025  
Accepted 17.10.2025

---

**Corresponding author:**

M. Romanov

**E-mail:**

maksim.a.romanov@gmail.  
com

**Citation:** Романов М. О.  
(2025). Онтології керу-  
вання виробничими опе-  
раціями у пивоварній про-  
мисловості. *Наукові праці  
НУХТ*, 31(5), 44—62.  
DOI: 10.24263/2225-2924-  
2025-31-5-6

**ABSTRACT**

---

This study delves into the convergence of Industry 4.0 and Industry 5.0 paradigms, specifically examining their impact on the craft beer industry. The core objective was to elucidate how these industrial frameworks facilitate the evolution of breweries towards sophisticated, service-oriented, and highly digitalized business models. A fundamental premise of this transition is the implementation of digital twins, which serve as virtual representations of physical brewing entities. Several organizations, including industry associations and research centers, currently provide methodologies, best practices, and direct services aimed at facilitating this integration process. The European research landscape is particularly active in this domain, with numerous ongoing projects dedicated to the development of industrial ontologies. These initiatives yield a continuous stream of proposals emanating from a diverse array of research institutions across the continent. In parallel with the broader academic and industrial efforts to formulate generalized, universal ontologies applicable to common industrial domains, there exists a distinct body of specific data models tailored for beer and brewing operations. These specialized models originate from various sources, including proprietary software solutions, dedicated service providers, and specialized research institutions focused on food science and brewing technology. A third source for informing this ontological review resides in the industry standards that offer manufacturing models, applicable to the broader food industry. Implementation of an ontological model within a real-world brewing company presents a significant challenge, undertaking necessitates the development of a set of mappings. These mappings must bridge the semantic gaps between standardized industry models and the de facto ontological model embedded within the enterprise's existing information system infrastructure. The structure and characteristics of these essential mappings constitute the objectives of this study.

---

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

---

## ОНТОЛОГІЇ КЕРУВАННЯ ВИРОБНИЧИМИ ОПЕРАЦІЯМИ У ПИВОВАРНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

М. О. Романов

Національний університет харчових технологій

Це дослідження заглиблюється у конвергенцію парадигм Індустрії 4.0 та Індустрії 5.0, зокрема вивчення їхнього впливу на крафтову пивоварну промисловість. Основною метою є з'ясування того, як ці промислові рамки сприяють еволюції пивоварень до складних, сервісно-орієнтованих і цифровізованих бізнес-моделей. Передумовою цього переходу є впровадження цифрових двійників, які слугують віртуальними представленнями фізичних пивоварних об'єктів. Кілька організацій, включаючи галузеві асоціації та дослідницькі центри, наразі надають методології, найкращі практики та прямі послуги, спрямовані на полегшення цього процесу інтеграції. Європейський дослідницький ландшафт є особливо активним у цій галузі, з численними поточними проєктами, присвяченими розробці промислових онтологій. Ініціативи створюють безперервний потік пропозицій, що надходять від різноманітних дослідницьких установ по всьому континенту. Паралельно з академічними та промисловими зусиллями щодо формулювання онтологій, застосованих до промислових доменів, існує окремий корпус моделей даних, розроблених для пива та пивоварних операцій. Ці спеціалізовані моделі походять з різних джерел, включаючи власні програмні рішення, спеціалізованих постачальників послуг і спеціалізовані дослідницькі установи, що зосереджені на харчовій науці та пивоварних технологіях. Третім джерелом для інформування цього онтологічного огляду є галузеві стандарти, які пропонують виробничі моделі, застосовні до ширшої харчової промисловості. Впровадження онтологічної моделі в реальній пивоварній компанії є викликом, що вимагає розробки набору відображень, які повинні долати семантичні розриви між стандартизованими галузевими моделями та фактичною онтологічною моделлю, вбудованою в існуючу інфраструктуру інформаційної системи підприємства. Структура та характеристики цих важливих відображень становлять цілі пропонованого дослідження.

**Ключові слова:** онтології, управління виробничими операціями (МОМ), пивоварна промисловість, цифровий двійник, індустрія 4.0, індустрія 5.0, семантична сумісність, графі знань.

**Formulation of the problem:** Industry 4.0 technologies affect the growing craft beer sector of the brewing industry with the service-oriented transformation of information and control systems (Alfaro-Viquez et al., 2025). Most of the small breweries, and also homebrewers, are not able to invest in on-premises standalone IT and automation systems and now have the option to use cheap and easily accessible IOT or SaaS solutions. This trend is present at all levels of automation starting from sensors, which deliver the measurement-as-service approach, keeping all tasks about data storing and visualization as a part of the product and provided through appropriate web services. More complex brewing equipment also comes with built-in automation, data gathering, supervisory

control, recipe management, and other IT features provided together with equipment as additional web services. Services which simplify operations on higher level of automation, like production planning, quality, inventory management become also commonly accessible (Monteiro, & Barata, 2025). Sales and delivery, procurement, marketing are already fully digitalized and even transformed into new ways of acting in digital environment. This brings small local brewery into a situation where it must integrate all the subsystems together with an enterprise specific viewpoint on business processes and major manufacturing flow. It is expected to have unified protocols and interfaces on communication layers, but on application layer data structures, their relations and meaning, are fundamentally different. The problem is to connect all subsystems together in an individual way for specific brewery. And one of possible solutions is the integration platform — enterprise data bus, which is responsible for data transfer between systems by serving digital twins of the entities.

**Analysis of recent research and publications:** Ontologies in Manufacturing and Brewing.

While ontologies and knowledge graphs are increasingly prevalent in manufacturing, the brewing industry remains comparatively underrepresented (Valenčič et al., 2025). Existing ontology initiatives either focus on highly specific domains or are too high-level for the intricate brewing process (Thornton et al., 2024). Consequently, realizing a digital twin for brewing necessitates a composite ontological approach, integrating multiple ontologies to fulfill the diverse functional requirements of a comprehensive integration platform.

The initial phase of this review involved a comprehensive search executed on Google Scholar in June 2025, utilizing the singular keyword "ontology" (Lee et al., 2025; Vendetti et al., 2025). As of June 17, 2025, this specific temporal query for the year 2025 yielded 39,700 results. A preliminary examination of these results indicated a broad array of applications spanning numerous disciplines, including but not limited to biology, medicine, engineering, management, and cultural studies. Extending the temporal scope of the search to encompass publications since 2024 yielded approximately 54,100 results, while a further expansion to include material since 2023 produced 106,000 results. This escalating volume of scholarly outputs, comprising research papers, books, reviews, and conference proceedings, unequivocally underscores the profound and sustained academic interest in the field of ontologies.

Subsequently, to narrow the investigative focus, the search query was refined to "ontology in manufacturing". This targeted search returned 4,280 documents specifically for June 2025 and a cumulative total of 16,900 documents published since 2024. Although an initial assessment of these results suggested an enhanced relevance to the overarching scope of the current topic, a notable paucity of use cases directly pertaining to brewing persisted as a significant limitation. Critically, this refined search also revealed the presence of several systematic literature reviews within the retrieved corpus, which provided valuable insights into common methodologies and challenges.

Further attempts to refine the search methodology involved employing the query "Ontology for food industry," which generated 3,190 results for June 2025 and 16,800 results since 2024. However, a preliminary evaluation of these documents indicated a comparatively lower degree of direct applicability to specific food production processes.

Pursuing an even greater level of specificity, the query "Ontology for brewing" was executed, yielding 712 results for June 2025. A substantial portion of these results, however, proved to be unrelated to brewery automation, and the pertinent findings were predominantly characterized by a highly specialized or narrowly defined research focus (Gribova et al., 2025). Consequently, "ontology in manufacturing" was deemed the most appropriate query, enabling broad applicability and extrapolation of principles to brewing.

A pivotal text directly relevant to this research is Abonyi, Nagy, and Ruppert's "Ontology-Based Development of Industry 4.0 and 5.0 Solutions for Smart Manufacturing and Production". This volume comprehensively treats ontology application in advanced manufacturing paradigms, providing theoretical principles and concrete use cases. Its value lies in bridging abstract concepts with practical industrial contexts (Khokhlovskiy et al., 2025). However, a notable limitation is its lack of specific food industry applications, highlighting a research gap that necessitates further adaptation for the brewing domain (Šormaz et al., 2024).

Other significant literature, though broader in scope, complements this core text. Resources on general ontology and knowledge graph construction provide foundational understanding of semantic technologies (Wu et al., 2025). This includes integrating semantic technologies with cloud computing, IoT, big data analytics, and sensor networks, demonstrating their utility in complex data processing (Stavropoulou et al., 2024). "Enterprise Ontology: A Human-Centric Approach to Understanding the Essence of Organization" further elucidates how ontologies can provide insights into organizational transformations by integrating business processes, data, and rules (Oyekan et al., 2025). These works collectively establish the theoretical and practical groundwork for leveraging semantic technologies and ontological principles within diverse enterprise environments, including advanced manufacturing.

The application context for ontology-based solutions in manufacturing is extensively covered by literature focused on Industry 4.0 and smart manufacturing systems. Books like "Smart Manufacturing Technologies for Industry 4.0: Integration, Benefits, and Operational Activities" address challenges and solutions for integrating digital technologies within manufacturing. These texts discuss various smart technologies, including organizational transformation, autonomous robotics, digital twins, augmented reality, and cyber-physical systems integration, often with real-time case studies. "Industry 4.0: The Future of Smart Manufacturing and Digital Transformation" explores the convergence of automation, AI, IoT, big data, and robotics in smart factories, delving into machine learning, cloud computing, predictive maintenance, and blockchain applications — all areas where semantic enrichment and ontological modeling significantly enhance intelligence (Ma et al., 2025). Similarly, "Smart and Sustainable Manufacturing Systems for Industry 4.0" discusses centralized and decentralized production using simulation-based methods, IoT/IIoT concepts, and prognostics for system health monitoring (Ranpara, 2025). "Introduction to Industrial Internet of Things and Industry 4.0" provides a comprehensive overview of IIoT, sensors, data transmission protocols, evolving business models, and enabling technologies, elucidating the data landscape for ontology-based systems. Collectively, these works define the technological environment for Industry 4.0 and 5.0 solutions, highlighting complex data and process challenges addressed by semantic technologies.

Beyond foundational semantic principles and their primary application domains, related literature encompasses advanced data techniques and specific manufacturing system modeling. "Graph Machine Learning: Take Graph Data to the Next Level" is pertinent, given the emphasis on graph-based optimization for networked data and leveraging relationships between entities for predictive modeling, directly applicable to ontologies and knowledge graphs. "Industrial Internet of Things: An Introduction" examines IoT-machine learning convergence in industrial transformation, covering foundational principles, algorithms, and smart production. Broader manufacturing systems literature, such as "Modeling Manufacturing Systems: From Aggregate Planning to Real-Time Control," offers insights into production planning and control, where knowledge representation is crucial. "Industry 4.0 for Manufacturing Systems: Concepts, Technologies, and Applications" highlights intelligent decision-making, digital twin implementations, and quality control tools, benefiting from semantic integration. Lastly, academic research papers detail the state-of-the-art in ontology-based approaches for manufacturing, including reviews of manufacturing ontologies, discussions on semantic AI for smart manufacturing automation, and systematic reviews on ontologies' role in digital twins for knowledge representation and interoperability. Research on semantic web approaches for fault-tolerant autonomous manufacturing further demonstrates the value of semantic technologies in integrating heterogeneous information sources.

A comprehensive analysis of scientific journals focusing on ontology applications in manufacturing reveals a dynamic, interdisciplinary research landscape (Sala et al., 2025). Key publication venues, including journals on advanced manufacturing technologies, robotics, AI, and enterprise information management, consistently underscore the pivotal role of ontologies in enabling semantic interoperability, enhancing knowledge representation, facilitating digital twin implementations, advancing smart manufacturing, and integrating with AI technologies. The consistent high indexing of these journals in major academic databases like Web of Science and Scopus, coupled with their regular publication frequencies, attests to the maturity and active nature of this research community (Magas et al., 2024).

Prominent journals include the International Journal of Advanced Manufacturing Technology, covering advanced manufacturing, Industry 4.0, smart manufacturing, and AI in manufacturing. The Journal of Manufacturing Systems focuses on fundamental and applied research at the manufacturing systems level, emphasizing smart and cloud manufacturing (Stavropoulou et al., 2024). Robotics and Computer-Integrated Manufacturing addresses application research for improved robotics and manufacturing technologies (Pfaff-Kastner et al., 2024). The Journal of Intelligent Manufacturing is dedicated to AI application in manufacturing. AI EDAM — Artificial Intelligence for Engineering Design Analysis and Manufacturing publishes articles on AI theory and applications in engineering. Computers in Industry focuses on ICT application in industrial environments to enhance efficiency. IEEE Transactions on Industrial Informatics covers ICT applications to industrial systems, processes, and applications. The Journal of Enterprise Information Management focuses on strategic and managerial aspects of information management (Vendetti et al., 2025). Knowledge-Based Systems focuses on the design, development, and application of knowledge-based and intelligent systems. The International Journal of Computer Integrated Manufacturing reports new research in CIM. The

Journal of Computing and Information Science in Engineering publishes articles on algorithms, computational methods, and computer-interpretable representations. Finally, the International Journal of Computer Information Systems and Industrial Management Applications focuses on computer information systems and their industrial applications, highlighting ontologies for knowledge structure and standardized data representations.

Leading manufacturing journals are increasingly interdisciplinary, reflecting the convergence of traditional engineering with computer science and AI. Top-ranked journals consistently feature "smart manufacturing," "Industry 4.0," "digital twin," "cyber-physical systems," "AI," "machine learning," and "big data analytics". This interdisciplinary nature demands expertise from both traditional manufacturing engineering and advanced computational and information sciences. Journals with a strong computer science and AI focus, such as IEEE Transactions on Industrial Informatics and Knowledge-Based Systems, are indispensable for advancing ontologies in manufacturing, even if "manufacturing" is not their primary category.

Research in manufacturing ontologies is characterized by several interconnected thematic clusters: ontology-driven knowledge representation and intelligent systems, semantic interoperability, digital twins and simulation, smart manufacturing and Industry 4.0 applications, knowledge graphs, AI and machine learning integration, and the Industrial Ontology Foundry (IOF). Ontologies are seen as the most efficient means to resolve complex semantic interoperability issues, advancing simulation capabilities, and enabling smart manufacturing systems through enhanced connectivity. Knowledge graph technology is recognized for transforming raw data into actionable knowledge in industrial settings. Ontologies complement AI and machine learning by providing a semantic layer for visual validation, natural language interaction, and anomaly detection. Significant efforts, particularly by the IOF, are underway to standardize ontologies for industrial applications, demonstrating a convergence of data, AI, and semantics for next-generation manufacturing.

Applied Ontology, under the International Association for Ontology and its Applications (IAOA), is highly pertinent to manufacturing ontologies (Alfaro-Viquez et al., 2025). Its focus on information content and the practical application of ontologies and conceptual modeling is crucial for managing complex information flows in manufacturing. The journal serves as a forum for standardized product descriptions, process formalization, supply chain representation, and semantic integration. Its coverage of ontology management tools is relevant for maintaining, versioning, and aligning ontologies in dynamic manufacturing systems. The journal's interdisciplinary approach fosters dialogue among knowledge engineering, information systems modeling, and AI fields, ensuring contributions are theoretically sound and practically relevant (Ma et al., 2025).

The foundational open standard for ontologies is ISO/IEC 21838-1:2021 (Information technology — Top-level ontologies (TLO)), comprising Part 1 (Requirements) and Part 2 (Basic Formal Ontology (BFO)). This standard provides an overarching framework for structuring knowledge representation, serving as a fundamental basis for numerous formal ontologies in manufacturing. Its adherence to BFO ensures consistency and semantic interoperability, defining entities, relations, and axioms for robust knowledge bases in industrial systems. TLOs facilitate semantic interoperability between disparate systems by grounding domain-specific ontologies in a shared, philosophically coherent

foundation, enabling effective decision-making and process optimization (Gribova et al., 2025). This standard also supports the accelerated development of ontology-based applications for data validation, reasoning, and knowledge discovery.

Building upon this, the Industrial Ontologies Foundry (IOF) group, operating within the OAGi organization (ISO/TC 154), develops a comprehensive suite of ontologies for industrial applications, starting with The IOF Core Ontology (released Jan 1, 2023). This initiative addresses the critical need for standardized semantic models to facilitate data integration, knowledge sharing, and interoperability across industrial sectors. The IOF Core Ontology provides a foundational vocabulary and relationships, extendable to specific domains like supply chain and quality control (Del Nostro et al., 2025). Its development is guided by modularity, reusability, and extensibility, ensuring adaptability to evolving industry needs (Wei & Li, 2025). Collaborative efforts with industry stakeholders ensure alignment with standards like ISO 15926 and IEC 62264. The IOF's goal is a comprehensive ecosystem of industrial ontologies to unlock data potential, improve operational efficiency, and drive innovation, supporting semantic search, data integration, decision support, and process automation.

Other crucial standards shaping manufacturing ontologies include ISO 15926 (Part 14) for engineering design, coherent with IEC 81346-1:2022 (Khokhlovskiy et al., 2025). IEC/ISO 62264 (enterprise IT and control systems) defines hierarchical levels for factory functionalities, vital for domain ontologies (e. g., "Equipment") (Gribova et al., 2025; Khokhlovskiy et al., 2025). ISO 22400-2 standardizes KPIs for MOM, referencing DIN EN 62264-2 and transformed into OWL 2 ontology design patterns (Ranpara, 2025). ISA-95 serves as a blueprint for modular ontologies describing product, process, and resource information, enhancing knowledge representation via semantic rules (Khokhlovskiy et al., 2025). These standards enable standardized, interoperable ontologies for enhanced efficiency and decision-making, ensuring alignment with industry best practices.

Furthermore, many MOM ontologies are implicitly defined within standards that delineate data models or fundamental concepts relevant to digitalization. ISA 95 and ISA 88, for instance, define widely adopted data models for MOM and batch production processes, respectively. The B2MML language, created from these standards, is expressed as an XSD schema, allowing for systematic conversion to ontologies via predefined rulesets (Ranpara, 2025). AutomationML, an XML format with an XSD schema, also facilitates straightforward conversion to OWL2. These standards, often starting points for MOM system design, establish direct correspondence between standard-based and application-specific concepts. The "Digital twin framework for manufacturing" provides a reference architecture and functional model, allowing data ontology alignment as a specific function.

The European food industry is in continuous evolution, driven by initiatives emphasizing sustainability, innovation, and resilience. EU-funded projects, particularly under Horizon Europe, are pivotal. The Delicious project (launched Dec 2024) aims to revolutionize plant-based dairy through microbial fermentation, reducing environmental impact. I4CE, a European agri-food partnership, focuses on techno-functional ingredients and valorizing side streams.

Beyond food-specific projects, Onto-DESIDE (Ontology-based Decentralized Sharing of Industry Data in the European Circular Economy) addresses challenges in data sharing and understanding. The OntoCommons project (Nov 2020—Oct 2023) aimed to standardize data documentation across materials and manufacturing domains by developing an Ontology Commons EcoSystem (OCES), harmonizing data documentation for Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable (FAIR) data. These projects leverage ontologies for digital twin creation in manufacturing.

The FoodOn project establishes a robust connection between digitalized manufacturing and the food industry (Melesse et al., 2024). FoodOn, a comprehensive open-source ontology developed within the OBO Foundry, standardizes food-related entities from raw products to processed items (Del Nostro et al., 2025). It facilitates consistent naming conventions and classification, enhancing data interoperability across diverse food sectors. FoodOn provides a harmonized framework for improved data sharing and interoperability across the European food system, supporting sustainability and public health. Within Europe, FoodOn is integrated into initiatives like COMFOCUS, which recommends its reuse for standardizing food-related data in consumer behavior studies (Marketakis et al., 2025). The Periodic Table of Food Initiative (PTFI), a Rockefeller-funded web portal, also uses FoodOn to describe food samples, contributing to standardized food data representation. The Digital Twin on Smart Manufacturing project further bridges educational institutions and industrial practice, equipping technicians with skills for advanced manufacturing challenges.

Considering Onto Commons (Europe) and OAGi (USA), these are major stakeholders in manufacturing ontologies. While the International Association for Ontology and its Applications (IAOA) has a broader mission, it coordinates ontology events and hosts FOMI workshops with an industrial perspective. A systematic study of these three organizations provides a comprehensive entry point into the field. The National Center for Ontological Research (NCOR), established in Buffalo in 2005, advances ontological research quality, provides tools for evaluation, and coordinates research. NCOR offers coordination, infrastructure, review services, funding support, and specialized consulting for ontology projects across diverse fields like defense, healthcare, and biomedical sciences.

The "Digital Twin on Smart Manufacturing" project, strategically conceived to cultivate educational resources and standardize competencies pertinent to digital twin implementation within the broader manufacturing sector, can be robustly aligned with the imperative of establishing a comprehensive digital twin ontology specifically for a craft brewery (Ortiz et al., 2024). First, this alignment fundamentally requires adopting the project's established ontology foundations, utilizing structured frameworks to define core brewery entities — such as fermentation tanks and brewing recipes — within a coherent ontology schema, while implementing semantic interoperability standards for consistent data modeling and seamless information exchange, encompassing operational data like temperature logs and batch yields. Second, integrating brewery-specific use cases is paramount; this involves developing a Product Digital Twin to model beer recipes with predictive functionalities from real-time sensor data, alongside a comprehensive Plant Digital Twin. This latter entity would serve as a virtual replica of the brewery layout, incorporating real-time data on equipment status, supply chain logistics, and resource

consumption metrics. Third, leveraging the project's extensive resources is invaluable for practical brewery implementation, encompassing adaptation of modular e-learning for technician training in ontology design and maintenance, and direct application of the project's ontology-based modeling pipeline to automate critical deployment steps, including data schema standardization and advanced analytics for predictive maintenance (Ma et al., 2025). Fourth, empirical validation via targeted microbrewery case studies provides crucial practical insights, enabling rigorous testing of ontology designs for batch scheduling and "what-if" scenario simulations, with optimized models potentially undergoing assessment in the project's skills competitions. Finally, ensuring congruence with overarching manufacturing digitization goals entails aligning the brewery ontology with the project's Digital Twin Skills Index for compatibility certification, designing scalable and modular ontologies supporting both small-batch flexibility and multi-plant replication, and embedding Green Transition principles for resource waste reduction. By systematically embedding brewery ontology development within the project's pedagogical and technical frameworks, the realization of interoperable and highly efficient digital twin solutions for craft brewing becomes achievable, concurrently contributing to the broader strategic objectives of manufacturing digitization by bridging academic rigor with niche industrial needs.

The landscape of ontology conferences and workshops encompasses both broad, general events and highly specialized gatherings focusing on specific domains like manufacturing and food. For a comprehensive understanding of ontology with relevance to manufacturing and food, the International Conference on Formal Ontology in Information Systems (FOIS) is a pivotal venue. As the flagship conference of the IAOA, FOIS covers a wide spectrum of topics from foundational principles to practical applications, often incorporating workshops directly addressing manufacturing and food. The co-location of FOIS with the Joint Ontology Workshops (JOWO) enhances its relevance, providing forums for in-depth discussions on domain-specific applications. For instance, JOWO 2025 included the Integrated Food Ontology Workshop (IFOW) and the International Workshop on Formal Ontologies Meet Industry (FOMI).

Complementing FOIS, the International Semantic Web Conference (ISWC) is a leading international forum for the Semantic Web and Linked Data community, discussing advancements in semantic technologies and diverse applications. Given the increasing adoption of semantic web technologies for data integration and knowledge sharing across industries, ISWC frequently includes research relevant to manufacturing and food, such as workshops on knowledge base construction and ontology matching. Similarly, the International Conference on Knowledge Representation and Reasoning (KR) is a major AI conference focusing on theoretical and practical aspects of knowledge representation and reasoning. KR's broad scope encompasses ontologies used in various domains, including manufacturing and food, particularly for automated planning, robotics, and natural language processing. The International Conference on Semantic Systems (SEMANTiCS) serves as a key meeting point for professionals interested in Linked Data and Semantic AI, aiming to bridge academic research and industrial applications.

For researchers focused on ontologies in manufacturing, the International Workshop on Formal Ontologies Meet Industry (FOMI) is a preeminent event. FOMI, a specialized workshop within JOWO and a flagship meeting of the IAOA Industry and Standards

Technical Committee (ISTC), provides a dedicated international forum for academic and industrial practitioners to discuss methods, theoretical frameworks, tools, and applications of formal ontologies in industrial contexts. Its objectives include collecting experiences, sharing lessons learned, and presenting novel results in ontology implementation for complex industrial settings. The Industrial Ontology Foundry (IOF) is another crucial entity, a collaborative initiative dedicated to co-creating open ontologies for manufacturing and engineering, advancing data interoperability. Under the Open Applications Group (OAGi), IOF organizes meetings focused on developing, evolving, and testing domain ontologies in production planning, supply chain, maintenance, and product-service systems. The IOF community comprises experts from industry, academia, and research, working towards robust reference ontologies based on BFO. The National Institute for Innovation in Manufacturing Biopharmaceuticals (NIIMBL) also contributes, with a Big Data Program that develops and adopts data-driven innovation and standards, including a biopharmaceutical manufacturing ontology, regularly organizing meetings and workshops (Alfaro-Viquez et al., 2025).

In the food industry, the Integrated Food Ontology Workshop (IFOW), a specialized workshop within JOWO and FOIS, is highly relevant for ontology application in food systems. IFOW explores philosophical discussions of food semantics, technical aspects of ontology curation, and sociotechnical integration across the food supply chain. It fosters development of a stable, open-source vocabulary for describing food system behavior. The IC-FOODS Conferences, organized by an entity dedicated to building a semantic platform for the Internet of Food (IoF), focus on advancing Food Systems, Food, and Health Informatics through ontology development and application. The International Conference on Biomedical Ontology (ICBO), while primarily biomedical, has significant conceptual overlap with food and nutrition, previously featuring workshops on nutrition ontologies and food-related diseases.

The FOMI workshops (e. g., 2024 in Enschede, 2022 in Tarbes) consistently demonstrate a growing trend towards the practical application of formal ontologies in addressing complex industrial challenges. These workshops serve as crucial platforms for dynamic exchange and collaboration between academic researchers and industry practitioners, fostering development of theoretically sound and practically relevant ontologies. Their emphasis on semantic interoperability, data integration, and knowledge representation highlights ontologies' pivotal role in enabling efficient, effective, and insightful decision-making across industrial sectors. The published proceedings serve as invaluable resources, providing granular insights into research findings, methodologies, and tools. The workshops underscore the paramount importance of sustained academia-industry collaboration to advance ontology development and its contribution to contemporary industrial practices, with a strong focus on content standards for enhanced interoperability.

**The purpose of the research:** The anticipated outcomes encompass a comprehensive report detailing quantitatively assessed discrepancies and misalignments, accompanied by their systematic taxonomy and diverse illustrative cases. Notably, for the specific application within the brewing domain, a hierarchical framework of manufacturing ontologies will be proposed as a significant result. These findings are poised to furnish a critical foundation for accurately estimating the requisite work packages essential for the comprehensive implementation of a full digital twin platform (Ma et al., 2024).

**Materials and Methods:** To conduct a comprehensive review of Manufacturing Operations Management (MOM) ontologies applicable to the brewing industry, a multi-faceted methodological approach was employed (Abdurrahman, & Ferrari, 2025). This approach extended beyond a conventional literature search, encompassing a broader spectrum of resources to ensure a holistic and contextually relevant analysis (Ghorbani, & Messner, 2025). Initially, a systematic search of academic databases and digital libraries was undertaken to identify relevant research articles, conference proceedings, and technical reports focusing on MOM ontologies, semantic modeling in manufacturing, and applications within the food and beverage sector, particularly brewing. Complementing this, existing review articles and surveys on ontologies for manufacturing, supply chain management, and related domains were scrutinized to extract established methodologies, identify prevalent ontology design patterns, and gain insights into the challenges and opportunities in the field (Magas et al., 2024).

The review also incorporated a study of foundational texts and scholarly works on ontology engineering, knowledge representation, and semantic technologies to establish a theoretical grounding for the analysis. Relevant ontology-related standards and best practices, such as those defined by the World Wide Web Consortium (W3C) and the Object Management Group (OMG), were examined to assess the compliance and interoperability of existing MOM ontologies. Furthermore, a review of relevant European projects and initiatives in the domain of smart manufacturing, industrial automation, and digital supply chains was conducted to identify potential use cases, practical implementations, and emerging trends in the application of ontologies within the brewing industry (Stavropoulou et al., 2024). This included an overview of relevant organizations and consortia involved in the development and standardization of ontologies for manufacturing, such as the National Institute of Standards and Technology (NIST) and the International Society of Automation (ISA) (Latsou et al., 2024). Finally, to capture the latest advancements and ongoing research efforts, major scientific conferences and workshops in the fields of ontology engineering, knowledge management, and industrial informatics were surveyed, with a focus on presentations and publications related to MOM ontologies and their applications in the manufacturing sector. This comprehensive approach ensures a thorough and well-informed review of the current state-of-the-art in MOM ontologies for the brewing industry (Magas et al., 2024).

**Results and discussion:** Bridging Gaps and Future Directions.

The preceding literature review demonstrates significant progress in applying ontologies within manufacturing, particularly concerning Industry 4.0 and 5.0 paradigms. Upon the construction of an integration platform, or data bus, for interconnecting disparate brewery subsystems, we possess a digital twin reference architecture specifically designed for manufacturing, complemented by a suite of aligned ontologies for the digital representation of observable manufacturing elements. This synergistic combination, when applied to the specific case of beer brewing, confers the capacity to theoretically model the brewing enterprise information management system. Subsequently, this theoretical model can be empirically verified through the alignment or incorporation of existing brewing-related software subsystems into the model platform. The process of connecting existing systems to the platform will facilitate the identification of conceptual gaps and semantic misalignments between the model and real-world applications.

Ontology development generally adheres to a consistent hierarchical approach, wherein a Top-Level Ontology is initially defined (e. g., BFO), refined by a more concrete Mid-Level Ontology (e. g., IOF Core, CCO), followed by specific Domain Level Ontologies. Standard-based ontologies should primarily be incorporated as Domain Level Ontologies, typically necessitating mapping to Mid-Level Ontologies, though this is context-dependent. For instance, most Manufacturing Execution System (MES)/Manufacturing Operations Management (MOM) systems support core concepts defined within ISA 95. While application ontologies may bear names identical to ISA 95 concepts, their internal structure, properties, and relations often differ, constituting a strict layering case where an application ontology is implemented on a domain ontology (Gribova et al., 2025). A deeper investigation into ISA 95's comprehensive recommendations would position its model as an application layer ontology (Latsou et al., 2024; Pfaff-Kastner et al., 2024). The B2MML model, a data interchange format, also represents an application-level ontology, as does the OPC-UA ISA95 companion specification. Thus, a clear distinction is crucial between standard-based ontologies (standardizing concepts) and technology specification ontologies (implementing specific technologies), with ISA95 encompassing both.

The Basic Formal Ontology (BFO) is a meticulously designed top-level ontology for organizing knowledge across diverse domains, facilitating interoperability by offering universally applicable categories. It's used extensively in biomedical research, data integration, and information systems, organized into "continuants" (persisting entities) and "occurents" (dynamic events). BFO employs a minimal set of fundamental categories (objects, processes, functions, roles, qualities) and defines relations like "part-of," ensuring suitability for automated reasoning due to its formal and logical structure. It's simple, general, and modular design allows seamless integration and extension with domain-specific ontologies, ensuring consistency with the top-level structure. In essence, BFO provides a robust foundation for systematically organizing knowledge, ensuring consistency and promoting interoperability across disparate disciplines.

The Industrial Ontologies Foundry (IOF) Core Ontology functions as a pivotal mid-level ontology for digital manufacturing, fostering semantic interoperability. Positioned between top-level and domain-specific ontologies, it establishes a common understanding of fundamental manufacturing terms, ensuring coherence across the IOF ontology suite and mitigating data model disparities. Grounded in BFO, IOF Core inherits foundational categories, promoting logical consistency. Its development addresses data and information silos by providing a shared semantic framework for disparate systems to exchange interpretable information. IOF Core unifies ubiquitous terms (e. g., process, material, product, device) as building blocks for more specific industry terms, promoting reusability and extensibility. The overarching goal is seamless cross-system data integration, enabling real-time decision-making and operational efficiency through a connected manufacturing ecosystem. The IOF Core's modular design ensures adaptability, and its formalization in OWL with first-order logic principles enables automated reasoning and knowledge discovery. Its development involves expert review, ensuring consensus and real-world validation. The IOF, as a community-driven initiative, fosters collaboration to advance data interoperability, acting as a "semantic backbone" for industrial data. Similarly, the Common Core Ontologies (CCO) are a suite of eleven mid-level ontologies

extending BFO, containing generic terms common across datasets (e. g., person, facility, date). CCO is under IEEE evaluation as a standard, and while not infinitely expandable for domain-specific content, it encourages users to create and publish their own domain extensions.

An advanced ontological modeling approach for biomanufacturing leverages BFO and IOF Core to represent process knowledge, control models, and executions. This approach empowers humans and systems to manage process complexity. A novel Counterpart Relation (CR) pattern is introduced to streamline connections between digital artifacts (plans, designs) and physical counterparts (processes), crucial for managing diverse digital representations across an entity's lifecycle. The CR approach is scalable for navigating multifaceted stages. A fed-batch bioreactor process verification use case, comparing planned versus actual production, validates this framework. Competency Questions (CQs) are pivotal for ontology development and validation, demonstrated via SPARQL queries on a knowledge graph. Empirical results visualize duration differences and compliance levels. This research concludes that integrating ontological models via the CR approach offers a robust method for comprehensively capturing biomanufacturing processes, systematically mapping digital planning to physical execution. The framework, built on IOF Core, enables unambiguous reasoning about process compliance, improving data integration, interoperability, and analytical capabilities, with potential extension to other process analyses. Its significance extends beyond biomanufacturing; the principles are adaptable to industries like craft brewing, where precise control and adherence to recipes are paramount for quality and efficiency. The use of BFO and IOF Core provides a standardized foundation for knowledge representation, fostering data exchange and collaboration in both biomanufacturing and brewing.

In practical ontology development, reusing existing ontological structures is prevalent, with explicit references to service ontologies like OWL Time and units of measure. Standard-based applications inherently possess their own application ontologies that extend standard-based ones, as exemplified by the OPC 10030: ISA-95 Common Object Model Companion Specification. Interfaces, defining common properties for shared behavior (e. g., NamedEntity), also extend standard-based ontologies (Khokhlovskiy et al., 2025). Brewing subsystems often possess inherent ontologies, predominantly expressed through their functional architecture. More complex systems can export their data models (XSD, JSON schema, or OWL2), while simpler ones may require manual creation or XSD-to-OWL2 conversion using heuristic rules (e. g., XSD complex objects to OWL2 classes, attributes to data properties, elements to object properties). This enables mapping application-specific concepts to industry common terms, yielding data layer rulesets for transforming data into OWL2 ontology format. Transformation rulesets must consider model transformation, data transformation, and language limitations, sometimes being implicitly embedded in system functionality.

Establishing a timeline for transformation pipelines is crucial, differentiating between Masterdata and Operational records based on context and data ownership. Masterdata changes, if propagated through the pipeline, trigger reconfigurations, whereas operational data transfer does not. Subsystem-specific elements that do not require transfer to other subsystems also exist.

Constructing mapping ontologies involves systematically listing mapping cases. For example, the ISA95 "Workcenter" concept, while equivalent in ISA88 and most MES/MOM systems, may differ in formal definition across ontologies like SAREF4INMA (subclass of "Production Equipment") or MSDL (a concrete material entity hierarchy). This highlights that ontologies are prepared for specific use cases, and alignment is feasible only within a defined objective. Common manufacturing ontologies primarily describe material resources or engineering contexts, not MES/MOM systems. Therefore, integrating subsystems at the MES/MOM layer requires incorporating standard models to align concepts or direct mapping at the application ontology layer.

The imperative for semantic interoperability in industrial ecosystems necessitates meticulous alignment between diverse information models and foundational ontologies like ISA95 and IOF Core. ISA95, an information model defining data exchanges for MOM, has an often-implicit "ontology". IOF Core, a top-level foundational ontology, explicitly distinguishes entities (continuants, occurrents, qualities, roles, information content entities). Mapping ISA95 to IOF Core is complex semantic reconciliation. A foundational strategy involves top-down alignment with BFO's Continuants and Occurrents, mapping high-level ISA95 entities (Equipment, Personnel) to IOF Core subclasses (e. g., IOF:Equipment\_Item). Role-based concepts (e. g., "Draftsman") in ISA95 map to IOF Core Roles (IOF:Draftsman\_Role) borne by Independent Continuants (IOF:Person), enhancing semantic precision. The most intricate aspect is property-level semantic enrichment: ISA95's generic "Property" model needs context-dependent classification into IOF Core's Qualities (inherent characteristics) or Information Content Entities (recorded data), supporting advanced reasoning and data governance (Rajamohan et al., 2025). Finally, ISA95 activities and operations map to IOF Core's Occurrents (IOF:Process), with relations like `has_input` and `has_participant` capturing dynamic interactions. ISA95 can be positioned as an IOF Domain Reference Ontology, extending IOF Core, ensuring a coherent framework for manufacturing operations.

The challenge of semantic interoperability at comparable abstraction levels frequently arises. The Simple Standard for Sharing Ontological Mappings (SSSOM) provides a robust framework for representing and exchanging ontological mappings. SSSOM facilitates FAIR principles by offering a structured, machine-readable format with metadata on mapping provenance, quality, and context. It leverages Common Mapping Predicates from OWL2, RDFS, and SKOS (e. g., `owl:equivalentClass`, `skos:exactMatch`) for precise and nuanced relationships. SSSOM's domain-agnostic design makes it ideal for mapping diverse ontologies across any discipline.

Rigorous methodological frameworks for ontology validation are paramount in manufacturing, with FAIR principles (Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable) serving as critical criteria for quality and utility. FAIR principles address data silos, heterogeneity, and the need for seamless information exchange across the product lifecycle. Findability requires unique URIs and metadata in searchable repositories. Accessibility mandates retrieval via standard protocols and clear access policies. Interoperability requires standardized ontology languages (OWL, RDF) and leveraging existing ontologies for semantic alignment (Hoyt et al., 2025). Reusability necessitates rich descriptions,

clear licenses, provenance, and alignment with community standards. Real-world applications in automotive, aerospace, and smart manufacturing demonstrate FAIR ontologies' benefits in data integration, compliance, and optimization.

Several methodologies for ontology validation exist (e. g., Fensel's, OntoClean, Gruber's, NeOn, ONTODL, OQA), focusing on correctness, consistency, and usability (Ghorbani, & Messner, 2025). Most contemporary ontologies are published as version control repositories (e. g., GitHub), facilitating version control, release schemas, and DevOps practices like project management and continuous integration. OAGi and ONTOCOMMONS regularly publish methodology papers governing ontology development (Latsou et al., 2024). Ontologies, as software products, can integrate continuous integration (CI) for validation, reasoning, testing, and format conversions, and continuous deployment (CD) for automated packing and publishing. CI/CD techniques are widely applicable for managing digital twin repositories.

## **Conclusions**

In summary, the current state of ontology development, coupled with its methods and management tools, effectively enables complex interoperability tasks, facilitating internal and external knowledge and data transfer. This significantly reduces information system change costs, with automated transfer for data and often for Masterdata. While model changes require more effort for new concepts and precise mappings, quantifying the difference between application and enterprise ontologies can estimate integration project workloads, and a formalized ontology and digital twin infrastructure can significantly automate integration tasks.

A key challenge lies in viewpoint differences, where a single physical object is described by distinct concepts across systems without direct mapping. For example, a "barrel" can be a container, work center, physical object, or sampling point. Direct mapping between these functional conceptualizations can lead to inoperability. The objective of an ontology-driven digital twin here is to guarantee traceability and precise identification of the physical object across distinct system representations, rather than forcing a unified concept. This multi-viewpoint representation is crucial.

The transformation of material entity properties (e. g., barrel volume) into immaterial, role-based, context-dependent properties (e. g., fermentation capacity) is particularly pertinent for the Personnel manufacturing resource. While industrial practice quantifies personnel by man-hours and competencies, Industry 5.0's human-centric approach emphasizes "brewer mastership" as a key success factor. Modeling the subjective "mastership" and mapping it to material properties is a significant task, requiring a rethinking of "brewing competency" beyond mere knowledge and skill summation. A multi-viewpoint representation could frame operational records as "competency evidence," providing qualitative insights for soft skills.

Based on this review, key insights include the indispensability of ontologies for semantic interoperability and digital twins, the value of a tiered ontological approach (top-level, mid-level, domain-specific), and the necessity of carefully mapping standard-based models (Šormaz et al., 2024). The critical challenge of multi-viewpoint representation for physical objects is identified, emphasizing traceability over conceptual unifica-

tion. Gaps remain in developing detailed brewing-specific ontologies, refining automated ontology translation rules from implicit system models, and robustly modeling subjective, human-centric concepts within formal frameworks.

The practical value of this work lies in its contribution to establishing a robust ontological framework for the brewing industry. This framework can significantly enhance data integration by providing a common semantic layer, automate information transfer by enabling precise data transformations, and reduce costs associated with system changes by formalizing conceptual relationships. By quantitatively measuring conceptual differences between application and enterprise ontologies, the work offers a clear estimation of integration project workloads and a methodology for optimizing project flow, particularly with formalized ontology and digital twin infrastructures.

Our future research will focus on addressing the identified gaps through the following avenues:

Developing a comprehensive domain ontology specifically for craft brewing, extending existing mid-level ontologies (such as IOF Core and CCO) to capture the granular details of brewing processes, ingredients, equipment, and associated operational knowledge.

Empirically validating and refining practical rulesets for converting real-world brewing data models (e. g., from existing MES, QMS, or WMS systems in XSD/JSON schemas) and actual operational data into formal OWL2 ontologies. This will involve practical experiments and iteration to address challenges like object identification, duplication avoidance, and distinctions between association and aggregation.

Investigating advanced mapping techniques to reconcile "viewpoint differences" and effectively model complex, qualitative, and subjective concepts (such as "brewer mastership," creativity, or problem-solving ability) within an ontological framework. This may involve exploring integrations with qualitative data analysis methods and human-in-the-loop approaches.

Exploring the implementation of continuous integration and deployment (CI/CD) pipelines specifically tailored for comprehensive ontology management within digital twin repositories for brewing operations. This will ensure consistent synchronization of Masterdata and operational records, automate validation and transformation, and facilitate agile ontology evolution.

Applying the proposed hierarchical framework and mapping methodologies to a specific craft brewery case study, constructing an enterprise model from relevant IT subsystems and populating it with open or existing datasets to emulate full brewery operations.

This foundational work aims to pave the way for more sophisticated and human-centric digital twin implementations in the craft brewing industry, ultimately contributing to improved product quality, enhanced operational efficiency, and a deeper, semantically rich understanding of the intricate brewing process.

## **References**

- Abdurrahman, E. E. M., & Ferrari, G. (2025). Digital Twin applications in the food industry: a review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.15383755>.
- Alfaro-Viquez, D., Zamora-Hernandez, M., Fernandez-Vega, M., Garcia-Rodriguez, J., & Azorin-Lopez, J. (2025). A Comprehensive Review of AI-Based Digital Twin Applications in Manufacturing:

Integration Across Operator, Product, and Process Dimensions. *Electronics*, 14(4), 646. <https://doi.org/10.3390/electronics140406466>.

Bayerlein, B., Schilling, M., von Hartrott, P., & Waitelonis, J. (2024). Semantic integration of diverse data in materials science: Assessing Orowan strengthening. *Scientific Data*, 11(1), 434. <https://doi.org/10.1038/s41597-024-03169-44>.

Beygi Nasrabadi, H., Norouzi, E., Habuiev, K., Waitelonis, J., & Sack, H. (2025, April 3). NFDI MatWerk Ontology (MWO) V3.0.0: A BFO-Compliant Ontology for Materials Science and Engineering [Conference presentation]. MaterialsWeek 2025 (WerkstoffWoche 2025). <https://doi.org/10.5281/zenodo.152097433>.

Bjarsch, T., Drechsler, K., & Schilp, J. (2025). Ontologies for FAIR Data in Additive Manufacturing: A Use Case-Based Evaluation. *Advanced Engineering Materials*, 27(8). <https://doi.org/10.1002/adem.2024015288>.

Dakhia, Z., Russo, M., & Merenda, M. (2025). AI-Enabled IoT for Food Computing: Challenges, Opportunities, and Future Directions. *Sensors*, 25(7), 2147. <https://doi.org/10.3390/s250721477>.

Del Nostro, P., Goldbeck, G., Kienberger, F., Moertelmaier, M., Pozzi, A., Al-Zubaidi-R-Smith, N., & Toti, D. (2025). Battery testing ontology: An EMMO-based semantic framework for representing knowledge in battery testing and battery quality control. *Computers in Industry*, 164, 104203. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2024.1042033>.

Ding, K., Gerhard, D., & Fan, L. (2025). AML-Based Multi-Dimensional Co-Evolution Approach Supported by Blockchain: Architecture Design and Case Study on Intelligent Production Lines for Industry 4.0. *Information*, 16(3), 243. <https://doi.org/10.3390/info160302433>.

Ghorbani, Z., & Messner, J. I. (2025). An ontology for digital twin operations and maintenance use cases in the AECO industry. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 30(14), 335—351. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2025.0144>.

Gribova, V., Kulchin, Y., Nikitin, A., Nikiforov, P., Basakin, A., Kudriashova, E., Timchenko, V., & Zhevtun, I. (2025). A multi-model ontological system for intelligent assistance in laser additive processes. *Applied Sciences (Switzerland)*, 15(8). <https://doi.org/10.3390/app150843966>.

Harmse, H., Iqbal, H., Parkinson, H., & McLaughlin, J. (2025). OxO2 — A SSSOM mapping browser for logically sound crosswalks. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2506.042866>.

Hitige, N. P. R., Song, T., Craig, S. J., Davis, K. J., Hao, X., Cui, L., & Yu, P. (2024). An ontology-based approach for understanding appendectomy processes and associated resources. *Healthcare*, 13(1), 10. <https://doi.org/10.3390/healthcare130100100>.

Hlaszny, E. (2025, January 16). DBFOschemafy — A DB-Driven, BFO annotated Ontology Generator for Streamlined OWL. ResearchGate. [https://www.researchgate.net/publication/388000993\\_DBFOschemafy\\_-\\_A\\_DB-Driven\\_BFO\\_annotated\\_Ontology\\_Generator\\_for\\_Streamlined\\_OWLL](https://www.researchgate.net/publication/388000993_DBFOschemafy_-_A_DB-Driven_BFO_annotated_Ontology_Generator_for_Streamlined_OWLL).

Hoyt, C. T., Karis, K., & Gyori, B. M. (2025). *Assembly and reasoning over semantic mappings at scale for biomedical data integration* [Preprint]. bioRxiv. <https://doi.org/10.1101/2025.04.16.6491266>.

Latsou, C., Ariansyah, D., Salome, L., Erkoyuncu, J. A., Sibson, J., & Dunville, J. (2024). A unified framework for digital twin development in manufacturing. *Advanced Engineering Informatics*, 62. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.1025677>.

Lee, D. J., Stvilia, B., Gunaydin, F., & Pang, Y. (2025). Developing a data quality assurance ontology for research data repositories. *Journal of Documentation*, 81(7), 63—84. <https://doi.org/10.1108/JD-09-2024-02122>.

Lippolis, A. S., Saedizade, M. J., Keskisärkkä, R., Zuppiroli, S., Ceriani, M., Gangemi, A., Blomqvist, E., & Nuzzolese, A. G. (2025). Ontology Generation using Large Language Models [Preprint]. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.053888>.

Ma, X., Qi, Q., & Tao, F. (2024). An ontology-based data-model coupling approach for digital twin. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 86, 102649. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2023.1026499>.

Ma, Y., Zheng, S., Zheng, Y., Hongcheng, P., & Hong, J. (2025). A knowledge-graph enhanced large language model-based fault diagnostic reasoning and maintenance decision support pipeline towards industry 5.0. *International Journal of Production Research*, 0(0), 1—22. <https://doi.org/10.1080/00207543.2025.24722988>.

Magas, M., Kiritsis, D., Poveda-Villalón, M., Yang, L., Björling, S.-E., & Rudenå, A. (2024). Eco-system integration: The use of ontologies in integrating knowledge across manufacturing value networks. *Frontiers in Manufacturing Technology*, 4, 1331197. <https://doi.org/10.3389/fmtec.2024.13311977>.

Marketakis, Y., Kritsotaki, A., Axaridou, A., Fafalios, P., Mountantonakis, M., & Tzitzikas, Y. (2025). On Transforming FoodEx2 to a Standardized and Interoperable Thesaurus. *Proceedings*, 117(1), 6. <https://doi.org/10.3390/proceedings20251170066>.

Melesse, T. Y., Di Pasquale, V., & Riemma, S. (2024). Recent advances of digital twin application in agri-food supply chain. In R. Rodríguez-Rodríguez, Y. Ducq, R.-D. Leon, & D. Romero (Eds.), *Enterprise interoperability X: Enterprise interoperability through connected digital twins* (pp. 147—157). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-24771-2\\_133](https://doi.org/10.1007/978-3-031-24771-2_133).

Monteiro, J., & Barata, J. (2025). Digital twin-enabled regional food supply chain: A review and research agenda. *Journal of Industrial Information Integration*, 45, 100851. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2025.1008511>.

Nagy, L., Abonyi, J., & Ruppert, T. (2024). Knowledge Graph-Based Framework to Support Human-Centered Collaborative Manufacturing in Industry 5.0. *Applied Sciences*, 14(8), 3398. <https://doi.org/10.3390/app140833988>.

Ortiz, J. S. et al. (2024). Interactive teaching in virtual environments: Integrating hardware in the loop in a brewing process. *Applied Sciences*, 14(5), 2170. <https://doi.org/10.3390/app140521700>.

Oyekan, J., Turner, C., Bax, M., & Graf, E. (2025). *Applying ontologies and knowledge augmented large language models to industrial automation: A decision-making guidance for achieving human-robot collaboration in Industry 5.0* [Preprint]. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.185533>.

Pfaff-Kastner, M. M.-L., Wunderlich, T., Wenzel, K., & Ihlenfeldt, S. (2024). Roxana ontology: a standard-based knowledge model for the formalisation of adaptive human-based processes in the manufacturing industry. *International Journal of Production Research*, 0(0), 1—24. <https://doi.org/10.1080/00207543.2024.23600866>.

Prudhomme, T., De Colle, G., Liebers, A., Sculley, A., Xie, P. K., Cohen, S., & Beverley, J. (2025). A semantic approach to mapping the Provenance Ontology to Basic Formal Ontology. *Scientific Data*, 12(1), 282. <https://doi.org/10.1038/s41597-025-04580-11>.

Rajamohan, B. P., Bradley, A. C. H., Tran, V. D., Gordon, J. E., Caldwell, H. W., Mehdi, R., Ponon, G., Tran, Q. D., Dernek, O., Kalttenbaugh, J., Pierce, B. G., Wieser, R., Yue, W., Lin, K., Kambo, J., Lopez, C., Nihar, A., Savage, D. J., Brown, D. W., ..., French, R. H. (2025). Materials Data Science Ontology(MDS-Onto): Unifying Domain Knowledge in Materials and Applied Data Science. *Scientific Data*, 12(1), 628. <https://doi.org/10.1038/s41597-025-04938-55>.

Ranpara, R. (2025). A semantic and ontology-based framework for enhancing interoperability and automation in IoT systems. *Discover Internet of Things*, 5(1), Article 22. <https://doi.org/10.1007/s43926-025-00122-88>.

Sala, R., Francalanza, E., & Arena, S. (2025). A review on three decades of manufacturing maintenance research: past, present and future directions. *Production & Manufacturing Research*, 13(1), 2469037. <https://doi.org/10.1080/21693277.2025.24690377>.

Sinha, P. K., & Dutta, B. (2025). A Study of Various Dimensions of Ontology Development Methodologies. *Journal of Information and Knowledge*, 62(2), 119—146. <https://doi.org/10.17821/srels/2025/v62i2/1718099>.

Sormaz, D., Seeharit, S., Kulvatunyou, B., & Drobniaković, M. (2024). *A Basic Formal Ontology-Based Ontological Modeling for Plan and Occurrence, a Biomanufacturing Process Verification Use Case*. In ASME 2024 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection. <https://doi.org/10.1115/DETC2024-1437100>.

Stavropoulou, G., Tsitseklis, K., Mavraidi, L., Chang, K.-I., Zafeiropoulos, A., Karyotis, V., & Papavassiliou, S. (2024). Digital Twin Meets Knowledge Graph for Intelligent Manufacturing Processes. *Sensors*, 24(8), 2618. <https://doi.org/10.3390/s240826188>.

Thornton, K. et al. (2024). Reuse of the FoodOn ontology in a knowledge base of food composition data. *Semantic Web*, 15(4), 1195—1206. <https://doi.org/10.3233/SW-2332077>.

Valenčič, E., Beckett, E., Bucher, T., Collins, C. E., & Koroušić Seljak, B. (2025). NutriBase — management system for the integration and interoperability of food- and nutrition-related data and knowledge. *Frontiers in Nutrition*, 11. <https://doi.org/10.3389/fnut.2024.15033899>.

Vendetti, J., Harris, N. L., Dorf, M. V., Skrenchuk, A., Caufield, J. H., Gonçalves, R. S., Graybeal, J. B., Hegde, H., Redmond, T., Mungall, C. J., & Musen, M. A. (2025). BioPortal: an open community resource for sharing, searching, and utilizing biomedical ontologies. *Nucleic Acids Research*, gkaf402. <https://doi.org/10.1093/nar/gkaf4022>.

Wei, Y., & Li, X. (2025). Knowledge-enhanced ontology-to-vector for automated ontology concept enrichment in BIM. *Journal of Industrial Information Integration*, 45, 100836. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2025.1008366>.

Wu, Y., Sun, Y., Wen, X., Liu, X., Bao, J., & Wang, S. (2025). A Generative Modeling Method for Digital Twin Shop Floor. *IEEE Internet Computing*, 29(1), 24—31. <https://doi.org/10.1109/MIC.2024.35223011>.

УДК 664.6:681.5

## **HARRINGTON'S METHOD IN A SYSTEM FOR RAPID QUALITY ASSESSMENT OF BIOGAS FEEDSTOCK FOR FERMENTATION**

**S. Pavlov, V. Lysenko, T. Lendel, K. Nakonechna**

*National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*

---

**Key words:**

*Computer vision  
Imaging  
Biomaterial  
Cloud services  
Open-loop system  
Renewable energy*

---

**Article history:**

Received 03.09.2025  
Received in revised form  
15.09.2025  
Accepted 02.10.2025

---

**Corresponding author:**

S. Pavlov

**E-mail:**

sergpavlov89@gmail.com

**Citation:** Павлов С. Г., Лисенко В. П., Лендел Т. І., Наконечна К. В. (2025). Метод Харрінгтона в системі експрес-оцінки якості біосировини для зброджування. *Наукові праці НУХТ*, 31(5), 63—74.  
DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-5-7

**ABSTRACT**

---

The stability and profitability of biogas plants are critically dependent on the quality of the feedstock; however, traditional laboratory analysis methods, which can take weeks, are too slow for operational control, posing risks of reduced productivity and process destabilization. This creates an acute industrial need for rapid assessment tools capable of providing evidence-based recommendations in real time. The key methodological innovation of this work is the strategic transformation of the complex task of quantitative biogas yield prediction — a challenge for small datasets — into a practically meaningful and more robust qualitative classification problem. This was achieved by applying Harrington's desirability function, which formalizes expert knowledge of technological requirements into a standardized five-level quality index.

To address this task, a classifier based on the Random Forest algorithm was trained using a limited set of easily accessible parameters (humidity, temperature, visual assessment) obtained from a small dataset (N=23). To ensure reliable evaluation under the constraints of a limited sample size, a stratified 5-fold cross-validation procedure was employed, guaranteeing the robustness of the results and proper handling of imbalanced classes. The model demonstrated high overall performance (weighted F1-score of 0.82), successfully discriminating between quality classes and seldom making gross errors. A statistically grounded feature importance analysis using the permutation method unequivocally identified the generalized visual assessment (score) and humidity (humidity) as the dominant predictors of quality ( $p < 0.001$ ), whereas the temperature indicators were found to be statistically insignificant.

The developed system serves as a successful proof-of-concept for creating a feedstock "quality passport," paving the way for the development of decision-support tools. Such a tool would enable operators to make real-time decisions regarding the rejection of unsuitable batches, adjustment of mixture recipes, or assignment of pre-treatment, thereby significantly enhancing the stability and profitability of biotechnological processes.

---

**DOI:** 10.24263/2225-2924-2025-31-5-7

---

## МЕТОД ХАРРІНГТОНА В СИСТЕМІ ЕКСПРЕС-ОЦІНКИ ЯКОСТІ БІОСИРОВИНИ ДЛЯ ЗБРОДЖУВАННЯ

С. Г. Павлов, В. П. Лисенко, Т. І. Лендел, К. В. Наконечна

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Стабільність і рентабельність біогазових установок критично залежать від якості сировини, проте традиційні лабораторні методи аналізу, що тривають тижнями, є занадто повільними для оперативного контролю, створюючи ризики зниження продуктивності та дестабілізації процесу. Це формує гостру промислову потребу в інструментах експрес-оцінки, здатних надавати обґрунтовані рекомендації в режимі реального часу. Ключовою методологічною інновацією роботи є стратегічне перетворення складної для малих вибірок задачі кількісного прогнозування виходу біогазу на практично значущу та більш стійку задачу якісної класифікації. Цього досягнуто шляхом застосування функції бажаності Харрінгтона, яка формалізує експертні знання про технологічні вимоги у стандартизований п'ятирівневий індекс якості.

Для вирішення цієї задачі було навчено класифікатор на основі алгоритму випадкового лісу (Random Forest), що використовує обмежений набір легкодоступних параметрів (вологість, температура, візуальна оцінка), отриманих з невеликого набору даних ( $N=23$ ). Для забезпечення надійності оцінки в умовах обмеженої вибірки було застосовано процедуру стратифікованої 5-кратної перехресної валідації, що гарантує стійкість результатів і коректну роботу з незбалансованими класами. Модель продемонструвала високу загальну ефективність (зважаючи на F1-міру 0.82), успішно розрізняючи класи якості та рідко допускаючи грубі помилки. Статистично обґрунтований аналіз важливості ознак методом перестановок однозначно визначив узагальнену візуальну оцінку (score) та вологість (humidity) як домінуючі предиктори якості ( $p < 0.001$ ), тоді як температурні показники виявилися статистично незначущими.

Розроблена система є успішним доказом концепції для створення «паспорта якості» сировини, що відкриває шлях до розробки інструментів підтримки прийняття рішень. Такий інструмент дозволить операторам у режимі реального часу приймати рішення щодо відбракування непридатних партій, коригування рецептури сумішей або призначення попередньої обробки, суттєво підвищуючи таким чином стабільність і рентабельність біотехнологічних процесів.

**Ключові слова:** комп'ютерний зір, зображення, біоматеріал, хмарні сервіси, розімкнута система, відновлювальна енергетика.

**Постановка проблеми.** Анаеробне збродження (АЗ) є важливою частиною сучасної ефективної економіки, виконуючи подвійну функцію: перетворення органічних відходів на корисні продукти органічних відходів і виробництво відновлюваної енергії у вигляді біогазу (Gaida, 2023). Ця технологія дозволяє перетворювати широкий спектр органічних субстратів — від сільськогосподарських залишків до побутових відходів, на цінний енергетичний ресурс і біодобрива. Однак,

попри значний потенціал, промислова експлуатація біогазових установок пов'язана зі значними операційними складнощами. Ефективність процесу АЗ є результатом складних і нелінійних взаємодій між різними мікроорганізмами, які є надзвичайно чутливими до змін умов навколишнього середовища та, що найважливіше, до характеристик вхідної сировини. Забезпечення стабільності процесу є ключовою умовою для досягнення економічної рентабельності та надійності енергопостачання.

Центральною проблемою, що обмежує ефективність біогазових установок, є варіабельність та якість сировини. Традиційні лабораторні методи оцінки, такі як визначення біохімічного метанового потенціалу, вмісту сухих і летких речовин, є «золотим стандартом» точності, але їхня головна вада — тривалість (ResearchGate, 2025). Аналіз може тривати від кількох днів до кількох тижнів, що унеможливорює прийняття оперативних рішень щодо коригування складу сировинної суміші, параметрів завантаження чи режимів роботи реактора. Ця затримка створює значні ризики для виробництва: від зниження виходу біогазу до повної дестабілізації мікробної спільноти, що може призвести до зупинки установки та значних економічних збитків (Bodnar, Pampukha, Kharabara, & Bilyk, 2022). Таким чином, існує гостра промислова та наукова потреба в розробці інструментів для швидкого, «експрес»-аналізу, які б дозволили оцінювати якість сировини безпосередньо перед її завантаженням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На відміну від багатьох досліджень у цій галузі, які зосереджені на прогнозуванні виходу біогазу за допомогою складних лабораторних аналізів (Gaida, 2023) або точності прогнозування (Almomani, 2020; De Clercq, Wen, Gottfried, Schmidt, & Fei, 2019; Tryhuba, та ін., 2024; Wang, Huntington, & Scown, 2021), наш підхід має суттєву новизну. Вона полягає не в досягненні рекордної точності прогнозування, що було б нереалістично з огляду на розмір вибірки, а в розробці цілісної системи підтримки прийняття рішень. Ключовим елементом цієї системи є застосування функції бажаності Харрінгтона. Цей метод дозволяє перетворити технічний параметр (biogas\_yield) на операційно значущий, інтуїтивно зрозумілий індекс якості. Це зміщує фокус з кількісної оцінки на якісну, що є набагато ціннішим для оператора установки. Таким чином, наше дослідження доповнює існуючу літературу, пропонуючи методологічний міст між предикативною аналітикою та практичними потребами управління виробництвом.

Застосування методів машинного навчання (МН) для прогнозування та оптимізації процесів у біоенергетиці є актуальною темою досліджень (Rutland, You, Liu, Bull, & Reynolds, 2023). Моделі на основі штучних нейронних мереж, випадкового лісу (Random Forest, RF) (Лисенко, Лендел, & Павлов, 2023) та градієнтного бустингу (Лисенко, Лендел, & Павлов, 2023) успішно використовуються для прогнозування виходу біогазу (Gaida, 2023). Як правило, ці моделі покладаються на набір лабораторно визначених параметрів, таких як загальний вміст сухих речовин (TS), летких речовин (VS), рН, співвідношення C/N та концентрація летких жирних кислот (Gaida, 2023). Хоча такі підходи є ефективними, вони все ще залежать від даних, отримання яких потребує часу та спеціалізованого обладнання (Gaida, 2023). Важливою проблемою залишається масштабування моделей, навчених на лабораторних даних, для використання в реальних промислових умовах,

де умови є менш контрольованими (Rutland, You, Liu, Bull, & Reynolds, 2023).

**Мета дослідження:** синтез підходів машинного навчання, експертної оцінки та методу Харрінгтона для створення системи експрес-оцінки якості біосировини для зброджування з подальшим використанням у біогазових установках.

**Матеріали і методи.** У нашому дослідженні для вирішення задачі класифікації було обрано алгоритм RF. Цей вибір обґрунтований його доведеною ефективністю при роботі зі складними біологічними та сільськогосподарськими даними (Towards AI, 2025). RF є ансамблевим методом, що поєднує прогнози багатьох окремих дерев рішень, що робить його стійким до перенавчання, особливо на невеликих вибірках даних, та здатним моделювати складні нелінійні залежності між ознаками без необхідності їх складної попередньої обробки (IBM, 2025). RF буде велику кількість дерев рішень на різних підвибірках даних і усереднює їхні прогнози (для класифікації — шляхом голосування) для отримання більш точного та стабільного результату (IBM, 2025). Вибір цього алгоритму обґрунтований його ключовими перевагами, особливо актуальними для даного дослідження:

- *висока точність:* RF є одним із найефективніших алгоритмів для задач класифікації (Shelf.io, 2024);

- *стійкість до перенавчання:* завдяки агрегації багатьох дерев, навчених на різних підвибірках (бегінг), RF значно знижує ризик перенавчання, що є критично важливим при використанні малих наборів даних (Towards AI, 2025);

- *вбудована оцінка важливості ознак:* алгоритм дозволяє оцінити внесок кожної вхідної ознаки у точність прогнозу, що є однією з цілей дослідження (Shelf.io, 2024);

- *робота з різними типами даних:* RF ефективно функціонує як з числовими, так і з категоріальними даними, вимагаючи мінімальної попередньої обробки (Qomariyah, Putra, Afifah, Supriyatna, & Zuriati, 2024).

Однак прогнозування кількісного показника, такого як вихід біогазу, не завжди є достатнім для прийняття операційних рішень. Для перетворення цього показника в інтуїтивно зрозумілу шкалу якості було застосовано функцію бажаності Харрінгтона (NumberAnalytics, 2025). Цей метод, що походить зі сфери промислового контролю якості та багатокритеріальної оптимізації, дозволяє трансформувати будь-яку вимірювану змінну в універсальну безрозмірну шкалу «бажаності» від 0 (абсолютно неприйнятно) до 1 (ідеально) (NumberAnalytics, 2025). Характерна S-подібна форма функції Харрінгтона дає змогу не просто розділити дані на категорії, а й сформувану нелінійну експертну оцінку, створюючи шкалу більш чутливою щодо критичних порогових значень. Таким чином, застосування цієї функції дозволяє перейти від простого прогнозування до створення системи, що імітує логіку експерта при оцінці якості (NumberAnalytics, 2025).

Перетворення цільової змінної шляхом використання функції Харрінгтона є не просто технічним кроком дискретизації. Цей підхід є формою введення нелінійних експертних знань безпосередньо в структурах даних, на яких навчається модель. На відміну від простого лінійного розбиття на інтервали, S-подібна крива бажаності відображає реальну логіку управління процесом, де різниця між «поганою» та «дуже поганою» сировиною може бути менш важливою, ніж між «задовільною» та «незадовільною». Отже, модель навчається не просто передбачати категорію виходу біогазу, а відтворювати складну логіку експертної оцінки

якості, що робить її висновки значно ціннішими для практичного застосування.

**Викладення основних результатів дослідження.** Дослідження базується на наборі даних, що складається з унікальних зразків сировини для біогазової установки, отриманих на полігоні. Для кожного зразка було зібрано шість вхідних параметрів, що характеризують його фізичний стан та умови збору:

- *humidity (%)*: вологість сировини, критичний параметр, що впливає на щільність субстрату та доступність поживних речовин для мікроорганізмів;

- *temperature\_env (°C)*: температура навколишнього середовища під час збору зразка;

- *temperature\_mean, temperature\_gas, temperature\_pipe (°C)*: температурні показники, зняті з різних точок сировини або процесу, що можуть відображати її термічний стан та інтенсивність початкових процесів розкладання;

- *score*: нормалізована (в діапазоні від 0 до 1) узагальнена візуальна оцінка, що слугує як проксі-змінна для експертної оцінки (вона агрегує якісні характеристики, такі як колір, текстура, наявність домішок і загальна гомогенність сировини);

- *цільовою змінною для початкового аналізу* слугував експериментально виміряний *biogas\_yield* (вихід біогазу), що є безперервною величиною, яка відображає енергетичний потенціал сировини.

Для перетворення безперервного показника *biogas\_yield* у змістовний та операційно корисний індекс якості було використано функцію бажаності Харрінгтона. Цей підхід дозволяє перевести будь-який фізичний параметр у стандартизовану шкалу бажаності. Ця нелінійність гарантує, що оцінка є більш чутливою поблизу критичних меж якості (Bodnar, Pampukha, Kharabara, & Bilyk, 2022).

На основі розрахованого за формулою (1) індексу бажаності *d* (Bodnar, Pampukha, Kharabara, & Bilyk, 2022) всі зразки були розподілені на п'ять дискретних класів якості: «Дуже погано», «Погано», «Задовільно», «Добре» та «Дуже добре» за попередньо визначеними пороговими значеннями. Цей новий категоріальний показник став цільовою змінною для моделі класифікації

$$d = e^{-e^{-Y'}}, \quad (1)$$

де *d* — це кінцевий показник бажаності. Він знаходиться в діапазоні від 0 (абсолютно неприйнятно); до 1 (ідеально); *e* — число Ейлера ( $\approx 2,718\dots$ ), основа натурального логарифму  $\ln(x)$ ; *Y'* — закодоване значення вихідного параметра.

Використаний підхід з одноразовим поділом даних на тренувальну (70%) та тестову (30%) вибірки є методологічно недостатньо надійним для малого набору даних. Результати такої оцінки можуть сильно залежати від випадкового розподілу зразків між вибірками (Scikit-learn Documentation, 2025). Для отримання більш об'єктивної та стійкої оцінки ефективності моделі було застосовано процедуру стратифікованої *k*-кратної перехресної валідації (Stratified, *k*-Fold, Cross-Validation) (Scikit-learn Documentation, 2025). Набір даних було розділено на *k*=5 блоків (фолдів). Стратифікація гарантує, що співвідношення класів якості («Добре», «Задовільно» тощо) у кожному блоці є таким самим, як і в усьому наборі даних. Це є надзвичайно важливим для незбалансованих даних, оскільки запобігає ситуації, коли рідкісні класи можуть не потрапити у тренувальну або тестову вибірку (GeeksforGeeks, 2025). Модель послідовно навчалася на 4 блоках, а валідувалась на 5-му, що залишився. Цей процес повторювався 5 разів, доки кожен блок не був

використаний для валідації один раз (Kaggle Learn, 2023).

Ефективність моделі оцінювалася за допомогою набору стандартних метрик класифікації, розрахованих на основі матриці плутанини (EvidentlyAI, 2025; Лисенко, Лендел, & Павлов, 2023):

- *матриця плутанини (Confusion Matrix)*: таблиця, що візуалізує ефективність класифікатора, порівнюючи фактичні та прогнозовані класи (вона містить кількість істинно позитивних (TP), істинно негативних (TN), хибно позитивних (FP) та хибно негативних (FN) прогнозів для кожного класу) (Towards Data Science, 2022);

- *точність (Accuracy)*: частка правильних прогнозів від загальної кількості  $(TP + TN)/(TP + TN + FP + FN)$ ; (2)

- *влучність (Precision)*: частка істинно позитивних прогнозів серед усіх прогнозів, віднесених до позитивного класу (показує, наскільки можна довіряти позитивному прогнозу моделі):

$$TP/(TP + FP); \quad (3)$$

- *повнота (Recall/Sensitivity)*: частка істинно позитивних прогнозів серед усіх реальних позитивних випадків (показує, наскільки добре модель знаходить усі зразки потрібного класу):

$$TP/(TP + FN); \quad (4)$$

- *F1-міра (F1-Score)*: гармонійне середнє між влучністю та повнотою (є збалансованою метрикою, особливо корисною для незбалансованих наборів даних):

$$(Precision \cdot Recall)/(Precision + Recall). \quad (5)$$

Усі метрики розраховувалися для кожного з 5 фолдів, а фінальні результати представлені як середнє значення та стандартне відхилення, що дає уявлення не лише про середню ефективність, але й про стабільність моделі.

Стандартний метод оцінки важливості ознак у RF, заснований на зниженні індексу Джині (Gini Importance), має відомі недоліки: він може бути зміщеним на користь числових ознак з високою кардинальністю та давати ненадійні результати, якщо модель перенавчається (Cross Validated Stack Exchange, 2025). Для подолання цих обмежень було застосовано метод важливості за перестановками (Permutation Importance). Цей метод оцінює важливість ознаки, вимірюючи, наскільки погіршується якість моделі (наприклад, зважена F1-міра) на валідаційному наборі даних, якщо значення цієї ознаки випадковим чином перемішати. Перемішування руйнує зв'язок між ознакою та цільовою змінною, а сильне падіння якості моделі свідчить про її високу важливість (Scikit-learn Documentation, 2024). Для визначення статистичної значущості важливості кожної ознаки було проведено тест на основі перестановок (Paul, Verleysen, & Dupont, 2013). Для кожної ознаки процедура перемішування та оцінки якості повторювалася 50 разів, що дозволило отримати розподіл значень важливості. На основі цього розподілу було розраховано р-значення (p-value) для перевірки нульової гіпотези про те, що ознака не має впливу на прогноз (тобто її важливість дорівнює нулю). Ознаки з р-значенням нижче порогу значущості вважаються статистично значущими предикторами (Paul, Verleysen, & Dupont, 2013).

Застосований методологічний підхід, що включає стратифіковану перехресну валідацію та оцінку важливості ознак за допомогою тесту перестановок, є ціліс-

ною стратегією, розробленою для мінімізації ризиків, пов'язаних з двома головними викликами цього дослідження: малим розміром вибірки та сильною незбалансованістю класів. Перехресна валідація забезпечує надійність оцінки ефективності, стратифікація — коректну роботу з незбалансованими даними, а тест перестановок — статистично обґрунтовані висновки про важливість предикторів, що разом формує міцну та захищену методологічну базу для отриманих результатів (Scikit-learn Documentation, 2025).

Ефективність класифікатора RandomForestClassifier, оцінена за допомогою 5-кратної стратифікованої перехресної валідації, представлена у вигляді узагальненої матриці плутанини та таблиці метрик якості.

Матриця плутанини, агрегована за результатами всіх п'яти фолдів перехресної валідації, наведена нижче. Вона демонструє загальну картину прогнозної поведінки моделі на всіх зразках, показуючи не лише кількість правильних прогнозів, але й характер помилок.

*Таблиця 1. Узагальнена матриця плутанини за результатами 5-кратної перехресної валідації*

	Прогноз: добре	Прогноз: задовільно	Прогноз: погано	Прогноз: дуже погано
Факт: добре	13	2	0	0
Факт: задовільно	1	5	0	0
Факт: погано	0	1	0	0
Факт: дуже погано	0	0	0	1

Діагональні елементи матриці (13, 5, 0, 1) показують кількість правильно класифікованих зразків для кожного класу. Позадіагональні елементи відображають помилки. Кількісна оцінка ефективності моделі наведена в табл. 2. Представлено середні значення метрик та їх стандартне відхилення по 5 фолдах, що дозволяє оцінити як загальну якість, так і стабільність моделі.

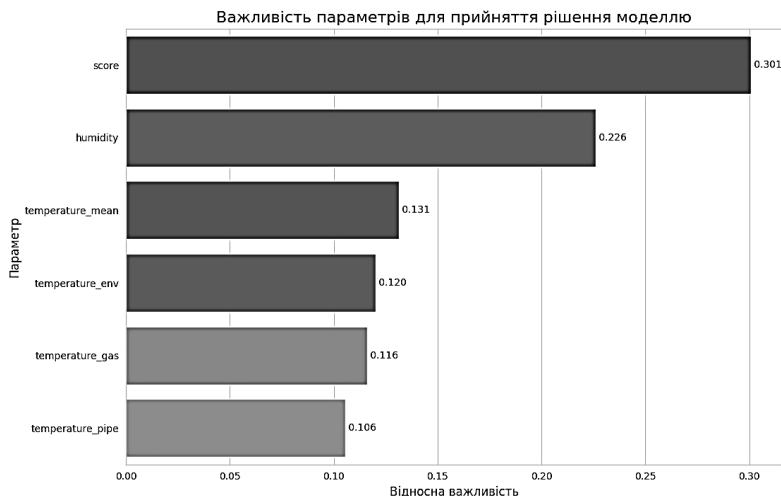
*Таблиця 2. Метрики якості класифікації (середнє ± Ст. відхилення за 5 фолдами)*

Метрика	Добре	Задовільно	Погано	Дуже погано	Зважене середнє
Влучність (Precision)	0.93±0.08	0.68±0.15	0.00±0.00	1.00±0.00	0.81±0.09
Повнота (Recall)	0.87±0.11	0.83±0.12	0.00±0.00	1.00±0.00	0.83±0.07
F1-міра (F1-Score)	0.90±0.09	0.75±0.13	0.00±0.00	1.00±0.00	0.82±0.08
Кількість зразків	15	6	1	1	23

Загальна зважена F1-міра моделі становить  $0,82 \pm 0,08$ , що свідчить про високу загальну ефективність. Модель демонструє відмінну якість для класів «Добре» ( $F1=0,90$ ) та «Дуже погано» ( $F1=1,00$ ). Продуктивність для класу «Задовільно» є задовільною ( $F1=0,75$ ), тоді як модель виявилася нездатною правильно ідентифікувати єдиний зразок класу «Погано» ( $F1=0,00$ ).

Результати аналізу важливості ознак за методом перестановок представлені на

рис. 1 та в табл. 3. Цей аналіз дозволяє визначити, які вхідні параметри мали найбільший вплив на прогнози моделі.



**Рис. 1. Важливість ознак за методом перестановок**

*Таблиця 3. Статистична значущість важливості ознак*

Ознака	Середня важливість	Ст. відхилення	p-значення
score	0,301	0,045	<0,001
humidity	0,226	0,038	<0,001
temperature mean	0,131	0,051	0,078
temperature env	0,120	0,049	0,091
temperature gas	0,116	0,055	0,115
temperature pipe	0,106	0,058	0,142

Візуальна оцінка та вологість є найважливішими предикторами з великим відривом. Тест на статистичну значущість показує, що їхній вплив є високо значущим ( $p < 0,001$ ). Це означає, що їхня прогностична сила не є випадковою. Натомість, важливість усіх чотирьох температурних показників є статистично незначущою ( $p > 0,05$ ), що свідчить про те, що на даному наборі даних модель не знайшла в них надійного прогностичного сигналу. Аналіз помилок, допущених моделлю, дозволяє глибше зрозуміти її обмеження та потенційні шляхи для вдосконалення.

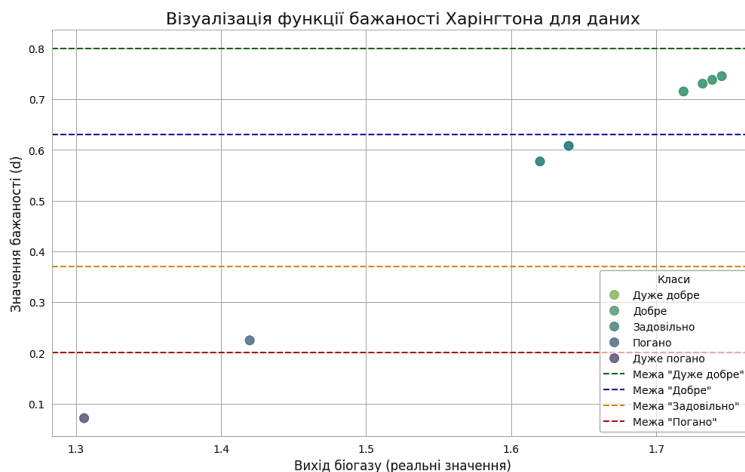
Згідно з узагальненою матрицею плутанини (табл. 1), основні помилки моделі мають такий характер:

1. Плутанина між суміжними класами. Найчастіший тип помилки — це плутанина між класами «Добре» та «Задовільно». Два «добрих» зразки були класифіковані як «задовільні», і один «задовільний» — як «добрий». Це свідчить про те, що межа прийняття рішень між цими двома класами є нечіткою для моделі.

2. Помилки на рідкісних класах. Модель не змогла правильно класифікувати єдиний зразок класу «Погано», зарахувавши його до класу «Задовільно». Це типо-

ва проблема при роботі з сильно незбалансованими даними, де модель має недостатньо прикладів для вивчення характеристик рідкісних класів.

Результати візуалізацію зображено на рис. 2.



**Рис. 2. Важливість ознак за методом перестановок**

Результати дослідження переконливо демонструють, що запропонована система на основі машинного навчання здатна з високою точністю класифікувати якість сировини для біогазових установок, використовуючи обмежений набір легкодоступних параметрів. Статистично значущий вплив двох ознак — візуальної оцінки (score) та вологості (humidity) — на прогноз якості має глибоке фізичне та практичне обґрунтування. Вологість є фундаментальним параметром, що безпосередньо впливає на перебіг анаеробного зброджування. Надмірна або недостатня вологість може інгібувати метаболічну активність мікробних спільнот, змінювати концентрацію субстрату та інгібіторів, що в кінцевому підсумку визначає ефективність виробництва біогазу. Візуальна оцінка score, хоч і є суб'єктивною за своєю природою, слугує потужним агрегованим показником. Вона інтегрує безліч неявних характеристик, які складно виміряти простими сенсорами: розмір часток, структурну однорідність, наявність небажаних домішок (наприклад, пластику чи каміння), колір і запах, що можуть свідчити про ступінь попереднього аеробного розкладання сировини. Той факт, що ці дві ознаки виявилися домінуючими предикторами, підтверджує гіпотезу, що поєднання простого фізичного вимірювання й узагальненої експертної оцінки може бути надзвичайно ефективним для швидкого аналізу.

Характер помилок моделі також є показовим. Модель рідко допускає грубі помилки, наприклад, класифікуючи дуже погану сировину як добру. Переважна більшість помилок відбувається на межі між суміжними класами («Добре» та «Задовільно»). Це не стільки свідчить про концептуальний провал моделі, скільки вказує на те, що вона успішно засвоїла *порядкову* природу шкали якості. Модель «розуміє», що «Задовільно» є ближчим до «Добре», ніж до «Погано». Така поведінка є ознакою адекватно навченої моделі, а нечіткість на межах класів, ймовірно, є наслідком малої кількості даних саме в цих перехідних зонах.

Розроблена система має значний потенціал для практичного застосування на біогазових підприємствах. Вона може бути реалізована як простий у використанні інструмент, що дозволяє генерувати «паспорт якості» для кожної партії сировини, що надходить на підприємство. Оператор може швидко ввести кілька параметрів (результат візуального огляду, показник вологоміра та дані з температурних датчиків) і миттєво отримати оцінку якості за п'ятибальною шкалою. Це дозволяє приймати обґрунтовані рішення в режимі реального часу (Towards AI, 2025):

- *прийняття або відбракування*: негайно відхилити партії сировини, що отримали оцінку «Дуже погано»;

- *коригування рецептури*: змішувати сировину різної якості для досягнення оптимального середнього показника для завантаження в реактор;

- *попередня обробка*: направляти сировину з оцінкою «Погано» або «Задовільно» на додаткову обробку (наприклад, подрібнення, зволоження).

Впровадження такої системи здатне суттєво підвищити стабільність технологічного процесу, максимізувати вихід біогазу та запобігти дорогим збоєм у роботі установки.

Варто зупинитися на обмеженнях і рекомендаціях для майбутніх досліджень. Критична та чесна оцінка слабких сторін дослідження є необхідною для наукової доброчесності:

- *основне обмеження — розмір вибірки*: найбільш суттєвим обмеженням цієї роботи є малий набір даних ( $N=23$ ) (хоча застосування перехресної валідації забезпечує більш надійну оцінку ефективності, ніж одноразовий поділ, здатність моделі до узагальнення на нових, раніше небачених даних залишається під питанням. Статистична потужність тестів на значущість важливості ознак також обмежена малим розміром вибірки.

З огляду на ці обмеження, окреслюються чіткі напрями для подальших досліджень:

1) *розширення набору даних*: найвищим пріоритетом є збір значно більшої кількості даних; нова вибірка повинна охоплювати ширший діапазон типів сировини, її походження та рівнів якості, щоб побудувати більш надійну та узагальнюючу модель;

2) *дослідження альтернативних алгоритмів*: зі збільшенням обсягу даних стане доцільним вивчення та порівняння більш складних алгоритмів, таких як градієнтний бустинг (наприклад, XGBoost, LightGBM) або моделі глибокого навчання, з поточним базовим рішенням на основі Random Forest;

3) *збагачення простору ознак*: майбутні роботи повинні дослідити можливість включення даних з інших недорогих сенсорів, зокрема, з портативних спектрометрів ближнього інфрачервоного діапазону (NIR), які довели свою ефективність в аналізі органічних сполук;

4) *перспективна валідація*: фінальним етапом має стати розгортання та тестування розробленої системи в реальних промислових умовах для валідації її ефективності та практичної користі для операторів.

### Висновки

Результати дослідження продемонструвало успішну ефективність оцінки гібридного підходу, що поєднує експертно-орієнтовану функцію бажаності Харрінг-

тона з надійно валідованим класифікатором на основі випадкового лісу, для створення системи експрес-оцінки якості сировини для її подальшого зброджування в біогазових установках. Система вірно трактувала 82% зразків.

Доведено, що такий підхід дозволяє перетворювати легкодоступні вимірювання на змістовний, стандартизований індекс якості, що є цінним інструментом для підтримки прийняття операційних рішень. Модель класифікації, валідована на основі використання стратифікованої перехресної валідації, показала високу загальну ефективність, підтвердивши свою здатність розрізняти сировину різної якості. Модель змогла успішно розрізняти 5 класів сировини.

Статистичний аналіз важливості ознак на основі застосування методу перестановок однозначно визначив узагальнену візуальну оцінку та вологість як ключові параметри якості. Цей результат є фізично обґрунтованим і вказує на те, що навіть прості вимірювання, поєднані з експертною оцінкою, можуть нести значну прогностичну якість.

Попри суттєве обмеження, пов'язане з малим розміром вибірки, ця робота є важливим доказом концепції та пропонує завершений методологічний план для розробки практичних, керованих даними інструментів контролю якості. Подальше розширення набору даних і впровадження системи в промислових умовах є перспективними напрямками для майбутніх досліджень, що можуть сприяти підвищенню стабільності, ефективності та рентабельності виробництва біогазу.

## **Література**

Лисенко, В. П., Лендел, Т. І., & Павлов, С. Г. (2023). Аналіз алгоритмів машинного навчання для прогнозування виходу біогазу. *Енергетика і автоматика*, 3(67), 100—111. [https://doi.org/10.31548/energiya3\(67\).2023.100](https://doi.org/10.31548/energiya3(67).2023.100).

Almomani, F. (2020). Prediction of biogas production from chemically treated co-digested agricultural waste using artificial neural network. *Fuel*, 280, 118573. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118573>.

Bodnar, O., Pampukha, I., Kharabara, V., & Bilyk, O. (2022). A methodical approach to the unified assessment of the degree of professional suitability of conscripts. *Social Development and Security*, 12(5), 21—28. <https://doi.org/10.33445/sds.2022.12.5.3>.

Cross Validation in Machine Learning. (2025). *GeeksforGeeks*. Взято з <https://www.geeksforgeeks.org/machine-learning/cross-validation-machine-learning/>.

Cross-validation. (2023). *Kaggle Learn*. Взято з <https://www.kaggle.com/code/alexisbcook/cross-validation>.

Cross-validation: evaluating estimator performance. (2025). *Scikit-learn Documentation*. Взято з [https://scikit-learn.org/stable/modules/cross\\_validation.html](https://scikit-learn.org/stable/modules/cross_validation.html).

De Clercq, D., Wen, Z., Gottfried, O., Schmidt, F., & Fei, F. (2019). Machine learning powered software for accurate prediction of biogas production: A case study on industrial-scale Chinese production data. *Journal of Cleaner Production*, 218, 390—399. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.031>.

Gaida, R. (2023). *Application of Machine Learning in Biogas Process*: магістерська робота. University of South-Eastern Norway, Норвегія.

Guide to Confusion Matrices & Classification Performance Metrics. (2022). *Towards Data Science*. Взято з <https://towardsdatascience.com/guide-to-confusion-matrices-classification-performance-metrics-a0ebfc08408e>.

How can I quantify Biogas produced before and after treatment? Where can I get an anaerobic digester fitted with quantifying device? (2025). *ResearchGate*. Взято з [https://www.researchgate.net/post/How\\_can\\_I\\_quantify\\_Biogas\\_produced\\_before\\_and\\_after\\_treatment\\_Where\\_can\\_I\\_get\\_an\\_anaerobic\\_digester\\_fitted\\_with\\_quantifying\\_device](https://www.researchgate.net/post/How_can_I_quantify_Biogas_produced_before_and_after_treatment_Where_can_I_get_an_anaerobic_digester_fitted_with_quantifying_device).

How to interpret a confusion matrix for a machine learning model. (2025). *EvidentlyAI*. Взято з <https://www.evidentlyai.com/classification-metrics/confusion-matrix>.

How to Utilize Random Forest for Geospatial Precision Agriculture, Step-by-Step Guide. (2025). *Towards AI*. Взято з <https://pub.towardsai.net/how-to-utilize-random-forest-for-geospatial-precision-agriculture-step-by-step-guide-0cc5df934b5c>.

IBM. (2025). What is Random Forest? *IBM Think*. Взято з <https://www.ibm.com/think/topics/random-forest>.

Is feature importance in Random Forest useless. (2025). *Cross Validated Stack Exchange*. Взято з <https://stats.stackexchange.com/questions/450703/is-feature-importance-in-random-forest-useless>.

NumberAnalytics. (2025). Unlocking Desirability in Operations Research. Взято з <https://www.numberanalytics.com/blog/ultimate-guide-desirability-function-operations-research>.

Paul, J., Verleysen, M., & Dupont, P. (2013). *Identification of statistically significant features from random forests*. Взято з [https://webperso.info.ucl.ac.be/~pdupont/pdupont/pdf/Paul\\_StatRelevantFeaturesRF\\_COPEM\\_13.pdf](https://webperso.info.ucl.ac.be/~pdupont/pdupont/pdf/Paul_StatRelevantFeaturesRF_COPEM_13.pdf).

Permutation feature importance. (2024). *Scikit-learn Documentation*. Взято з [https://scikit-learn.org/stable/modules/permutation\\_importance.html](https://scikit-learn.org/stable/modules/permutation_importance.html).

Qomariyah, N., Putra, S. D., Afifah, D. A., Supriyatna, A. R., & Zuriati, Z. (2024). Applying random forest for optimal crop selection to enhance agricultural decision-making. *Proceedings of the 7th International Conference on Applied Engineering (ICAE 2024)*. Atlantis Press.

Random Forests in Machine Learning for Advanced Decision-Making. (2024). *Shelf.io*. Взято з <https://shelf.io/blog/random-forests-in-machine-learning/>.

Rutland, H., You, J., Liu, H., Bull, L., & Reynolds, D. (2023). A systematic review of machine-learning solutions in anaerobic digestion. *Bioengineering*, 10(12), 1410. <https://doi.org/10.3390/bioengineering10121410>.

Tryhuba, I., Tryhuba, A., Hutsol, T., Cieszewska, A., Andrushkiv, O., Glowacki, S., & Sojak, M. (2024). Prediction of biogas production volumes from household organic waste based on machine learning. *Energies*, 17, 1786. <https://doi.org/10.3390/en17071786>.

Wang, Y., Huntington, T., & Scown, C. D. (2021). Tree-based automated machine learning to predict biogas production for anaerobic co-digestion of organic waste. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9(38), 12990—13000.

**BIOTECHNOLOGY IN WHEY PROCESSING: OBTAINING VALUABLE PRODUCTS****I. Lych, H. Stadnik***National University of Food Technologies*

---

**Key words:**

*Whey  
Utilization  
Biotechnology  
Organic acids  
Bioplastic  
Bioethanol  
Environmental safety*

---

**Article history:**

Received 10.09.2025  
Received in revised form  
26.09.2025  
Accepted 10.10.2025

---

**Corresponding author:**

H. Stadnik

**E-mail:**

stadnikgleb@gmail.com

**Citation:** Лич І. В., Стадник Г. В. (2025). Біотехнології в переробці молочної сироватки: отримання цінних продуктів. *Наукові праці НУХТ*, 31(5), 75—91.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-5-8

---

**ABSTRACT**

---

The continuous growth in consumer demand for dairy products drives an increase in milk production, consequently leading to significant volumes of whey — a byproduct of the cheese industry. The high content of organic compounds in whey poses environmental risks while also offering promising biotechnological applications. The composition, properties, and utilization of whey for obtaining valuable biotechnological products, including organic acids, biopolymers, enzymes, bioplastics, and biofuels were explored in this study.

Particular attention was given to the conversion of lactose into lactic acid, a key component in the production of polylactic acid and polyhydroxyalkanoates — bioplastics used in packaging, electronic devices, the agricultural sector, and the chemical industry. The study examined a two-stage process for obtaining poly(3-hydroxybutyrate) using *Lactobacillus* sp. and *Rhodovulum sulfidophilum* DSM-1374, highlighting the industrial feasibility of such methods.

Additionally, the possibilities of using whey as a substrate for bioethanol production were analyzed. Bioethanol is an environmentally friendly alternative fuel that helps reduce greenhouse gas emissions. The efficiency of bioconversion is significantly increased by using specialized yeasts like *Kluyveromyces marxianus* and by the possibility of increasing ethanol yield through lactose concentration via ultrafiltration or reverse osmosis.

The conducted research confirmed that the implementation of effective biotechnological strategies for whey processing has a dual significance: it not only contributes to a significant reduction of its negative environmental impact but also transforms it from a potential pollutant into a valuable raw material for creating new bioproducts, which is key for the development of a sustainable and competitive bioeconomy.

## БІОТЕХНОЛОГІЇ В ПЕРЕРОБЦІ МОЛОЧНОЇ СИРОВАТКИ: ОТРИМАННЯ ЦІННИХ ПРОДУКТІВ

І. В. Лич, Г. В. Стаднік

Національний університет харчових технологій

Безперервне зростання споживчого попиту на молочні продукти зумовлює збільшення виробництва молока та, відповідно, значні обсяги утворення молочної сироватки — побічного продукту сироварної промисловості. Високий вміст органічних сполук у сироватці створює екологічні загрози, проте водночас відкриває перспективи її біотехнологічного використання. У статті розглядаються склад, властивості та можливості утилізації молочної сироватки для отримання цінних біотехнологічних продуктів, зокрема органічних кислот, біополімерів, ферментів, біопластику та біопалива.

Особливу увагу приділено перетворенню лактози на молочну кислоту, яка є ключовим компонентом у виробництві полімолочної кислоти та полігідроксиалканоатів — біопластиків, що використовуються в упаковці, електронних пристроях, аграрному секторі та хімічній промисловості. Розглянуто двоетапний процес отримання полі(3-гідроксибутирату) з використанням *Lactobacillus sp.* та *Rhodovulum sulfidophilum DSM-1374*, що демонструє перспективність таких методів у промислових масштабах.

Крім того, аналізуються можливості використання молочної сироватки як субстрату для виробництва біоетанолу — екологічного альтернативного пального, що сприяє зменшенню викидів парникових газів. Ефективність біоконверсії значно підвищується при використанні спеціалізованих дріжджів *Kluveromyces fragilis* та можливості підвищення виходу етанолу шляхом концентрування лактози через ультрафільтрацію або зворотний осмос.

Проведені дослідження підтверджують, що впровадження ефективних біотехнологічних стратегій переробки молочної сироватки має подвійне значення: воно не лише сприяє значному зменшенню її негативного впливу на довкілля, але й перетворює її з потенційного забруднювача на цінну сировину для створення нових біопродуктів, що має ключове значення для розвитку сталої та конкурентоспроможної біоекономіки.

**Ключові слова:** молочна сироватка, утилізація, біотехнологія, органічні кислоти, біопластик, біоетанол, екологічна безпека.

**Постановка проблеми.** Накопичення молочної сироватки, що утворюється внаслідок молокопереробних технологій, зумовлює серйозне екологічне навантаження. При цьому, навіть за наявності значних концентрацій органічних та неорганічних компонентів, таких як білки, вуглеводи і мінерали, цей побічний продукт здебільшого підлягає утилізації.

Скидання сироватки в навколишнє середовище без належної обробки може спричинити забруднення водойм і ґрунтів через високу біохімічну потребу в кисні. Крім того, обмеженість традиційних методів утилізації сироватки, таких як

кормова або добривна переробка, вимагає пошуку нових підходів до її ефективного використання.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасні біотехнологічні методи дозволяють розглядати молочну сироватку як субстрат для отримання ряду практично цінних продуктів, а саме: молочної кислоти, пропіонової кислоти, лимонної кислоти тощо. Також можливість біоконверсії лактози в молочну кислоту, біополімери та біоетанол відкриває перспективи для її промислового застосування.

Останні дослідження підкреслюють зростаюче розуміння молочної сироватки не лише як побічного продукту, що становить екологічну загрозу, а й як цінного джерела білкових гідролізатів та інших поживних речовин (Perković та ін., 2024). Зокрема, продовжується активне вивчення функціональних властивостей сироваткових білків. Наприклад, встановлено, що  $\beta$ -лактоглобулін здатний зв'язуватися з цинком (Yigit та ін., 2023), а  $\alpha$ -лактоальбумін — з кальцієм, що робить їх важливими компонентами у функціональних харчових продуктах. У напрямку біоконверсії нові підходи демонструють підвищену ефективність, як показано в дослідженні (Gordillo-Andia et al., 2024), де *Enterococcus faecalis* успішно синтезував молочну кислоту з високим виходом на депротейнізованій сироватці, що відкриває нові перспективи для промислового отримання біопродуктів.

Пропоноване дослідження спрямоване на оцінку складу та властивостей молочної сироватки, а також можливостей її утилізації у виробництві біотехнологічних продуктів. Особлива увага приділяється процесам отримання органічних кислот, біопластику та біоетанолу, їх перевагам, обмеженням та перспективам впровадження у промислових масштабах.

**Мета дослідження:** здійснити аналіз останніх досліджень і наукових публікацій щодо переробки молочної сироватки методами біотехнологій.

**Матеріали і методи.** Використані зарубіжні та українські наукові публікації, що містять результати досліджень у сфері біотехнологічної переробки молочної сироватки. Для літературного огляду використовувались статті з відкритих джерел і наукометричних баз даних (Google Scholar, PubMed та ScienceDirect).

**Викладення основних результатів дослідження.** Молоко — це частина універсальної їжі людини впродовж тисячоліть. На відміну від інших ссавців, люди продовжують вживати молоко після періоду лактації. На сьогодні молоко та молочні продукти, такі як сири, йогурти, сухе та ферментоване молоко, маючи високий споживчий попит, займають ключове місце на полицях наших магазинів (Asunis та ін., 2020; Soloshenko, 2020).

Нині виробництво молочних продуктів є викликом для навколишнього середовища, адже призводить до утворення такого побічного продукту, як молочна сироватка. Однак молочну сироватку з практичної точки зору можна розглядати не тільки як забруднювач, а й як джерело білкових гідролізатів та інших поживних речовин (Perković та ін., 2024).

Сироватка — це прозора рідина від жовтуватого до зеленуватого кольору, яку отримують після коагуляції молока як побічний продукт. На основі структури згортання молока сироватку класифікують на солодку і кислу з різним поживним складом і способами виробництва.

Сироватка становить приблизно 85—95% об'єму молока і містить понад 55% поживних речовин молока, серед яких основним компонентом є лактоза, а білки

становлять 20% від загальної кількості білків молока. Окрім цього, молочна сироватка містить неорганічні солі та слідові кількості таких речовин, як молочні і лимонні кислоти, небілкові сполуки азоту (сечовина і сечова кислота) і вітаміни групи В. Порівняльна характеристика компонентів солодкої і кислої сироватки наведена у табл. 1.

*Таблиця 1. Порівняльна характеристика компонентів солодкої та кислої сироватки*

Показник	Солодка сироватка, г/л			Кисла сироватка, г/л		
	[6]	[7]	[8]	[6]	[7]	[8]
pH	5,98	5,9—6,4	—	4,58	4,6—4,7	—
Ліпіди	—	0,2—0,5	0,47	—	0,3	0,18
Білки	5,52	6,5—6,6	5,56	4,5	6,1—6,2	3,02
Зола	5,0	5,0—5,2	4,33	0,4	7,5—7,9	7,42
Загальна кількість твердих речовин	60,0	63,0—70,0	—	60,1	63,0—70,0	—
Лактоза	43,8	46,0—52,0	38,00	40,2	44,0—47,0	38,0
Молочна кислота	0,72	2	0,58	8,64	6,4	8,11
Кальцій	0,414	0,4—0,6	0,34	1,19	6,0—8,0	1,02
Фосфат	—	1,0—3,0	—	—	2,0—4,5	—
Натрій	0,45	—	0,38	0,51	—	0,43
Калій	1,5	—	1,16	1,71	—	1,77
Хлориди	1,06	1,1	0,76	1,02	1,1	1,51

Найбільшу частку об'єму сироватки складає вода. За даними літератури як у кислій, так і у солодкій сироватці вміст води становить ~ 93%.

Слід підкреслити, що надзвичайну цінність у складі сироватки мають сироваткові білки, які вважаються чи не одними з найбільш доступних харчових білків, оскільки є багатим джерелом незамінних амінокислот. Оцінка перетравлюваності незамінних амінокислот (Digestible Indispensable Amino Acid Score) — це показник якості білка, який враховує амінокислотний склад і засвоюваність білка. Встановлено, що сироваткові білки мають високе значення цього показника, що свідчить про добре збалансований профіль незамінних амінокислот, які легко засвоюються та використовуються організмом (Rocha-Mendoza та ін., 2021).

Сироваткові білки складаються з п'яти білкових фракцій, в тому числі: β-лактоглобулін, α-лактоальбумін, бичачий сироватковий альбумін, імуноглобуліни та глікомакропептид. Крім основних білкових фракцій, сироватка також містить мінорні білкові фракції. До них належать лактоферин, лактопероксидаза і лізоцим. Хоча присутні в менших кількостях, вони мають специфічні функції і представляють особливий інтерес для спеціалізованого практичного виробництва (Sharma, 2019). Близько 85% сироваткових білків займають основні білкові фракції, що перераховані вище та відсотковий вміст яких представлено на рис.1 (Rocha-Mendoza та ін., 2021). Біологічні властивості сироваткових білків широко вивчаються та все частіше використовуються у наукових дослідження та застосовуються у різних галузях промисловості.

Бета-лактоглобулін займає найбільшу частку у складі молочної сироватки та є джерелом незамінних і розгалужених амінокислот. Структурні характеристики

$\beta$ -лактоглобуліну надають здатність зв'язуватися з цинком (Yigit та ін., 2023). Також  $\beta$ -лактоглобулін має часткову гомологію послідовності з ретиноз'язувальними білками, що забезпечує можливість зв'язувати ретинол.  $\beta$ -лактоглобулін має властивість зв'язуватися з гідрофобними лігандами, такими як жирні кислоти (Rodzik та ін., 2020), а також модулювати лімфатичні реакції (Akkerman та ін., 2016).

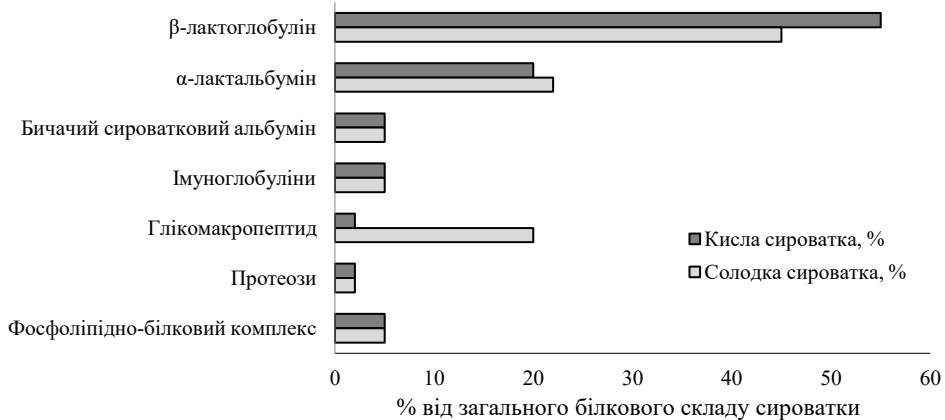


Рис. 1. Склад білкових фракцій кислої та солодкої сироватки

Окрім цього, дослідження показують, що  $\beta$ -лактоглобулін може діяти як молекула-носій, що змінює біодоступність лінолеату та лінолевої кислоти. Він забезпечує стійкість проти травлення в шлунку та дванадцятипалій кишки. Також служить потенційним носієм для доставки в шлунок лабільних гідрофобних препаратів. Таким чином,  $\beta$ -лактоглобулін має великий потенціал, щоб бути білком-кандидатом для безпечної доставки та захисту рН-чутливих ліків у шлунку (Tai та ін., 2016; Świątek та ін., 2019).

Альфа-лактоальбумін посідає друге місце за важливістю у складі молочної сироватки. Має здатність зв'язувати кальцій (Yigit та ін., 2023), володіє антипроліферативними ефектами (Izadi та ін., 2016), також має бактерицидну дію на верхні дихальні шляхи та захисну дію на слизову оболонку шлунку (Mahanta та Paul, 2015).  $\alpha$ -лактоальбумін відіграє важливу роль у протипухлинній дії за рахунок здатності формувати потужні комплекси з олеїновою кислотою, які діють проти злоякісних клітин, але нетоксичні для здорових нормальних клітин (Layman та ін., 2018).

Імуноглобуліни — гамма-глобуліни, що є антитілами, які володіють життєво важливими біологічними властивостями. Численні дослідження довели терапевтичний потенціал імуноглобулінів. *In vitro* дослідження встановило, що IgG, отриманий з коров'ячого молока, пригнічує проліферативну відповідь людських лімфоцитів на Т-клітини у низьких концентраціях (El-Fakharany та ін., 2018). Далі було зроблено висновок, що IgG коров'ячого молока забезпечує імунітет, який передається людям. Попередні дослідження показали, що непастеризоване коров'яче молоко містить специфічні антитіла до ротавірусу людини та проти бактерій, таких як *E. coli*, *Salmonella enteritidis*, *S. typhimurium* і *Shigella flexneri* (Ulfman та ін., 2018; Zhang та ін., 2022). Також вивчаються перспективи виробництва «гіперімунного молока» шляхом імунізації корів специфічними антитілами та приготування

концентрату сироваткового білка для захисту молодих тварин від хвороб. Попередньо було показано, що препарати імунного молока можуть мати терапевтичну цінність проти шлунково-кишкових інфекцій (Abbring та ін., 2019).

Бичачий сироватковий альбумін цінний для споживачів тим, що має здатний оборотно зв'язуватися з різними лігандами, зокрема з жирними кислотами та імуноглобулінами, такими як IgA, IgM, IgG1 та IgG2, що допомагає розвинути пасивний імунітет (Kramski та ін., 2012). Бичачий сироватковий альбумін є багатообіцяючим кандидатом для розробки препаратів ефективною доставки протипухлинних ліків, відповідаючи таким вимогам, як нетоксичність, неімуногенність, здатність до біологічного розкладання, біосумісність і висока здатність зв'язувати ліки (Mopininasab та ін., 2022). Бичачий сироватковий альбумін також володіє антиоксидантною активністю (Solanki та ін., 2021).

Глікомакропептиди також відомі як казеїновий макропептид, що утворюються в сироватці завдяки розщепленню казеїну ферментом хімозином під час виробництва сиру. Глікопептиди містять велику кількість амінокислот з розгалуженим ланцюгом, але не мають ароматичних амінокислот, таких як фенілаланін, триптофан і тирозин. Інша перевага полягає в тому, що їх можна безпечно призначати пацієнтам, які страждають на фенілкетонурію, оскільки вони не містять фенілаланіну. Глікомакропептиди пригнічують секрецію шлункової кислоти та змінюють концентрацію в крові регуляторних травних пептидів (Araua-Sibaja та ін., 2022). Також глікомакропептиди пригнічують адгезію карієогенних бактерій, таких як *Streptococcus mutans*, *Sanguis* і *Sobrinus*, до поверхні ротової порожнини (Montanari та ін., 2022).

Лактоферин — це залізовз'язувальний глікопротеїн, який міститься у кислій та солодкій сироватці у дуже незначних кількостях. Молекули лактоферину термостабільні і стійкі до дії кислот при рН 4; вони також стійкі до дії трипсину і хімотрипсину, але можуть бути гідролізовані пепсином (Córdova-Dávalos та ін., 2019). Його здатність зв'язувати залізо генерує різні біологічні функції, такі як пригнічення росту бактерій і грибків. Лактоферин запобігає перекисному окисненню ліпідів (Wang та ін., 2017). Кілька наукових досліджень показали, що лактоферин при пероральному введенні має ряд корисних впливів на здоров'я людей і тварин, включаючи протиінфекційні, протиракові та протизапальні ефекти (Rascón-Cruz та ін., 2024).

Протеазо-пептонна суміш — це гетерогенна суміш сироваткових білків, що за фізико-хімічними властивостями характеризується термостабільністю та розчинністю в кислому рН-середовищі. Протеозопептон-3 є основним компонентом протеозопептонної суміші, це фосфорильований глікопротеїн з низькомолекулярною фракцією та поверхнево-активними властивостями. У харчовій промисловості існує великий інтерес до протеазопептону-3, оскільки він показав хорошу емульгувальну активність у моделі емульсії «олія у воді», яка використовується в продуктах із соєвою олією та морозиві, а також має гарні піноутворювальні властивості. Цей білок діє як імуномодулятор, антибактеріальний агент, а також пригнічує активність ліпази (Veño та ін., 2024; Innocente та ін., 2015).

Сироваткові білки є багатим джерелом незамінних амінокислот, таких як цистеїн, та амінокислот з розгалуженим ланцюгом, таких як лейцин, ізoleyцин і валін, а також біоактивних пептидів. Лейцин відіграє важливу роль у регулюванні

синтезу білка скелетних м'язів і на 50—75% вище в білках сироватки порівняно з іншими джерелами (León-López та ін., 2022). Сироваткові білки містять сірковмісну амінокислоту цистеїн, яка є попередником глутатіону. Глутатіон — це неферментативний тиол, отриманий з їжі, що діє як антиоксидант. Це допомагає захиститися від хвороб, зменшуючи антиоксидантний стрес і регулюючи клітинні процеси (Chen та ін., 2014).

Лактоза — основний компонент сироватки, що сприяє засвоєнню кальцію, магнію, фосфору та вітаміну С (Tan та ін., 2017). Олігосахариди сироватки мають пребіотичні та протиінфекційні властивості, особливо ті, що містять сіалову кислоту, важливу для розвитку мозку немовлят (Zandona та ін., 2021). Пермеат сироватки, побічний продукт після виділення білків, багатий на молочні олігосахариди, схожі за складом із жіночим молоком, серед яких 3'-сіалілактоза, 6'-сіалілактоза та 6'-сіалілактозамін (Berger та ін., 2022; Cohen та ін., 2017).

Молочні сироваткові концентрати містять цінні ліпідні структури (рис. 2), що підвищують харчову цінність функціональних продуктів (Robinson, 2019).

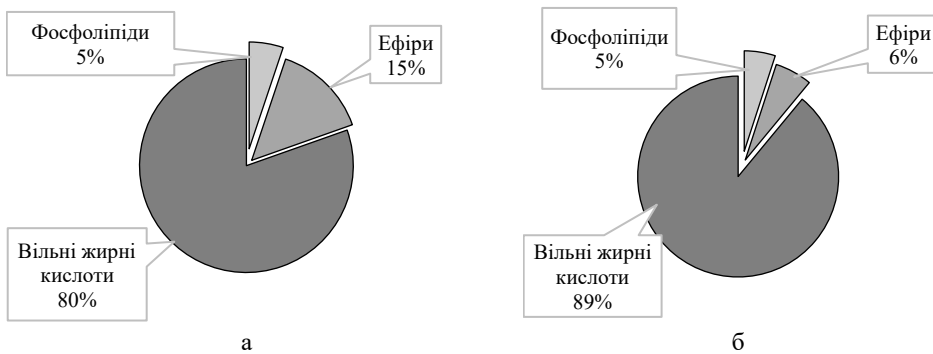


Рис. 2. Ліпідний склад сироватки: а — солодкої; б — кислій

Хоча мінеральні речовини становлять лише невелику частину поживних речовин у сироватці, вони відіграють важливу роль у численних процесах в організмі, включаючи формування структурних компонентів і біохімічних функцій, і тому зустрічаються в різних формах, таких як неорганічні солі та іони або компоненти органічних молекул, наприклад білки. У дослідженні (Sprenger et al., 2023) представлено широкий елементний склад мінеральних речовин (табл. 2), що включає незамінні макро- та мікромінерали, природні мінерали та інші мінерали у слідових кількостях, у молочній сироватці, отриманій з молока корів, буйвола, кіз, овець та одnogорбих верблюдов.

Таблиця 2. Мінеральні речовини сироватки

Назва мінералу	Джерело молочної сироватки				
	корова	буйволиця	коза	вівця	одnogорба верблюдиця
Незамінні макромінерали, мг/кг					
Na	225	380	281	381	483
Mg	48	101	73	85	42
P	287	408	382	503	424

S	99	151	112	189	124
K	962	978	1574	1198	1689
Ca	216	358	213	323	372
Незамінні мікроелементи, мг/кг					
Cr	0,01	0,03	0,01	0,02	0,03
Mn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Fe	0,21	0,27	0,18	0,21	0,31
Cu	0,02	0,03	0,01	0,07	0,02
Zn	0,16	0,25	0,10	0,21	0,27
Природні мінерали, мг/кг					
B	0,09	0,17	0,11	0,15	0,16
Al	0,12	0,36	0,11	0,14	0,17
Si	1,51	1,81	1,47	1,80	1,05
Ti	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
Sr	0,03	0,06	0,04	0,13	0,25
Ba	0,01	0,03	0,02	0,02	0,03
Інші мінерали, мг/кг					
Li	0	0	30	0	100
Ni	67	50	40	60	50
Se	11	17	30	20	20
Mo	89	67	70	60	0

Серед макроелементів Ca, P, Na, K мали найвищі концентрації в сироватці, за ними був S, концентрації якого були менше половини концентрації перших чотирьох елементів. Елементом із найменшою концентрацією в цій групі був Mg. Серед незамінних мікроелементів Fe та Zn мали найвищу концентрацію. Cu, Mn і Cr були присутні в значно менших концентраціях. Серед природних мікроелементів найпоширенішими були Si і Sr, тоді як Al, Ba, B і Ti були присутні в значно менших концентраціях. Серед різних видів молочної сироватки залежно від походження спостерігаються незначні відмінності в елементному складі відповідно.

Хоч і вітамінний вміст у молочній сироватці незначний порівняно з молоком, але, за даними літератури, найбільший вміст у молочній сироватці складають вітаміни групи B, зокрема 55—75% — вітамін B<sub>6</sub> та 40—70% — вітамін B<sub>12</sub>, а також тіамін, нікотинова кислота, фолієва кислота, аскорбінова кислота, рибофлавін і біотин (Akkerman et al., 2016).

Молочна сироватка — субстрат для біотехнологічного синтезу органічних кислот. Виробництво харчових, напоїв і фармацевтичних продуктів потребує хімічних добавок, таких як органічні кислоти (лимонна, молочна, пропіонова), що діють як підкислювачі, стабілізатори й консерванти. Біотехнологічні методи виробництва добавок, зокрема з молочної сироватки, є екологічно перспективними (Menchik et al., 2019).

Молочна кислота має ізомери L(+) і D(-), з яких лише L(+) використовується в харчовій промисловості, а D(-) застосовується для синтезу полімерів та інших хімічних сполук (Pleissner et al., 2019). Молочну кислоту L(+) отримують ферментативно з лактози за допомогою бактерій, грибів і дріжджів (Novik et al., 2017).

Основні продуценти: *Lactobacillus*, *Bifidobacteria*, *Lactococcus*, *Streptococcus*, *Pediococcus*, *Enterococcus*, *Leuconostoc* (Lappa et al., 2019; Lappa et al., 2022; Panghal et al., 2018).

Дослідження (Catone et al., 2021) показало, що штам *Lacticaseibacillus casei* BL71 (табл. 3), отриманий шляхом генної модифікації (інактивація *сррА*), ефективніше синтезує молочну кислоту на основі сироватки. Його продуктивність становить 0,80 г/л·год, що вдвічі перевищує дикий, а через 48 год у ферментаційних колбах рівень лактату був у 8 разів вищим.

Таблиця 3. Характеристика умов проведення та результатів експерименту синтезу молочної кислоти бактеріями *Lacticaseibacillus casei*

Поживне середовище	Умови періодичної ферментації	Умови ферментації у шейкерних колбах	Вихід молочної кислоти	
			Періодична ферментація*	Ферментація у шейкерних колбах*
5% порошок сирної сироватки; 0,6 мМ MgSO <sub>4</sub> ; 0,3 мМ MnSO <sub>4</sub> ; 1 мл/л Tween 80; 50 мМ Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> ; 0,5% дріжджовий екстракт	T = 37 ± 1 °C; рН 7; тривалість 65 год	T=37 ± 1 °C; рН 7; тривалість для BL23 72 год; тривалість для BL71 55 год	BL23 8,13 г/л BL71 9,39 г/л	BL23 27,58 г/л BL71 44,23 г/л
5% порошок сирної сироватки; 0,6 мМ MgSO <sub>4</sub> ; 0,3 мМ MnSO <sub>4</sub> ; 1 мл/л Tween 80; 50 мМ Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> ; 1,5% кукурудзяний екстракт				

\* — наведено результати досліджень з використанням найпродуктивнішого для ферментації середовища сирної сироватки з дріжджовим екстрактом.

У наступному дослідженні використано *Lactobacillus bulgaricus* CGMCC 1.6970 для синтезу молочної кислоти на середовищі з порошковою сирною сироваткою, обробленою протеазами. Максимальний приріст біомаси — 1,56 г/л. Ферментація на сироватці, обробленій нейтральною протеазою, забезпечила вищу концентрацію кислоти (51,14 г/л) порівняно з необробленою (40,23 г/л). Порційна ферментація з підживленням підвищила кінцеву концентрацію до 113,18 г/л при продуктивності 2,36 г/л·год (Liu et al., 2018).

*Lactobacillus debrueckii* та мутантний штам *Lactococcus lactis* TSG3 ефективно синтезували молочну кислоту, послідовно утилізуючи лактозу та галактозу. Кінцевий вихід кислоти — 90 г/л, без залишкової галактози (Sahoo, & Jayaraman, 2019).

*Enterococcus faecalis* синтезував молочну кислоту на протейнізованій і депротейнізованій сироватці (табл. 4). Найвищий вихід (50,61±34,94 г/л) отримано з іммобілізованими клітинами в 5% CaCl<sub>2</sub> та 3% альгінату натрію, при рН 3,5—5 (Gordillo-Andia et al., 2024).

**Таблиця 4. Характеристика умов проведення та результатів експерименту синтезу молочної кислоти бактеріями *Enterococcus faecalis***

Умови культивування	Культуральне середовище	Параметри культивування	Вихід молочної кислоти
Періодична ферментація у суспензії	0,5% дріжджовий екстракт; 0,9676% амонію фосфат; 5 г/л кальцію карбонат; 200 мл депротейнізованої сирної сироватки	32 °С, 120 об/хв, 7 днів	13,09 ± 1,54 г/л при рН 4,90 ± 0,16 після 48 годин культивування
	0,5% дріжджовий екстракт; 0,9676% амонію фосфат; 5 г/л кальцію карбонат; 200 мл протейнізованої сирної сироватки		8,17 г/л при рН 5,3 протягом 24 год культивування
Періодична ферментація з іммобілізованими штамами	Етапи: 1. Культивування у MRS бульйоні при 32 °С і 120 об/хв протягом 24 годин; 2. Центрифугування культуральної маси при 4500 об/хв протягом 20 хв; 3. Промивання осаду трічі сольовим розчином; 4. Додавання 1 мл сольового розчину до осаду біомаси; 5. До 1 мл біомаси додавати 5% кальцію хлорид та 3% розчин натрію альгінат протягом 1 год стабілізації; 6. Промивання альгінатних кульок стерильної дистильованою водою	32 °С, 120 об/хв, 7 днів	6,09 г/л при рН 4,4 після 192 год культивування (протейнізована сироватка)
			50,61 г/л при рН 5,40 після 192 год культивування (депротейнізована сироватка)

Дослідження показали можливість синтезу молочної кислоти дріжджами та грибами. *Saccharomyces cerevisiae*, зазвичай, не зброджує лактозу, проте в (Turner et al., 2017) експресували ген лактатдегідрогенази (*ldhA*) з *Rhizopus oryzae* у *S. cerevisiae*, що містить *cdt-1* та *ghl-1*. Використання грибного *ldhA* було вигідним через його ефективність у нейтральному рН, характерному для дріжджів.

Ген *ldhA* інтегрували у хромосому *S. cerevisiae* за допомогою плазмиди pITy3-*ldhA*-G418. Досліджували два штами: EJ4L (експресує *ldhA*) та контрольний EJ4 (не продукує молочну кислоту). Штам EJ4L забезпечив вихід 0,358 г молочної кислоти/г лактози у середовищі з 80 г/л сироватки без утворення етанолу (табл. 5), доводячи можливість гомоферментативного синтезу кислоти у *S. cerevisiae* без видалення шляху синтезу етанолу.

Пропіонова кислота — це коротколанцюгова жирна кислота, яка використовується в харчовій, фармацевтичній, косметичній і агропромисловості, зокрема як інгібітор цвілі та консервант для продуктів, таких як сири й хлібобулочні вироби. Вона також застосовується у лікуванні тварин і для виробництва парфумів, гербіцидів та ароматизаторів (Duscha et al., 2020; Chen et al., 2021).

Таблиця 5. Характеристика умов проведення та результатів експерименту синтезу молочної кислоти дріжджами *Saccharomyces cerevisiae*

Поживне середовище	Умови ферментації	Вихід молочної кислоти	Продуктивність
Пептон-декстрозне середовище з дріжджовим екстрактом; 80 г/л сироватки з бичачого молока (~ 50 г/л вільної лактози); 35 г/л карбонату кальцію	Тривалість 100 год; рН 5,0	0,358 г молочної кислоти/г лактози	0,17 г/л·год

Дослідження (Jiang et al., 2015) показало, що сироваткова лактоза є придатною для виробництва пропіонової кислоти бактеріями *Propionibacterium acidipropionici* (табл. 6). Порівняно з ферментацією вільними клітинами, іммобілізовані клітини на обробленому поліетиленіміном Poraver (PEI-Poraver) в біореакторі дали вищу продуктивність і вихід пропіонової кислоти. *P. acidipropionici* накопичував високі рівні трегалози у відповідь на кислотний стрес. Мутант з посиленням синтезом трегалози досягнув максимальної концентрації пропіонової кислоти 135±6,5 г/л, що є однією з найвищих концентрацій.

Таблиця 6. Характеристика умов проведення та результатів експерименту синтезу пропіонової кислоти бактеріями *Propionibacterium acidipropionici*

Поживне середовище	Умови ферментації	Вихід молочної кислоти	Продуктивність
10 г/л дріжджового екстракту; 5 г/л триптикази; 0,25 г/л $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ; 0,05 г/л $\text{MnSO}_4$ ; 30—50 г/л лактози у сироватки	Періодична ферментація сироваткової лактози з вільними клітинами рН 6,0; 132 ± 10 год	27 ± 1,6 г/л	0,20 г/л·год
	Періодична ферментація сироваткової лактози з іммобілізованими клітинами в біореакторі рН 6,0; 58 ± 4 год	32,4 ± 1,4 г/л	0,56 г/л·год

Лимонна кислота є комерційно цінним продуктом, який використовується головним чином у харчовій, фармацевтичній/хімічній, текстильній і гальванічній промисловості. Ця сполука в основному виробляється шляхом мікробної ферментації на різних типах поживного середовища, включаючи сироватку. У дослідженні (Ağslan, Aydoğan, & Taskin, 2016) було отримано лимонну кислоту з частково депротейнізованої сирної сироватки у нестерильних умовах культивування з використанням іммобілізованих клітин адаптованих до холоду та лактозопозитивних дріжджів *Yarrowia lipolytica* B9. Встановлено найбільш оптимальні умови культивування для максимальної продуктивності дріжджів *Yarrowia lipolytica* B9, що наведено у табл. 7. Варто зауважити, що додаткові джерела нітрогену та фосфору, такі як амонію сульфат і калію дигідрогенфосфат, призводили до зниження концентрації синтезу молочної кислоти. Іммобілізовані клітини дріжджів *Yarrowia lipolytica* B9 отримали шляхом виробництва альгінатних кульок.

Молочна сироватка є перспективним субстратом для виробництва біопластику, оскільки лактозу можна перетворити на полігідроксиалканоати та полімолочну кислоту. Біопластик використовується в упаковці, електроніці, сільському господарстві та хімічній промисловості.

**Таблиця 7. Характеристика умов проведення та результатів експерименту синтезу лимонної кислоти дріжджами *Yarrowia lipolytica***

Середовище	Умови культивування	Вихід молочної кислоти
Частково депротейнізована сироватка з вмістом лактози 20 г/л; Альгінат натрію 2%	Шейкер-інкубатор; 150 гртм; 150 кульок/100 мл; температура 20 °С; рН 5,5; тривалість культивування 120 год	33,3 г/л

Однією з основ біопластику є полі(3-гідроксибутират), який синтезують у двоетапному процесі: бактерії *Lactobacillus sp.* перетворюють лактозу на молочну кислоту, а *Rhodovulum sulfidophilum* далі синтезує біополімер. Попередній гідроліз лактози β-галактозидазою покращував вихід полімеру, який залежно від умов становив 1,18—1,27 г/л.

У (Fradinho, Oehmen, & Reis, 2019) розглянуто фототрофний синтез полігідроксиалканоатів для зниження витрат. Використання фототрофних змішаних культур у безаераційному середовищі з ферментованою сироваткою забезпечило вихід гідроксивалеріату на рівні 12% загального полімеру. Більш детальний опис даного експерименту та результати представлено у табл. 8.

**Таблиця 8. Характеристика умов проведення та результатів експерименту синтезу полі(3-гідроксибутирату) бактеріями *Lactobacillus sp.* та *Rhodovulum sulfidophilum***

Поживне середовище	Умови ферментації	Вихід цільового продукту
<i>Перший етап</i>		
Охoid пептон —10 г/л; Lab-Lemco (Oxoid) —10 г/л; Дріжджовий екстракт — 5 г/л; Сирна сироватка, попередньо оброблена при температурі 121 °С протягом 20 хв; Твін 80 — 1 мл/л; K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> —2 г/л; CH <sup>3</sup> COONa·3H <sub>2</sub> O —5 г/л; Триамонію цитрат —2 г/л; MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O —200 мг/л; MgSO <sub>4</sub> ·4H <sub>2</sub> O —50 мг/л	1. Рідку фазу сирної сироватки після обробки розводили деіонізованою водою у співвідношенні 50:50 та використовували для живлення <i>Lactobacillus sp.</i> , який культивували у темному ферментері. 2. Початковий інокулят (100 мл <i>Lactobacillus</i> ), використаний для темної ферментації попередньо культивували протягом 24 год у наведеному середовищі. 3. У період з 8:00 до 18:00 підтримували постійне значення рН на рівні 7,0 за допомогою КОН; у нічний час (з 18:00 до 8:00) рН не змінювався. 4. Температура культивування становила 37±0,5 °С. 5. Використовували темний ферментер об'ємом 2,5 л з магнітною мішалкою (200 об/хв). 6. Культивували до моменту повного виснаження лактози з молочної сироватки.	29,5 ± 1,3 г/л молочної кислоти

Другий етап		
Молочна кислота — 2 г/л; KН <sub>2</sub> РO <sub>4</sub> — 0,5 г/л; MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O — 0,4 г/л; NH <sub>4</sub> Cl — 0,4 г/л; CaCl <sub>2</sub> — 0,05 г/л; Дріжджовий екстракт — 0,3 г/л; 0,1% водний розчин заліза (III) цитрату; 0,4 мл/л розчину вітаміну В <sub>12</sub> (10 мг у 100 мл води) ; 1 мл/л розчину слідових елементів	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Первинне вирощування культури на вказаному середовищі;</li> <li>2. Культивування в культуральному бульйоні з розведеною деіонізованою водою сирною сироваткою у співвідношенні 50:50;</li> <li>3. Культивування здійснювали у двох режимах — напівбезперервний і періодичний;</li> <li>4. Використовували лопатевий фотобіореактор;</li> <li>5. Значення рН підтримували на рівні 6,8;</li> <li>6. Швидкість перемішування — 170 об/хв;</li> <li>7. Процес фотоферментації завершували при повному виснаженні молочної кислоти</li> </ol>	Найбільший вихід полі-3-гідроксибутирату становив 1685 мг/л при періодичному культивуванні

Молочна сироватка є перспективним джерелом для виробництва біоетанолу — екологічно чистого палива. Використання сироватки допомагає зменшити промислові відходи, хоча її ефективність поступається традиційним джерелам (цукровій тростині, кукурудзі). Пряме бродиння є економічно не вигідним через низький вміст лактози, але концентрація сироватки за допомогою ультрафільтрації покращує вихід біоетанолу.

У (Gabardo, Rech, Rosa, & Ayub, 2014) досліджено біоконверсію сироватки в етанол із використанням *Kluyveromyces marxianus*, іммобілізованих в альгінаті кальцію. Експерименти проводили в періодичному та безперервному режимах, аналізуючи вплив швидкості розведення та концентрації субстрату.

У табл. 9 наведено зведені дані, що стосуються синтезу органічних кислот, біополімерів і біоетанолу біотехнологічним шляхом з використанням сироватки як джерела субстрату за результатами огляду літератури.

Таблиця 9. Характеристика шляхів утилізації молочної сироватки мікроорганізмами

Мікроорганізм	Вихід цільового продукту, г/л	Продуктивність, г/(л·год)	Література
<i>Молочна кислота</i>			
<i>Lactocaseibacillus casei</i> BL71	44,23	—	[51]
<i>Lactobacillus bulgaricus</i> CGMCC 1.6970	113,18	2,36	[52]
<i>Lactobacillus debrueckii</i> , <i>Lactococcus lactis</i> TSG3	90,0	—	[53]
<i>Enterococcus faecalis</i>	50,61	—	[54]
<i>Lb. rhamnosus</i> PCM 489	27,5	—	[68]
<i>Bacillus coagulans</i> A534	40,5	7,31	[69]
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	0,358 г молочної кислоти/г лактози	0,17	[55]
<i>Пропіонова кислота</i>			
<i>Propionibacterium acidipropionici</i>	32,4	0,56	[56]
<i>Лимонна кислота</i>			
<i>Yarrowia lipolytica</i> B9	33,3	—	[57]

<i>Поли(3-гідроксибутират)</i>			
<i>Lactobacillus</i> sp. <i>Rhodovulum sulfidophilum</i>	1,685	—	[58]
<i>Поли(3-гідроксибутират-ко-3-гідроксивалерат)</i>			
<i>Haloferax mediterranei</i>	1,18—1,27	—	[59]
<i>Біоетанол</i>			
<i>Kluyveromyces marxianus</i>	70,4	6,01	[63]
<i>K. marxianus</i> Y00963	3,5%	62,33%	[64]
<i>K. marxianus</i> Y00963, <i>S. cerevisiae</i>	7,3%	70,35%	[64]
<i>E.coli</i>	4,64%	—	[65]

## Висновки

Сучасна харчова промисловість стикається з необхідністю впровадження ефективних стратегій поводження з побічними продуктами, серед яких молочна сироватка займає особливе місце через високий вміст цінних органічних та мінеральних компонентів. Інноваційні біотехнологічні підходи дозволяють перетворювати цей ресурс на основу для виробництва функціонально значущих сполук, таких як молочна кислота, пропіонова кислота, лимонна кислота та інші.

Біотехнологічні трансформації сироватки відкривають можливості для отримання не тільки органічних кислот, а також біополімерів та енергетично цінних продуктів, серед яких біоетанол, що дозволяє інтегрувати відходи у замкнені цикли виробництва і забезпечує стале використання ресурсів.

Подальший розвиток біотехнологій утилізації молочної сироватки потребує підбору оптимального складу поживного середовища на основі молочної сироватки, підбору мікроорганізмів і технологічних схем, масштабування процесів і стандартизації умов ферментації для забезпечення високого виходу та стабільності кінцевих продуктів.

Отже, сироватка є важливим ресурсом для досягнення цілей сталого розвитку і принципів кругової економіки, зокрема для мінімізації відходів та підтримки ресурсоефективного виробництва.

## Література

Abbring, S., Hols, G., Garssen, J., & van Esch, B. C. A. M. (2019). Raw cow's milk consumption and allergic diseases — The potential role of bioactive whey proteins. *European journal of pharmacology*, 843, 55—65. <https://doi.org/10.1016/j.ejphar.2018.11.013>.

Akkerman, M., Rauh, V. M., Christensen, M., Johansen, L. B., Hammershøj, M., & Larsen, L. B. (2016). Effect of heating strategies on whey protein denaturation — Revisited by liquid chromatography quadrupole time-of-flight mass spectrometry. *Journal of dairy science*, 99(1), 152—166. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-9924>.

Araya-Sibaja, A. M., Wilhelm-Romero, K., Quirós-Fallas, M. I., Vargas Huertas, L. F., Vega-Baudrit, J. R., & Navarro-Hoyos, M. (2022). Bovine Serum Albumin-Based Nanoparticles: Preparation, Characterization, and Antioxidant Activity Enhancement of Three Main Curcuminoids from *Curcuma longa*. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 27(9), 2758. <https://doi.org/10.3390/molecules27092758>.

Arslan, N. P., Aydogan, M. N., & Taskin, M. (2016). Citric acid production from partly deproteinized whey under non-sterile culture conditions using immobilized cells of lactose-positive and cold-

adapted *Yarrowia lipolytica* B9. *Journal of biotechnology*, 231, 32—39. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2016.05.033>.

Asunis, F., De Gioannis, G., Dessi, P., Isipato, M., Lens, P. N. L., Muntoni, A., ..., Spiga, D. (2020). The dairy biorefinery: Integrating treatment processes for cheese whey valorisation. *Journal of environmental management*, 276, 111240. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111240>.

Beño, F., Velková, A., Hruška, F., & Ševčík, R. (2024). Use of Lactoperoxidase Inhibitory Effects to Extend the Shelf Life of Meat and Meat Products. *Microorganisms*, 12(5), 1010. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12051010>.

Berger, P. K., Bansal, R., Sawardekar, S., Yonemitsu, C., Furst, A., Hampson, H. E., Schmidt, K. A., ..., Peterson, B. S. (2022). Associations of Human Milk Oligosaccharides with Infant Brain Tissue Organization and Regional Blood Flow at 1 Month of Age. *Nutrients*, 14(18), 3820. <https://doi.org/10.3390/nu14183820>.

Catone, M. V., Palomino, M. M., Legisa, D. M., Fina Martin, J., Monedero García, V., Ruzal, S. M., & Allievi, M. C. (2021). Lactic acid production using cheese whey based medium in a stirred tank reactor by a *ccpA* mutant of *Lactocaseibacillus casei*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 37(4). <https://doi.org/10.1007/s11274-021-03028-z>.

Chen, W. C., Huang, W. C., Chiu, C. C., Chang, Y. K., & Huang, C. C. (2014). Whey protein improves exercise performance and biochemical profiles in trained mice. *Medicine and science in sports and exercise*, 46(8), 1517—1524. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000272>.

Chen, Y., Zhang, X., & Chen, Y. (2021). Propionic acid-rich fermentation (PARF) production from organic wastes: A review. *Bioresource technology*, 339, 125569. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125569>.

Cohen, J. L., Barile, D., Liu, Y., & de Moura Bell, J. M. L. N. (2017). Role of pH in the recovery of bovine milk oligosaccharides from colostrum whey permeate by nanofiltration. *International dairy journal*, 66, 68—75. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2016.10.016>.

Córdova-Dávalos, L. E., Jiménez, M., & Salinas, E. (2019). Glycomacropptide Bioactivity and Health: A Review Highlighting Action Mechanisms and Signaling Pathways. *Nutrients*, 11(3), 598. <https://doi.org/10.3390/nu11030598>.

Duscha, A., Gisevius, B., Hirschberg, S., Yissachar, N., Stangl, G. I., Dawin, E., ..., Haghikia, A. (2020). Propionic Acid Shapes the Multiple Sclerosis Disease Course by an Immunomodulatory Mechanism. *Cell*, 180(6), 1067—1080.e16. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2020.02.035>.

El-Fakharany, E. M., Abu-Serie, M. M., Litus, E. A., Permyakov, S. E., Permyakov, E. A., Uversky, V. N., & Redwan, E. M. (2018). The Use of Human, Bovine, and Camel Milk Albumins in Anti-cancer Complexes with Oleic Acid. *The protein journal*, 37(3), 203—215. <https://doi.org/10.1007/s10930-018-9770-1>.

Fradinho, J. C., Oehmen, A., & Reis, M. A. M. (2019). Improving polyhydroxyalkanoates production in phototrophic mixed cultures by optimizing accumulator reactor operating conditions. *International journal of biological macromolecules*, 126, 1085—1092. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.270>.

Gabardo, S., Rech, R., Rosa, C. A., & Ayub, M. A. Z. (2014). Dynamics of ethanol production from whey and whey permeate by immobilized strains of *Kluyveromyces marxianus* in batch and continuous bioreactors. *Renewable Energy*, 69, 89—96. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.03.023>.

Gordillo-Andia, C., Almirón, J., Barrera-Del-Carpio, J. E., Roudet, F., Tupayachy-Quispe, D., Vargas, M. (2024). Influence of *Kluyveromyces lactis* and *Enterococcus faecalis* on Obtaining Lactic Acid by Cheese Whey Fermentation. *Appl. Sci.*, 14, 4649. <https://doi.org/10.3390/app14114649>.

Innocente, N., Biasutti, M., & Blecker, C. (2015). HPLC profile and dynamic surface properties of the proteose-peptone fraction from bovine milk and from whey protein concentrate. *International Dairy Journal*, 21(4), 222—228. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2010.11.004>.

Izadi, Z., Divsalar, A., Saboury, A. A., & Sawyer, L. (2016). beta-lactoglobulin-pectin Nanoparticle-based Oral Drug Delivery System for Potential Treatment of Colon Cancer. *Chemical biology & drug design*, 88(2), 209—216. <https://doi.org/10.1111/cbdd.12748>.

Jiang, L., Cui, H., Zhu, L., Hu, Y., Xu, X., Li, S., & Huang, H. (2015). Enhanced propionic acid production from whey lactose with immobilized *Propionibacterium acidipropionici* and the role of

- trehalose synthesis in acid tolerance. *Green Chemistry*, 17(1), 250—259. <https://doi.org/10.1039/c4gc01256a>.
- Kramski, M., Center, R. J., Wheatley, A. K., Jacobson, J. C., Alexander, M. R., Rawlin, G., & Purcell, D. F. (2012). Hyperimmune bovine colostrum as a low-cost, large-scale source of antibodies with broad neutralizing activity for HIV-1 envelope with potential use in microbicides. *Antimicrobial agents and chemotherapy*, 56(8), 4310—4319. <https://doi.org/10.1128/AAC.00453-12>.
- Lappa, I. K., Kachrimanidou, V., Alexandri, M., Papadaki, A., & Kopsahelis, N. (2022). Novel Probiotic/Bacterial Cellulose Biocatalyst for the Development of Functional Dairy Beverage. *Foods (Basel, Switzerland)*, 11(17), 2586. <https://doi.org/10.3390/foods11172586>.
- Lappa, I. K., Papadaki, A., Kachrimanidou, V., Terpou, A., Koulougliotis, D., Eriotou, E., & Kopsahelis, N. (2019). Cheese Whey Processing: Integrated Biorefinery Concepts and Emerging Food Applications. *Foods (Basel, Switzerland)*, 8(8), 347. <https://doi.org/10.3390/foods8080347>.
- Layman, D. K., Lönnerdal, B., & Fernstrom, J. D. (2018). Applications for alpha-lactalbumin in human nutrition. *Nutrition reviews*, 76(6), 444—460. <https://doi.org/10.1093/nutrit/nuy004>.
- León-López, A., Pérez-Marroquín, X. A., Estrada-Fernández, A. G., Campos-Lozada, G., Morales-Peñaloza, A., Campos-Montiel, R. G., & Aguirre-Álvarez, G. (2022). Milk Whey Hydrolysates as High Value-Added Natural Polymers: Functional Properties and Applications. *Polymers*, 14(6), 1258. <https://doi.org/10.3390/polym14061258>.
- Liu, P., Zheng, Z., Xu, Q., Qian, Z., Liu, J., & Ouyang, J. (2018). Valorization of dairy waste for enhanced D-lactic acid production at low cost. *Process Biochemistry*, 71, 18—22. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2018.05.014>.
- Mahanta, S., & Paul, S. (2015). Stable Self-Assembly of Bovine alpha-Lactalbumin Exhibits Target-Specific Antiproliferative Activity in Multiple Cancer Cells. *ACS applied materials & interfaces*, 7(51), 28177—28187. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b06076>.
- Menchik, P., Zuber, T., Zuber, A., & Moraru, C. I. (2019). Short communication: Composition of coproduct streams from dairy processing: Acid whey and milk permeate. *Journal of dairy science*, 102(5), 3978—3984. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15951>.
- Monirinasab, H., Zakariazadeh, M., Kohestani, H., Kouhestani, M., & Fathi, F. (2022). Study of beta-lactam-based drug interaction with albumin protein using optical, sensing, and docking methods. *Journal of biological physics*, 48(2), 177—194. <https://doi.org/10.1007/s10867-021-09599-0>.
- Montanari, C., Ceccarani, C., Corsello, A., Zuvadelli, J., Ottaviano, E., Dei Cas, M., Banderali, ..., Verduci, E. (2022). Glycomacropptide Safety and Its Effect on Gut Microbiota in Patients with Phenylketonuria: A Pilot Study. *Nutrients*, 14(9), 1883. <https://doi.org/10.3390/nu14091883>.
- Novik, G., Meerovskaya, O., & Savich, V. (2017). Waste Degradation and Utilization by Lactic Acid Bacteria: Use of Lactic Acid Bacteria in Production of Food Additives, Bioenergy and Biogas. *Food Additives*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.69284>.
- Panghal, A., Patidar, R., Jaglan, S., Chhikara, N., Khatkar, S. K., Gat, Y., & Sindhu, N. (2018). Whey valorization: current options and future scenario — a critical review. *Nutrition & Food Science*, 48(3), 520—535. <https://doi.org/10.1108/nfs-01-2018-0017>.
- Perković, G., Martinović, J., Šelo, G., Bucić-Kojić, A., Planinić, M., & Ambrus, R. (2024). Characterization of Grape Pomace Extract Microcapsules: The Influence of Carbohydrate Co-Coating on the Stabilization of Goat Whey Protein as a Primary Coating. *Foods (Basel, Switzerland)*, 13(9), 1346. <https://doi.org/10.3390/foods13091346>.
- Pleissner, D., Dietz, D., van Duuren, J. B. J. H., Wittmann, C., Yang, X., Lin, C. S. K., & Venus, J. (2019). Biotechnological Production of Organic Acids from Renewable Resources. *Advances in biochemical engineering/biotechnology*, 166, 373—410. [https://doi.org/10.1007/10\\_2016\\_73](https://doi.org/10.1007/10_2016_73).
- Rascón-Cruz, Q., Siqueiros-Cendón, T. S., Síañez-Estrada, L. I., Villaseñor-Rivera, C. M., Ángel-Lerma, L. E., Olivás-Espino, J. A., León-Flores, D. B., Espinoza-Sánchez, E. A., Arévalo-Gallegos, S., & Iglesias-Figueroa, B. F. (2024). Antioxidant Potential of Lactoferrin and Its Protective Effect on Health: An Overview. *International journal of molecular sciences*, 26(1), 125. <https://doi.org/10.3390/ijms26010125>.

Robinson, R. C. (2019). Structures and Metabolic Properties of Bovine Milk Oligosaccharides and Their Potential in the Development of Novel Therapeutics. *Frontiers in nutrition*, 6, 50. <https://doi.org/10.3389/fnut.2019.00050>.

Rocha-Mendoza, D., Kosmerl, E., Krentz, A., Zhang, L., Badiger, S., Miyagusuku-Cruzado, G., Mayta-Apaza, A., Giusti, M., Jiménez-Flores, R., & García-Cano, I. (2021). Invited review: Acid whey trends and health benefits. *Journal of Dairy Science*, 104(2), 1262—1275. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19038>.

Rodzik, A., Pomastowski, P., Sagandykova, G. N., & Buszewski, B. (2020). Interactions of Whey Proteins with Metal Ions. *International journal of molecular sciences*, 21(6), 2156. <https://doi.org/10.3390/ijms21062156>.

Sahoo, T. K., & Jayaraman, G. (2019). Co-culture of *Lactobacillus delbrueckii* and engineered *Lactococcus lactis* enhances stoichiometric yield of D-lactic acid from whey permeate. *Applied microbiology and biotechnology*, 103(14), 5653—5662. <https://doi.org/10.1007/s00253-019-09819-7>.

Sharma, R. (2019). Whey Proteins in Functional Foods. In *Whey Proteins* (pp. 637—663). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812124-5.00018-7>.

Solanki, R., Rostamabadi, H., Patel, S., & Jafari, S. M. (2021). Anticancer nano-delivery systems based on bovine serum albumin nanoparticles: A critical review. *International journal of biological macromolecules*, 193 (Pt A), 528—540. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.10.040>.

Soloshenko, K. I., Lych, I. V., Voloshyna, I. M., Shkotova, L. V. (2020). Polyfunctional properties of goat colostrum proteins and their use. *Biopolymers and Cell*, 36(3), 197—209. <https://doi.org/10.7124/bc.000A2B>.

Sprenger, R. R., Ostefeld, M. S., Bjørnshave, A., Rasmussen, J. T., & Ejsing, C. S. (2023). Lipidomic Characterization of Whey Concentrates Rich in Milk Fat Globule Membranes and Extracellular Vesicles. *Biomolecules*, 14(1), 55. <https://doi.org/10.3390/biom14010055>.

Świątek, S., Komorek, P., Turner, G., & Jachimska, B. (2019). beta-Lactoglobulin as a potential carrier for bioactive molecules. *Bioelectrochemistry (Amsterdam, Netherlands)*, 126, 137—145. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2018.12.006>.

Tai, C. S., Chen, Y. Y., & Chen, W. L. (2016). beta-Lactoglobulin Influences Human Immunity and Promotes Cell Proliferation. *BioMed research international*, 2016, 7123587. <https://doi.org/10.1155/2016/7123587>.

Tan, B. L., & Norhaizan, M. E. (2017). Scientific Evidence of Rice By-Products for Cancer Prevention: Chemopreventive Properties of Waste Products from Rice Milling on Carcinogenesis In Vitro and In Vivo. *BioMed research international*, 2017, 9017902. <https://doi.org/10.1155/2017/9017902>.

Turner, T. L., Kim, E., Hwang, C., Zhang, G. C., Liu, J. J., & Jin, Y. S. (2017). Short communication: Conversion of lactose and whey into lactic acid by engineered yeast. *Journal of dairy science*, 100(1), 124—128. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11784>.

Ulfman, L. H., Leusen, J. H. W., Savelkoul, H. F. J., Warner, J. O., & van Neerven, R. J. J. (2018). Effects of Bovine Immunoglobulins on Immune Function, Allergy, and Infection. *Frontiers in nutrition*, 5, 52. <https://doi.org/10.3389/fnut.2018.00052>.

Wang, B., Timilsena, Y. P., Blanch, E., & Adhikari, B. (2017). Characteristics of bovine lactoferrin powders produced through spray and freeze drying processes. *International journal of biological macromolecules*, 95, 985—994. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.10.087>.

Yiğit, A., Bielska, P., Cais-Sokolińska, D., & Samur, G. (2023). Whey proteins as a functional food: Health effects, functional properties, and applications in food. *Journal of the American Nutrition Association*, 42(8), 758—768. <https://doi.org/10.1080/27697061.2023.2169208>.

Zandona, E., Blažič, M., & Režek Jambak, A. (2021). Whey Utilization: Sustainable Uses and Environmental Approach. *Food technology and biotechnology*, 59(2), 147—161. <https://doi.org/10.17113/ftb.59.02.21.6968>.

Zhang, J., Chen, Q., Zhou, Y., Zhang, Y., Ren, Y., & Liu, L. (2022). Characterization and determination of bovine immunoglobulin G subtypes in milk and dairy products by UPLC-MS. *Food chemistry*, 390, 133170. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133170>.

## MODERN METHODS OF TESTING THE GENOMODULAR EFFECT OF BIOLOGICALLY ACTIVE SUBSTANCES

O. Yamkovyi<sup>1</sup>, L. Butsenko<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National University of Food Technologies

<sup>2</sup>Zabolotny Institute of Microbiology and Virology, NAS of Ukraine

---

**Key words:**

*Biosafety*  
*Biotesting*  
*Genotoxicity*  
*Mutagenicity*  
*Chromosomal aberrations*

**Article history:**

Received 12.09.2025

Received in revised form  
29.09.2025

Accepted 14.10.2025

**Corresponding author:**

O. Yamkovyi

**E-mail:**

jamkovoya@gmail.com

**Citation:** Ямковий О. О., Буценко Л. М. (2025). Сучасні методи тестування геномодулювальної дії біологічно активних речовин. *Наукові праці НУХТ*, 31(5), 92—110.  
DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-5-9

---

**ABSTRACT**

Modern biotechnology enables the production of numerous substances, which are widely used in the treatment and satisfaction of human nutritional needs, in cosmetics, or in functional products, to improve the quality of human life, increase the productivity of animal and plant husbandry. Biologically active products of biotechnology come into contact with living organisms during use, and therefore must undergo a comprehensive study of their potentially hazardous activity. It is known that biologically active products can have a genomodulatory effect on living organisms, both directly affecting genetic structures and inducing the appearance of mediators of genomodulatory activity in living organisms. A wide range of genomodulatory effects of biotechnology products requires careful selection of test systems and organisms to assess their impact on the genome.

Modern approaches to testing the genomodulatory effects of biologically active products were highlighted in this paper. It is shown that prokaryotic and eukaryotic test systems can be used. Prokaryotic test systems allow the recording of effects on DNA sequences and are based on bacterial strains with specific mutations. The mutagenicity of compounds in such tests is determined by the phenotypic change of test objects, which is a manifestation of mutations in special genes. The main disadvantage of prokaryotic test systems is the difficulty of extrapolating the obtained results to higher organisms. Among plant test systems, various species of *Allium*, *Crepis*, *Hordeum*, *Lycopersicon*, *Pisum*, *Tradescantia*, and *Zea* are commonly used as test objects. Such tests are based on the determination of certain classes of chromosomal aberrations and mutations. The best testing results are obtained by combining several test systems.

## СУЧАСНІ МЕТОДИ ТЕСТУВАННЯ ГЕНОМОДУЛЮВАЛЬНОЇ ДІЇ БІОЛОГІЧНО АКТИВНИХ РЕЧОВИН

О. О. Ямковий<sup>1</sup>, Л. М. Буценко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Національний університет харчових технологій

<sup>2</sup>Інститут мікробіології і вірусології ім. Д. К. Заболотного НАН України

Сучасна біотехнологія дозволяє отримувати широкий асортимент біологічно активних речовин, що широко застосовується в лікуванні й задоволенні харчових потреб людей, у косметичних засобах чи функціональних продуктах, для покращення якості життя людини, підвищення продуктивності тваринництва і рослинництва. Зазвичай, біологічно активні продукти біотехнологій контактують під час використання з живими організмами, а тому обов'язково мають проходити різнобічне дослідження їхньої можливої небезпечної активності. Відомо, що біологічно активні речовини можуть чинити геномодулювальний вплив на всі живі організми як безпосередньо впливаючи на генетичні структури, так і індуючи появу в живих організмів медіаторів геномодулювальної активності. Широкий спектр геномодулювальних ефектів продуктів біотехнології вимагає ретельного добору тест-систем і тест-організмів для оцінки їх впливу на геном.

Висвітлено сучасні підходи до тестування геномодулювальної дії біологічно активних речовин. Показано, що для тестування можуть бути задіяні прокаріотичні й еукаріотичні тест-системи. Прокаріотичні тест-системи дозволяють фіксувати вплив на послідовність молекул ДНК, а їх основу становлять бактеріальні штами зі специфічними мутаціями. Мутагенність сполук у таких тестах визначається за фенотиповою зміною тест-об'єктів, що є проявом мутації у спеціальних генах. Головним недоліком прокаріотичних тест-систем є труднощі екстраполяції одержаних результатів на вищі організми. Серед рослинних тест-систем як тест-об'єкти найчастіше використовують різні види *Allium*, *Crepis*, *Hordeum*, *Lycopersicon*, *Pisum*, *Tradescantia* і *Zea*. Такі тести ґрунтуються на визначенні певних класів хромосомних аберацій і мутацій у рослинних клітинах. Найкращі результати тестування отримують за поєднання декількох тест-систем.

**Ключові слова:** біобезпека, біотестування, генотоксичність, мутагенність, хромосомні аберації.

**Постановка проблеми.** Незважаючи на значний прогрес, людство продовжує стикатись з цілою низкою нерозв'язаних проблем. Одними з них є постійний дефіцит безпечних продуктів харчування, чистої питної води. З метою вирішення глобальних проблем людства науковці всього світу займаються розробкою нових продуктів, хімічних речовин, лікарських засобів, матеріалів, дослідженням шляхів мінімізації негативного впливу навколишнього середовища на організм людини, покращенням якості життя.

Важливе значення у вирішенні цих проблем має біотехнологія завдяки можливості отримувати широкий спектр корисних біологічно активних субстанцій. Отримувані біологічно активні речовини (БАР) мають широке застосування в харчовій, медичній, агропромисловій, природоохоронній галузях і різнобічний вплив на організм споживача. Але головною вимогою для усіх БАР залишається безпечність.

Відомо, що БАР можуть спричинювати як прямий, так і опосередкований вплив на людину. Саме тому важливо здійснювати тестування генотоксичної дії БАР до їх широкого практичного використання. Актуальною з цієї точки зору є оцінка нових перспективних продуктів, отриманих за допомогою біотехнологій: біологічно активних субстанцій, які використовують як лікарські засоби, продуктів харчування, харчових добавок, а також БАР, що використовують як інтексициди, приліпачі до пестицидів, біоетанол, біометанол, біодизель та інші речовини, кількість яких з кожним днем постійно зростає (Моо-Young, 2019).

Відомо, що безпечність лікарських засобів визначають у доклінічних дослідженнях і одним із важливих етапів є оцінка генотоксичних властивостей. Речовини з високим рівнем генотоксичності, пошкоджувальної дії на генетичний апарат клітин не допускаються для використання з лікувальною метою, що регулюється Наказом МОЗ № 1803 «Про затвердження Порядку проведення доклінічних досліджень лікарських засобів», <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1686-24#Text>.

Встановлено, що лікарські засоби з генотоксичними властивостями (окремі психотропні, гіпотензивні лікарські засоби, антибіотики та ін.) збільшують також мутагенне навантаження на навколишнє середовище (Хуе та ін., 2022).

Окрім необхідності тестування генотоксичної дії БАР, часто виникає потреба виявити генопротекторну активність продуктів біотехнології. Адже використання БАР з антимутагенною дією є одним з розумних напрямків вирішення проблеми мутагенезу. Відомо, зокрема, про антимутагенну дію мікробних полісахаридів (Norobakhsh Varnosfaderani та ін., 2024). Дослідження підтверджують наявність генопротекторних властивостей у низки флавоноїдів (Michalak, 2022), ліпополісахаридних комплексів (Menéndez-Perdomo, Fuentes-León, & Sánchez-Lamar, 2018), пектиновмісних продуктів (Palamarchuk, Dzhurenko, Steshenko, & Chetverniya, 2016).

На сьогодні існують різні підходи до реєстрації геномодулювальної дії БАР. Описано більше сотні тест-систем для дослідження впливу на організм на клітинному рівні, регулярно використовуються пару десятків. Разом із тим, залишається проблема уніфікації підходів до тестування біологічно активних сполук з метою отримання результатів, що можна порівнювати. Широкий спектр геномодулювальних ефектів продуктів біотехнології вимагає ретельного добору тест-систем і тест-організмів для визначення їх впливу на геноми. Зважаючи на широкий спектр БАР, необхідно розглядати різні тест-системи, оскільки їх геномодулювальна активність може мати різні механізми.

**Мета дослідження:** аналіз та узагальнення даних щодо сучасних підходів до тестування генотоксичної і генопротекторної дії біологічно активних сполук й визначення найбільш коректних підходів для тестування біотехнологічних продуктів.

**Матеріали і методи.** Для виконання аналітичного дослідження використані наукові та методичні дані з відкритих джерел: статті, публікації, наукометричні

бази даних (Google Scholar, PubMed та ScienceDirect) та нормативно-законодавча база щодо тестування фармакологічних речовин.

**Викладення основних результатів дослідження.** *Загальні принципи тестування геномодулювальної активності.* Геномодулювальна дія БАР на організм, може бути як мутагенна, так і антимутагенна. З метою тестування геномодулювальної активності БАР використовують загальні підходи визначення мутагенної й генотоксичної активності. Мутагенність призводить до подій, які змінюють ДНК, або структуру хромосоми, або їх кількість є незворотною. Якщо такі події не є летальними для клітини, то можуть бути переданими наступним поколінням. Отже, мутації це зміни в одній парі основ, в одному чи кількох генах, хромосомах або розриви в хромосомах, які призводять до стабільної делеції, дублювання чи перебудови хромосомних сегментів, або зміну кількості хромосом (анеуплоїдію), або зміни ДНК, в результаті мітотичної рекомбінації. Генотоксичність — це ширший термін. Він включає вищеописану мутагенність, а також випадки пошкодження ДНК з можливістю зворотного відновлення ДНК. Такі події не завжди призводять до постійних змін структури або змісту інформації, що будуть передані нащадкам. Відповідно тести на генотоксичність додатково включають тести, які оцінюють індуковане пошкодження ДНК, розриви нитки ДНК, первинні тести на пошкодження ДНК (OECD, 2020). Генотоксичні агенти можуть утворювати три основних типи пошкодження ДНК: 1) генні зміни, включаючи точкові мутації (заміни однієї пари основ в ДНК, в результаті чого відбуваються амінокислотні заміни в трансльованих білках), а також мутації зі зсувом рамки (втрата або вставка однієї чи двох пар основ), що спричиняє значні зміни в молекулі трансльованого білка; 2) хромосомні аберації, включаючи такі перебудови хромосом як делеції (випадіння), дублікації (подвоєння), інверсії (перестановки), транслокації (перенос сегментів хромосом, який спричиняє порушення їх структури); 3) анеуплоїдія і поліплоїдія, що включають втрату чи додавання однієї і більше хромосом.

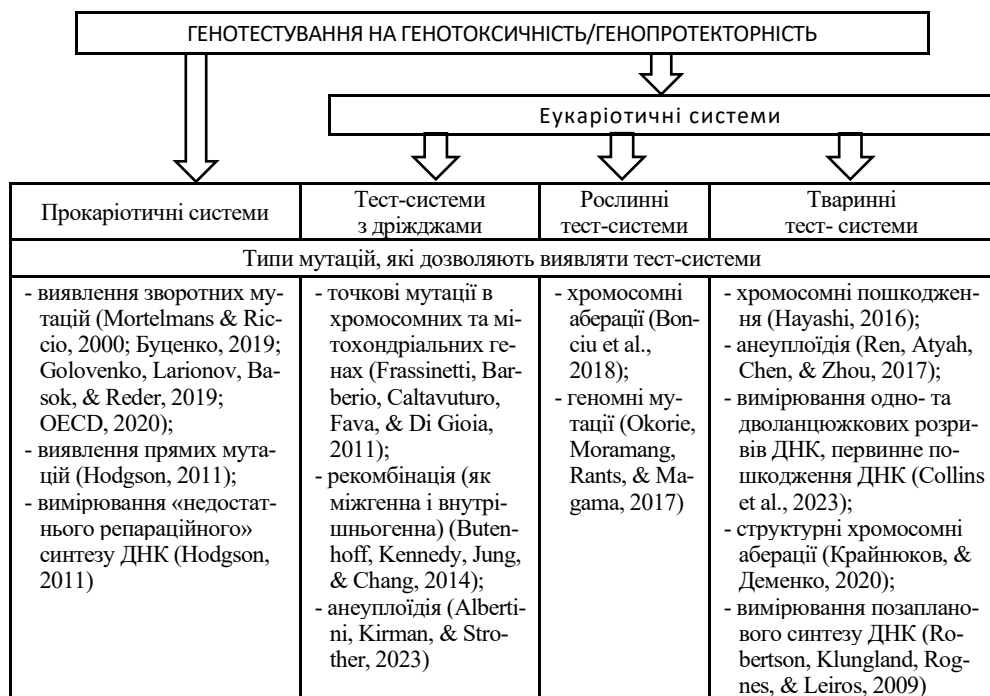
Останніми десятиліттями з'явилися нові підходи та методи оцінки генотоксичної/геномодулювальної дії, в тому числі БАР. Однією з причин появи нових методів оцінки впливу на гени є наявність у відносно старих методів, низки обмежень, які були виявлені з часом у процесі поглибленого аналізу. Виявилось, що багато з них дублювали один одного (наприклад, визначали одні і ті самі реперні точки в різних організмах або типах клітин). Впродовж наступного десятиліття були зроблені спроби валідації тестів, оцінки найкращих тестів чи їх наборів для виявлення відповідних генотоксикантів (Hodgson, 2011).

Розглянемо найбільш поширені із них (рис.1).

У нинішній час застосовують множини тест-систем для виявлення, досліджень, моніторингу геномодулювальних ефектів у різних напрямках людської діяльності. Найбільш жорсткі вимоги до тестування генотоксичності пред'являються при реєстрації лікарських засобів у медицині. Міжнародна рада з питань гармонізації технічних вимог до реєстрації лікарських засобів для людини (The International Council for Harmonisation of Technical Requirements for Pharmaceuticals for Human Use) розробила керівництва щодо тестування на генотоксичність та інтерпретації даних для фармацевтичних препаратів, призначених для людини (Guideline, 2011).

У керівництвах зазначено, які тест-системи, в яких випадках рекомендовані до застосування, вимоги до позитивного та негативного контролів, вибору максимальних і мінімальних доз тощо.

З метою комплексної оцінки, найбільш точного визначення наявності чи відсутності геномодулювальних ефектів у досліджуваних лікарських засобах, уникнення хибно позитивних чи хибно негативних результатів, збільшення чутливості методів і розширення спектра відстежуваних генетичних подій розроблені схеми паралельної перевірки зразків із застосуванням різних тест-систем, так званих батареї тестів. Наприклад, в одному із стандартних варіантів батареї рекомендується постановка дослідів з тест-системою на генну мутацію у бактерій (загально-відомою як тест Еймса) і цитогенетичного тесту *in vitro* на хромосомні пошкодження (тест на метафазну хромосомну аберацію або мікроядерного тесту *in vitro*, які є однаково прийнятними в батареї).



**Рис. 1.** Підходи до тестування геномодулювальних ефектів біологічно активних речовин

У нашій країні при проведенні клінічних досліджень БАР керуються Законом України «Про лікарські засоби» (Закон України № 123/96-ВР, 1996), наказом МОЗ № 1803 від 25.10.2024 «Про затвердження Порядку проведення доклінічного вивчення лікарських засобів та експертизи матеріалів доклінічного вивчення лікарських засобів» (<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1686-24#Text>).

Окрім генотоксичної дії, у БАР визначають канцерогенну активність. Вивчення канцерогенної дії проводиться у разі, якщо:

а) досліджуваний БАР подібний за хімічною будовою до відомих канцерогенів;

б) при проведенні довготривалих токсикологічних досліджень тест-зразок спричинив підозрілі зміни;

в) виявлено мутагенну дію тест-зразка;

г) БАР планується призначати для регулярного прийому пацієнтові протягом тривалого періоду життя.

БАР з високим рівнем генотоксичності для подальшої підготовки до розгляду можливості реєстрації лікарського засобу не допускаються. Вимоги регуляторних органів нашої країни до проведення клінічних досліджень БАР гармонізовані з європейськими вимогами в цій галузі.

Аналізуючи кількість і можливості біологічних тест-систем, постійне впровадження нових, враховуючи стрімке накопичення результатів досліджень у цій галузі, можна зробити висновок, що найближчим часом у лабораторіях можна буде отримувати результати практично за всіма напрямками проведення тестувань генотоксичного впливу без залучення ссавців.

*Прокаріотичні (бактеріальні) тест системи.* Для виявлення БАР із мутагенною дією широко застосовують тести з використанням бактерій. Такі тести використовуються впродовж тривалого часу. Існує ціла низка модифікацій тестів, багато з яких валідовані, рекомендовані регуляторними органами різних країн (Сіміно, 2006).

На відміну від вищих організмів із складно організованою ДНК, у бактерій присутня тільки одна кільцева молекула ДНК, яка легкодоступна для проникаючих через клітинну стінку речовин. Бактерії є зручним інструментом для вивчення мутацій. Однією з переваг бактеріальних тестів є можливість вивчення в одному досліді цієї популяції мікроорганізмів з мільйонів клітин з відносно коротким періодом розмноження.

Бактеріальні тест-системи поділяють на три основні класи:

- для виявлення зворотних мутацій;
- для реєстрації прямих мутацій;
- для вимірювання «репараційного» синтезу ДНК.

Основу всіх прокаріотичних тест-систем для виявлення зворотних мутацій становлять штами зі специфічними змінами-мутаціями. Мутагенність БАР у таких тестах визначається за фенотиповою зміною тест-штамів, що є проявом зворотних мутацій у спеціальних генах.

Найбільш широко використовується метод, заснований на індукції зворотних мутацій у *Salmonella typhimurium* (da Silva Dantas, de Castilho, de Almeida-Apolonio, de Araújo, & de Oliveira, 2020; Ames, McCann, & Yamasaki, 1975) або *Escherichia coli* (менш поширений) (Mortelmans, & Riccio, 2000). Тест із *S. typhimurium* використовується і для визначення мутагенної та антимутагенної активності мікробних БАР (Буценко, 2019). Цей тест відомий як «тест Еймса», ідентифікує хімічні речовини різного походження, які викликають генні мутації (заміну базових пар основ, мутації зсуву рамки зчитування, що виникають у результаті невеликих вставок і делецій) (рис. 2).

Важливою особливістю тестів на зворотну мутацію є наявність у генотипі кожного штаму бактерій певних мутацій, які перешкоджають перебігу окремих найважливіших біохімічних процесів. Наприклад, синтезу однієї з незамінних амінокислот. У штамів *S. typhimurium*, використовуваних у тестах на зворотну індукцію,

відсутня здатність синтезувати амінокислоту гістидин. Штам дикого типу (прототрофний) здатний синтезувати всі необхідні амінокислоти з неорганічного азоту за умови наявності джерела вуглецю. Речовина, що тестується, може спричинювати повторну мутацію, яка відновить втрачену здатність бактерії синтезувати амінокислоту. Цей процес розглядається як реверсія від ауксотрофності до прототрофності, а утворювані мутанти мають назву ревантанти (Ames, McCann, & Yamasaki, 1975; Nakura et al., 2005).

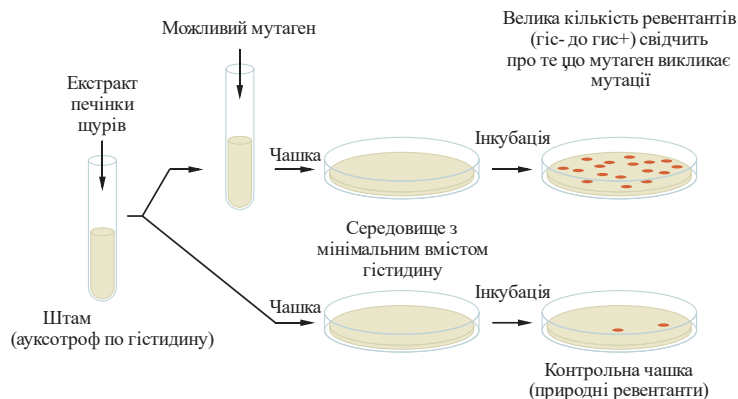


Рис. 2. Схема проведення тесту Еймса

Для підвищення чутливості тесту Еймса, за допомогою генетичних маніпуляцій отримано цілий ряд тестерних штамів *S. typhimurium*. Найбільш часто використовують штами *S. typhimurium* TA98, TA100, TA102, TA1531, TA1537, TA1538 (табл. 1).

Таблиця 1. Штами бактерії *Salmonella typhimurium*, які використовують у тест-системах при вивченні геномодулювальної дії

Номер штаму	Локуси, які несуть мутації	Джерело інформації
<i>Salmonella typhimurium</i> TA98	Мутації за типом зсуву рамки зчитування <i>hisD3052; rfa; Duvr; pKM101</i>	Філіпова, Галкін, & Головенко, 2018
<i>S. typhimurium</i> TA1535	Заміна пари основ, що призводить до місенс-мутації в гені	Wessner, Maiorano, Kenyon, Pillsbury, & Campbell, 2000
<i>S. typhimurium</i> TA102	Мутації орхи (-TAA-), має нонсенс-мутацію <i>hisG428; rfa; pKM101; pAQ1</i>	Wessner, Maiorano, Kenyon, Pillsbury, & Campbell, 2000
<i>S. typhimurium</i> TA100	Заміна пари основ, що призводить до місенс-мутації в гені, подібні до мутацій в TA 1535, але дещо відрізняється в інших аспектах, може виявляти інший діапазон мутагенів <i>hisG428; rfa; pKM101; Duvr</i>	Філіпова, Галкін, & Головенко, 2018
<i>S. typhimurium</i> TA1537	Мутації зсуву рамки зчитування, вставка одного додаткового нуклеотиду	Wessner, Maiorano, Kenyon, Pillsbury, & Campbell, 2000
<i>S. typhimurium</i> TA1538	Мутації зсуву рамки зчитування ( <i>Duvr</i> ), делеція одного нуклеотиду	Wessner, Maiorano, Kenyon, Pillsbury, & Campbell (2000)

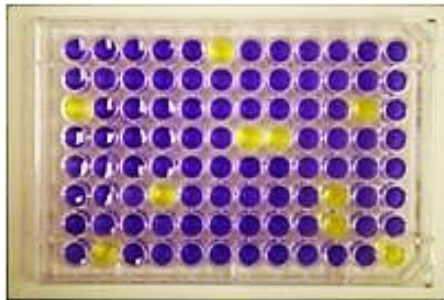
Окрім перерахованих у таблиці мутацій, у кожного з цих штамів відсутня можливість репарації пошкоджень ДНК (на відміну від бактерій дикого типу), а

також є дефект ліпосахаридного шару в клітинній стінці, що значно полегшує проникнення тестованих речовин у клітину (Bartos, Oliveira, & Moraes, 2022).

Для тестування мутагенності БАР вносять до суспензії бактеріальних клітин аусотрофа по гістидину, після чого стимулюють поділ бактерій шляхом внесення незначної кількості гістидину. Мутагенні властивості БАР буде встановлено за появи бактерій, які будуть продовжувати рости після вичерпання запасів гістидину. Ці мутанти легко виявити, за утворенням колоній на синтетичному середовищі без гістидину.

Однак, потрібно пам'ятати, що не завжди мутагени для бактерій можуть бути мутагенами для ссавців. Крім того, потрібно зважати на умови проведення дослідження в лабораторних умовах у пробірках, а не в організмі тварини, тому неможливо відтворити такі фактори, як розподіл речовини по різних органах тварини, що може викривити уяву про мутагенні ефекти БАР. Одним із основних обмежень використання бактеріальних тест-систем для тестування БАР, що безпосередньо вживаються людиною, є неможливість урахування ефектів перетворення цих БАР в організмі людини та впливу цих перетворень на геномодулювальну активність. Для подолання цього обмеження використовують метаболічну активацію досліджуваних БАР. Для моделювання метаболізму ссавців при постановці тесту Еймса використовують екстракти печінки щурів S9 (скорочено від «9000 «супернатанта»), які містять ферменти, здатні здійснювати метаболічні перетворення, характерні для ссавців (Claxton, de A. Umbuzeiro, & DeMarini, 2010).

З метою оптимізації проведення тестування великої кількості БАР, роботи обладнання та персоналу лабораторій розроблені готові мікропланшетні варіанти тесту Еймса:  $\mu$ Ames kit (рис. 3), Moltox та Muta-Chromo Plate kit (Golovenko, Lariopov, Basok, & Reder, 2019).



**Рис. 3.** Мікропланшетний варіант тесту Еймса  $\mu$ Ames kit (Muta-ChromoPlate™ Basic Kit, 2025)

Отже, бактеріальні тести на мутагенність є зручним способом виявлення мутагенів. Необхідно зазначити, що значна кількість мутагенів є канцерогенами. Частина канцерогенів серед мутагенів, за даними дослідників, становить до 85% (Sivagounadin, 2022).

Тест Еймса — найшвидший тест на канцерогени під час промислової розробки БАР, а також сільськогосподарських хімікатів, фармацевтичних препаратів, харчових добавок, комерційних хімікатів для схвалення регуляторними органами (Zeiger, 2019).

Тест на індукцію зворотних мутацій затверджений Організацією економічного співробітництва та розвитку (ОЕСД) для перевірки генотоксичної дії (ОЕСД, 2020).

Тести на мутагенність з використанням бактерій, зокрема тест Еймса, підходять як перший рівень із серії тестів для проведення багаторівневого скринінгу БАР на потенційну геномодулювальну (канцерогенну) активність. Точність тесту становить майже 90%. Тест Еймса має суттєву перевагу тому, що він «низькотехнологічний», відносно недорогий і портативний, потребує мінімального лабораторного обладнання та матеріалів, що уможливило його прийняття в усіх країнах. Інші його переваги: він знайомий регулюючим органам у всьому світі та створює тестові дані, які легко зрозуміти людям, що не мають досвіду генетики чи мутагенезу (Zeiger, 2019).

*Тести на вищих рослинах.* Застосування еукаріотичних швидкісних тест-систем залишається актуальним. Рослини є еукаріотичними організмами і їхні хромосоми структурно та морфологічно подібні до хромосом тварин, так само, як і системи активації промутагенів. Крім того, вирощувати рослини значно дешевше, ніж культуру тваринних клітин *in vitro* або проводити досліди на тваринах *in vivo*.

Серед рослинних тест-систем на мутагенність найчастіше використовують різні види *Allium* (цибуля), *Crepis* (скереда), *Hordeum* (ячмінь), *Lycopersicon* (помідори), *Pisum* (горох), *Tradescantia* (традесканція), *Vicia* (віка) і *Zea* (кукурудза) (табл. 2). Такі тести ґрунтуються на обробленні меристеми рослин досліджуваними речовинами, з подальшим визначенням наявності певних класів хромосомних аберацій і геномних мутацій у клітинах рослинної тканини. Меристема рослин є зоною, де відбувається активний клітинний поділ. Саме у мітотичній фазі хромосомний апарат клітин є найбільш чутливим до дії мутагенних чинників.

**Таблиця 2. Рослинні тест-організми, які використовують для тестування мутагенної активності**

Назва рослини (укр.)	Вид рослини (лат.)	Типи мутацій, які визначали	Література
Цибуля кілювата Цибуля городня Цибуля трубчаста Цибуля шніт	<i>Allium carinatum</i> <i>A. cepa</i> <i>A. fistulosum</i> <i>A. choenoprasum</i>	Частота абераційних клітин та аберації хромосом у мітозі та мейозі, К-мітотичний ефект у клітинах апікальної меристеми корінців, мікроядра	Leme, & Marin-Morales, 2009; Tkachuk, & Zelena, 2022; Manna, & Bandyopadhyay, 2017
Скереда волосинчаста	<i>Crepis capillaris</i>	Хромосомні порушення та обміни між хромосомами у мітозі у клітинах апікальної меристеми корінців	Juchimiuk, & Maluszynska, 2005
Ячмінь звичайний	<i>Hordeum vulgare</i>	Хромосомні порушення та обміни у мітозі в клітинах апікальної меристеми корінців і пагонів	Kumar, & Pandey, 2015; Pan та ін., 2004
Томат культурний	<i>Lycopersicon esculentum</i>	Хромосомні порушення та обміни у мітозі і мейозі у клітинах апікальної меристеми корінців та у квітках	Grant, & Owens, 2002

Горох червоно-жовтий Горох посівний	<i>Pisum fulvum</i> <i>P. sativum</i>	Хромосомні порушення у мітозі та мейозі у клітинах апікальної меристеми корінців	Grant, & Owens, 2001
Традесканція	<i>Tradescantia</i>	Частота і динаміка соматичних мутацій у мікроспорах, гаметах, соматичних клітинах (кінчики коренів, у пелюстках і волосках тичинкових ниток)	Аристархова, 2016; de Morais та ін., 2019; Cassanego та ін., 2014
Горошок мишачий (віка багатоквіткова) Біб кінський	<i>Vicia cracca</i> <i>V. faba</i>	Хромосомні порушення та обміни у мітозі, мікроядра	Majer, Grummt, Uhl, & Knasmüller, 2005; Chandra, Chauhan, Pande, & Gupta, 2004
Кукурудза звичайна	<i>Zea mays</i>	Хромосомні порушення у мітозі та мейозі	Grant, & Owens, 2006
Ряска мала	<i>Lemna minor</i>	Оцінка потенційного інгибування росту, вміст хлорофілу, каротиноїдів, активність ферментів	Radić та ін., 2011; Pietrini та ін., 2022
Осмунда велична	<i>Osmunda regalis</i>	Спорофітні, легальні листя або кореню мутації, ауксотрофні гаметофітні мутації, а також численні фенотипові зміни морфології	Skribic, Petersn, Christensen, Hansen, & Rasmussen, 2020

З метою моніторингу водних ресурсів досить широко використовують тести на рясці (*Lemna*). Ряска є представником вищих водних рослин. Рослини невеликі, легко вирощуються та чутливі до дії хімікатів. Тестування *Lemna* потрібне для засобів захисту рослин, що діють як гербіцид або регулятор росту рослин.

За допомогою тестів визначають та оцінюють вплив на організм за такими показниками, як NOEC (No Observed Effect Concentration) — максимально недіюча концентрація речовини; LOEC (Lowest Observed Effect Concentration) — максимально недіюча концентрація речовини; EC50 — напівмаксимальна ефективна концентрація речовини. Кінцевою точкою є врожайність і швидкості зростання на нові кількості листя та сухої маси (Park та ін., 2022).

Хромосомні аберації — це зміни структури хромосом, серед яких виділяють делеції (видалення ділянки хромосоми), інверсії (зміна порядку генів ділянки хромосоми на зворотний), дуплікації (повторення ділянки хромосоми), транслокації (перенесення ділянки хромосоми на іншу). Найлегше під мікроскопом виявити такі хромосомні аберації: фрагменти хромосом (є результатом делецій), мости (є результатом злиття різних хромосом), відставання та втрати хромосом (є результатом ушкодження центромери хромосом) (Вопсіу та ін., 2018).

Із перерахованих вище рослинних експрес-тестів на мутагенність одним із найпоширеніших є *Allium cepa*-тест (рис. 4). Суть цього методу полягає у підрахунку

хромосомних аберацій, які виникають під дією досліджуваних мутагенів, у метафазі, анафазі і/чи телофазі (Maluszynska, & Juchimiuk, 2005).

Одним із методів первинної оцінки геномодулювальної дії за допомогою вищих рослин є оцінка зовнішнього вигляду, співвідношення довжини пророслих корінців рослини у розчині з досліджуваною речовиною та контролем з чистою водою (Das, Hazra, Sengupta, Hazra, & Chattopadhyay, 2021).

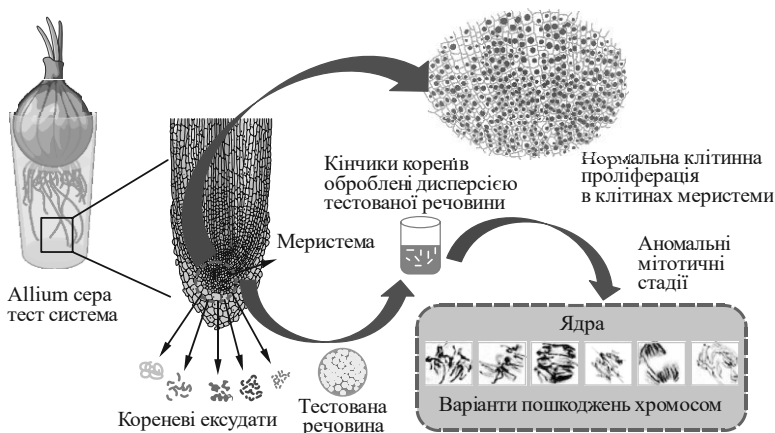


Рис. 4. Схема проведення *Allium cepa*-тесту

*Тваринні тест-системи.* Тваринні тест-системи для проведення випробувань, пов'язаних з визначенням генотоксичної, мутагенної, канцерогенної дії на організм широко застосовують у наукових, науково-дослідних лабораторіях практично у всіх країнах світу. Окрім того, їх використовують і регуляторні органи всіх країн на етапах контролю. Так, у США цілий ряд державних організацій займається оцінкою впливу хімічних речовин. Наприклад, Агенція з охорони довкілля США (Environmental Protection Agency, EPA), Управління з продовольства і медикаментів США (Food and Drug Administration, FDA), Комісія з безпеки споживчих товарів США (United States Consumer Product Safety Commission, CPSC), Національний інститут безпеки та гігієни праці (National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH) та інші. Європейські країни, включаючи Україну, керуються вимогами Організації економічного співробітництва та розвитку (Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD). Історично міжнародними органами розглядалось значна множина методів аналізу по мірі появи нових методів досліджень генотоксичної дії. Пізніше, із міркувань доцільності з економічної точки зору, дублювання багатьох методик, уніфікації вимог до об'єктів досліджень була зменшена кількість загальноприйнятих методів досліджень.

Найбільш поширеними практично у всіх регуляторних органів рекомендуються трирівневі тест-системи. На першому, рутинному, рівні первинного скринінгу найчастіше використовують бактеріальні тест-системи (тест Еймса). У разі позитивних або невизначених результатів проводять тестування другого рівня. При потребі, згідно з визначеними процедурами, проводять дослідження третього рівня,

в певних випадках проводять додаткові специфічні дослідження. На другому/третьому рівнях тестування генотоксичної, мутагенної дії користуються мікроядерним аналізом *in vivo*, тестом *in vitro* на мишачу лімфому, тестом *in vivo* на хромосомну аберацію клітин ссавців. У різних країнах, міжнародних організаціях поширені біологічні тест-системи, згідно з вимогами регулятора постановки задачі можуть бути або на другому або на третьому рівнях, чергуватись між собою (Cimino, 2006).

*Мікроядерний тест.* У 1969 р. W. Schmid із колегами був запропонований тест для дослідження мутагенезу, в основі якого був облік мікроядер в еритроцитах кісткового мозку. Цей метод одержав назву — мікроядерний тест (Hayashi, 2016).

Мікроядра, більш відомі як тільця Жоллі, були відкриті більше 60 років тому і як біомаркери генетичних порушень у клітинах були описані в подальших дослідженнях (Zhang та ін., 2021).

Мікроядерний тест — поширений метод оцінки хромосомних пошкоджень у клітинах еукаріотів. Окрім дослідження генотоксичності речовин, його використовують при біомоніторингу навколишнього середовища (Крайнюков, & Деменко, 2020).

Для проведення досліджень тварини піддаються впливу досліджуваною БАР затвердженим способом. У випадку використання клітин кісткового мозку тваринок евтаназують через відповідні часові проміжки після впливу хімікату на організм тварини. Потім негайно вилучають кістковий мозок з гомілкових кісток, готують і фарбують препарати (Hayashi, 2016).

При використанні крові з периферійних судин роблять забір крові способом через відповідні часові проміжки після впливу хімікату на організм тварини, негайно готують і фарбують препарати (Kasamoto, Masumori, & Hayashi, 2013). Препарати аналізують на наявність мікроядер шляхом візуалізації за допомогою мікроскопа, аналізу отриманих зображень, проточної цитометрії (імунофенотипування) (Микитюк, 2015) або за допомогою лазерної скануючої цитометрії (Harnett, 2007; Mach, Thimmesch, Orr, Slusser, & Pierce, 2010).

Важливим при є дотримання вимог європейського та українського законодавства стосовно захисту тварин, що використовуються для наукових цілей (Directive 2010/63/EU, 2010). Використання живих тварин, ссавців, дозволяється тільки у разі неможливості замінити проведення досліджень за допомогою інших методів. Крім того, при постановці таких дослідів необхідно залучати мінімальну кількість тварин. Актуальним є питання проведення дослідів на живих тваринах з точки зору біоетики. В науковому співтоваристві немає однозначної думки з цього приводу. Регуляторні органи рекомендують проводити дослідів із залученням живих тварин тільки у випадках неможливості замінити проведення досліджень за допомогою інших методів. Цієї думки дотримується і переважна більшість дослідників (Richmond, 2002).

Зазвичай, утворення мікроядер відбувається двома шляхами:

- 1) із хромосомного матеріалу, який залишився на стадії анафази в одній з дочірніх клітин в процесі мітозу;
- 2) крупні мікроядра можуть утворюватись із цілих хромосом у процесі порушення розходження хроматид. Це може бути викликано пошкодженнями на веретені поділу, внаслідок чого утворюються його дефекти.

Для проведення тесту можна використовувати клітини з різних частин організму та відомо, що одним з надійних способів визначення геномодулювальних властивостей речовин є використання еритроцитів кісткового мозку дрібних гризунів, або периферичної крові дрібних гризунів. З таким типом клітин краще працювати, оскільки ці клітини позбавлені основного ядра, менше піддаються спонтанним мутаціям, не містять, на відміну від клітин печінки щурів артефактів, сторонніх включень, що заважають при підрахунку пошкоджень (Alnasser, 2025). Протоколи проведення досліджень з використанням клітин інших органів, наприклад, тканин печінки, легень, шкіри, товстої кишки, тканин плоду ще не досить добре стандартизовані та перевірені для нормативного застосування і потребують подальшої розробки (Morita, MacGregor, & Hayashi, 2011). Використання більш сучасних систем та обладнання для автоматизованої оцінки дає змогу подолати обмеження при оцінці пошкоджень клітин. Слід очікувати, що методи проточної пірометрії та обробки зображень замінять класичну мікроскопію, дадуть змогу отримувати надійні дані ефективнішим способом (Hayashi та ін., 2007). Іншим показником є частота виникнення клітин з подвійними ядрами (Крайнюков, & Деменко, 2020).

Незважаючи на те, що цей метод застосовується для досліджень впродовж кількох десятиліть, зацікавленість науковців до цього методу не згасає. Про це свідчить наявність низки не тільки оглядових досліджень, а й прикладних (Ren, Atyah, Chen, & Zhou, 2017; Canedo та ін., 2021). При цьому серед доступних джерел досить мало публікацій про дослідження за допомогою мікроядерного тесту генопротекторної дії речовин біологічного походження.

*Тест на хромосомні аберації тваринних клітин.* Підтримка цілісності генома вимагає ефективного та точного усунення розривів ДНК і перешкод для реплікації ДНК. Дисфункції на будь-якому проміжку перебігу цих процесів можуть призвести до хромосомної нестабільності, яка може проявлятися у вигляді множини структурних аберацій.

Одним із стандартизованих, загальноприйнятих методів оцінки генотоксичної/генопротекторної дії є тест на хромосомні аберації, що дозволяє виявляти структурні та числові зміни в хромосомах під впливом мутагенних агентів або фіксувати їх відсутність у разі генопротекторної дії досліджуваної речовини. Цей тест широко використовується в основному для дослідження потенційного мутагенного та канцерогенного ефекту пестицидів, біологічно-активних речовин, токсичних речовин, барвників, мастильних добавок, синтетичних волокон, конструкційних полімерів, впливу радіації, при проведенні досліджень у гуманній медицині тощо.

Суть методу полягає в дослідженні структурних пошкоджень хромосом (делецій, транслокацій, дицентричних хромосом) та числових аномалій (анеуплодії, поліплодії) (OECD, 2016). Може проводитись *in vitro* (на культурах клітин) та *in vivo* (на клітинах кісткового мозку, лімфоцитах крові тощо). Вимоги до вибору різновиду методу в різних країнах можуть відрізнятися.

При проведенні дослідження, з використанням крові з периферійних судин, роблять забір крові через відповідні часові проміжки після впливу досліджуваної речовини на організм ссавця. Культивування лімфоцитів периферичної крові проводять згідно зі стандартною методикою (Зерова-Любимова, & Горovenko, 2003).

Цільну гепаринізовану кров організму додають до культуральної суміші, яка містить поживне середовища Ігла, бромдезоксириндин, сироватку великої рогатої худоби та фітогемаглютинін у визначеній концентрації. Культивують культуру лімфоцитів, за 4 год до закінчення культивування вносять розчин колхіцину. Після гіпотонічної обробки проводять фіксацію клітин оцтовим метанолом (3:1). Препарат забарвлюють за допомогою Гімза- або флуоресцентного-плюс-Гімза (FPG) забарвлення. Метафазні препарати аналізують, реєструючи весь спектр розпізнавальних аберацій хромосом.

На точках дослідження спектр цитогенетичних аномалій складається із дицентриків і кільцевих хромосом із супутніми фрагментами, вільних хромосомних фрагментів, транслокацій, хроматидних обмінів, хроматидних фрагментів, гіперплоїдних клітин та поліплоїдів.

Гіпоплоїдні клітини до геномних порушень не відносяться, оскільки значна частка таких клітин може виникати внаслідок методологічних особливостей приготування хромосомних препаратів. Аналізується кілька тисяч клітин, проводять статистичний аналіз отриманих результатів. При проведенні статистичного аналізу отриманих даних визначають середні рівні аберантних клітин кожного виду аберацій хромосом чи їх комбінацій у розрахунку на 100 проаналізованих нормоплоїдних клітин незалежно від амітозу (так званий Гімзаеквівалент). Стандартні похибки середніх рівнів цитогенетичних пошкоджень обчислюють з урахуванням дисперсії поклітинних розподілів аберацій в об'єднаних вибірках метафаз. Імовірність різниці між середніми значеннями цитогенетичних показників визначають за t-критерієм Стюдента (Мазник та ін., 2021).

*Тест домінантних летальних мутацій.* Тест домінантних летальних мутацій — це *in vivo* метод оцінки мутагенності хімічних, фізичних, біологічних агентів на рівні статевих клітин. За допомогою цього тесту виявляють мутації в сперматозоїдах або ооцитах, які спричиняють загибель ембріона на ранніх стадіях розвитку. Безперечною перевагою є дослідження впливу хімічних речовин на статеві клітини свавців, подібні за будовою на людські. Отримані результати дають змогу оцінювати можливий вплив на організм людини, зрозуміти чи може досліджувана речовина спричинювати генетичні зміни, які будуть перенесені в поколіннях, оцінити потенційну загрозу для нащадків. Оцінку впливу на організм за допомогою цього тесту найчастіше проводять на третьому рівні тестування генотоксичності. Можливо проводити процедуру на другому рівні тестування (Booth, Rawlinson, Fagundes, & Leiner, 2017).

Домінантна летальна мутація — це мутація, що відбувається в статевій клітині або фіксується після запліднення в ранньому ембріоні, яка не викликає дисфункцію гамет, але є смертельною для заплідненої яйцеклітини чи ембріона.

Для проведення досліджень беруть групи самців і незайманих самочок, їх тримають окремо. Контрольну групу самців поють дистильованою водою, другу групу піддають впливу тестовим матеріалом з низькою дозою (0,25 летальної дози), третю групу піддають впливу тестовим матеріалом у високій дозі (летальна доза), як позитивний контроль групу самців піддають впливу речовин з відомою мутагенною здатністю впродовж 5 днів. Кожного обробленого самця сажають в окремі

клітки з двома необробленими самками на 7 днів. Потім відбирають, згідно зі схемою досліджу, по групі самок щотижня, евтаназують, роблять розтин і здійснюють підрахунок живих і мертвих ембріонів.

Домінантна летальність тестової речовини визначається шляхом порівняння кількості живих ембріонів на самку в дослідній групі з кількістю живих ембріонів на самку в контрольній групі. Збільшення кількості мертвих ембріонів на самку в дослідній групі порівняно з кількістю мертвих ембріонів у контрольній групі вказує на втрату після запліднення, спричиненою впливом тестованої речовини. Індукція летальної мутації вказує на вплив тестованої речовини на зародкові тканини випробовуваної тварини.

Тест домінуючих летальних мутацій, окрім багатьох переваг, має також і певні недоліки. Основними недоліками методу є використання для здійснення випробувань досить великої кількості тварин, високі вимоги до досвіду та кваліфікації лабораторій. У результаті цей аналіз є дуже дорогим і трудомістким. Через ці обмеження метод домінуючих летальних мутацій не використовується широко у скринінгових дослідженнях, а є прийнятним лише на третьому рівні тестування генотоксичності або як додатковий метод тестування при відсутності альтернативи (OECD, 2016).

### Висновки

Отже, сьогодні у світі широко використовують тест-системи для вивчення мутагенності БАР на основі бактерій, дріжджів, рослин і тваринних клітин. Тестування кожної речовини має бути проведено за використання декількох тестів, що дозволяють врахувати різні типи генетичних пошкоджень.

Перевагою застосування бактеріальних тест-систем є швидкість і дешевизна дослідження. Перевагою застосування тестів із тваринними клітинами є отримання чіткої відповіді стосовно впливу на організм людини, але таке тестування дороге і не може охоплювати велику кількість БАР. Найоптимальнішим є використання рослинних тест-систем, що дозволяють отримувати результати, які можуть бути екстрапольовані на людину, є дешевими і не потребують складного обладнання.

### Література

Аристархова, Е. О. (2016). Особливості визначення токсичності питної води. *Агроекологічний журнал*, 3, 50—55. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2016.248863>.

Буценко, Л. (2019). Геномодулювальна активність *Pseudomonas syringae* pv. *syringae* і *P. syringae* pv. *atropaciens*. *Біоресурси і природокористування*, 11(3/4), 25.

Запорожан, В. Н., Кордюм, В. А., Бажора, Ю. И., Кресюн, В. И., Трахтенберг, И. М., Левицкий, Е. Л., ..., Буценко, Г. М. (2008). *Генетическая медицина*. Одеса: Одеський державний медичний університет.

Зерова-Любимова, Т. Е., & Горovenko, Н. Г. (2003). *Цитогенетичні методи дослідження хромосом людини. Методичні рекомендації*. Київ: Київська медична академія післядипломної освіти імені П. Л. Шупика.

Крайнюков, О. М., & Деменко, А. В. (2020). Дослідження актуальності використання мікроядерного тесту для захисту водної екосистеми від впливу небезпечних хімічних речовин. *Екологічні науки*, 3(30), 133—137. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.3-30.23>.

Мазник, Н. О., Сипко, Т. С., Старенький, В. П., Гукова, І. М., Артюх, С. В., & Черкаска, Л. В. (2021). Features of cytogenetic effects in oncological patients during radiotherapy with prior radiation exposure. *Український радіологічний та онкологічний журнал*, 29(4), 48—64. <https://doi.org/10.46879/ukroj.4.2021.48-64>.

Микитюк, О. Ю. (2015). Проточна цитометрія: фізичні основи та практичне застосування у медицині і біології. *Вісник проблем біології і медицини*, 2(1), 214—217.

Філіпова, Т. О., Галкін, М. Б., & Головенко, М. Я. (2018). Визначення мутагенних властивостей тилорону — активного фармацевтичного інгредієнту аміксину, в мікропланшетному варіанті тесту Еймса. *Мікробіологія і біотехнологія*, 41(1), 6—17. [https://doi.org/0.18524/2307-4663.2018.1\(41\).126657](https://doi.org/0.18524/2307-4663.2018.1(41).126657).

Alnasser, S. M. (2025). Revisiting the approaches to DNA damage detection in genetic toxicology: insights and regulatory implications. *BioData Mining*, 18(1), 1—19. <https://doi.org/10.1186/s13040-025-00447-8>.

Ames, B. N., Mc Cann, J., & Yamasaki, E. (1975). Methods for detecting carcinogens and mutagens with the Salmonella/mammalian-microsome mutagenicity test. *Mutat. Res.; (Netherlands)*, 31. [https://doi.org/10.1016/0165-1161\(75\)90046-1](https://doi.org/10.1016/0165-1161(75)90046-1).

Barros, B., Oliveira, M., & Morais, S. (2022). Unveiling urinary mutagenicity by the Ames test for occupational risk assessment: a systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(20), 13074. <https://doi.org/10.3390/ijerph192013074>.

Bonciu, E., Firbas, P., Fontanetti, C. S., Wusheng, J., Karaismailoğlu, M. C., Liu, D., ..., & Papieni, A. (2018). An evaluation for the standardization of the *Allium cepa* test as cytotoxicity and genotoxicity assay. *Caryologia*, 71(3), 191—209. <https://doi.org/10.1080/00087114.2018.1503496>.

Booth, E. D., Rawlinson, P. J., Maria Fagundes, P., & Leiner, K. A. (2017). Regulatory requirements for genotoxicity assessment of plant protection product active ingredients, impurities, and metabolites. *Environmental and Molecular Mutagenesis*, 58(5), 325—344. <https://doi.org/10.1002/em.22084>.

Canedo, A., de Jesus, L. W. O., Bailão, E. F. L. C., & Rocha, T. L. (2021). Micronucleus test and nuclear abnormality assay in zebrafish (*Danio rerio*): Past, present, and future trends. *Environmental pollution*, 290, 118019. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118019>.

Cassanego, M. B. B., Costa, G. M. D., Sasamori, M. H., Endres Júnior, D., Petry, C. T., & Droste, A. (2014). The *Tradescantia pallida* var. *purpurea* active bioassay for water monitoring. *Revista Ambiente & Água*, 9, 424—433. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1411>.

Chandra, S., Chauhan, L. K. S., Pande, P. N., & Gupta, S. K. (2004). Cytogenetic effects of leachates from tannery solid waste on *Vicia faba*. *Environmental Toxicology*, 19(2), 129—133. <https://doi.org/10.1002/tox.20005>.

Cimino, M. C. (2006). Comparative overview of international strategies for genetic toxicology testing. *Environmental and Molecular Mutagenesis*, 47(5), 362—390. <https://doi.org/10.1002/em.20216>.

Claxton, L. D., de A. Umbuzeiro, G., & DeMarini, D. M. (2010). The Salmonella mutagenicity assay: a stethoscope of genetic toxicology. *Environmental Health Perspectives*, 118(11), 1515—1522. <https://doi.org/10.1289/ehp.1002336>.

Da Silva Dantas, F. G., de Castilho, P. F., de Almeida-Apolonio, A. A., de Araújo, R. P., & de Oliveira, K. M. P. (2020). Mutagenic potential of medicinal plants: a systematic review. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 786, 108338.

Das, T., Hazra, S., Sengupta, S., Hazra, P., & Chattopadhyay, D. (2021). Genotoxic effect of saccharin on *Allium cepa* root tips. *Biologia*, 76(11), 3191—3199. <https://doi.org/10.1007/s11756-021-00871-1>.

De Morais, C. R., Pereira, B. B., Sousa, P. C. A., Santos, V. S. V., Campos, C. F., Carvalho, S. M., ..., & Bonetti, A. M. (2019). Evaluation of the genotoxicity of neurotoxic insecticides using the micronucleus test in *Tradescantia pallida*. *Chemosphere*, 227, 371—380. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.04.073>.

Directive 2010/63/EU of the European Parliament and of the Council (2010). On the protection of animals used for scientific purposes. <http://data.europa.eu/eli/dir/2010/63/oj>.

- Golovenko, M. Y., Larionov, V. B., Basok, S. S., & Reder, A. S. (2019). Testing mutagenic potential using Ames test microplate. *Farmatsevtichnyi zhurnal*, 2, 81—87. <https://doi.org/10.32352/0367-3057.2.19.9>.
- Grant, W. F., & Owens, E. T. (2001). Chromosome aberration assays in *Pisum* for the study of environmental mutagens. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 488(2), 93—118. [https://doi.org/10.1016/S1383-5742\(00\)00064-8](https://doi.org/10.1016/S1383-5742(00)00064-8).
- Grant, W. F., & Owens, E. T. (2002). *Lycopersicon* assays for environmental mutagens. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 511(3), 207—237.
- Grant, W. F., & Owens, E. T. (2006). *Zea mays* assays for environmental mutagens. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 613(1), 17—64. <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2006.04.002>.
- Guideline, I. H. T. (2011). Genotoxicity testing guidance for pharmaceuticals. *International Conference on Harmonisation*.
- Hakura, A., Shimada, H., Nakajima, M., Sui, H., Kitamoto, S., Suzuki, S., & Satoh, T. (2005). Salmonella/human S9 mutagenicity test. *Mutagenesis*, 20(3), 217—228. <https://doi.org/10.1093/mutage/gei029>.
- Harnett, M. M. (2007). Laser scanning cytometry: understanding the immune system in situ. *Nature reviews. Immunology*, 7(11), 897—904. <https://doi.org/10.1038/nri2188>.
- Hayashi, M. (2016). The micronucleus test—most widely used in vivo genotoxicity test. *Genes and Environment*, 38(1), 18. <https://doi.org/10.1186/s41021-016-0044-x>.
- Hodgson, E. (Ed.). (2011). A Textbook of Modern Toxicology. *John Wiley & Sons*. ISBN 1118211294.
- Juchimiuk, J., & Maluszynska, J. (2005). Transformed roots of *Crepis capillaris*. *Mutation Research/Genetic Toxicology*, 565(2), 129—138. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2004.10.016>.
- Kasamoto, S., Masumori, S., & Hayashi, M. (2013). In vivo micronucleus assay in mouse bone marrow and peripheral blood. *Genotoxicity Assessment: Methods and Protocols*, 179—189. [https://doi.org/10.1007/978-1-62703-529-3\\_9](https://doi.org/10.1007/978-1-62703-529-3_9).
- Kumar, G., & Pandey, A. (2015). Genotoxic effects of food preservatives on barley. *Chromosome Botany*, 10(2), 51—60. <https://doi.org/10.3199/iscb.10.51>.
- Leme, D. M., & Marin-Morales, M. A. (2009). *Allium cepa* test in environmental monitoring: a review. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 682(1), 71—81. <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2009.06.002>.
- Mach, W. J., Thimmesch, A. R., Orr, J. A., Slusser, J. G., & Pierce, J. D. (2010). Flow cytometry and laser scanning cytometry, a comparison of techniques. *Journal of clinical monitoring and computing*, 24, 251—259. <https://doi.org/10.1007/s10877-010-9242-4>.
- Majer, B. J., Grummt, T., Uhl, M., & Knasmüller, S. (2005). Plant bioassays for aquatic genotoxins. *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*, 33(1), 45—55. <https://doi.org/10.1002/ahch.200300557>.
- Maluszynska, J., & Juchimiuk, J. (2005). Molecular cytogenetic plant bioassays. *Arh Hig Rada Toksikol*, 56(2), 177—184.
- Manna, I., & Bandyopadhyay, M. (2017). Nickel oxide nanoparticle effects on plants. *Frontiers in Chemistry*, 5, 92. <https://doi.org/10.3389/fchem.2017.00092>.
- Menéndez-Perdomo, I. M., Fuentes-León, F., & Sánchez-Lamar, Á. (2018). Cuban flora species as a potential source of DNA protective compounds. *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas*, 17(1).
- Michalak, M. (2022). Plant-derived antioxidants: Significance in skin health and the ageing process. *International journal of molecular sciences*, 23(2), 585. <https://doi.org/10.3390/ijms23020585>.
- Moo-Young, M. (2019). *Comprehensive Biotechnology*. Elsevier.
- Morita, T., MacGregor, J. T., & Hayashi, M. (2011). Micronucleus assays in rodent tissues other than bone marrow. *Mutagenesis*, 26(1), 223—230. <https://doi.org/10.1093/mutage/geq066>.
- Mortelmans, K., & Riccio, E. S. (2000). The bacterial tryptophan reverse mutation assay with *Escherichia coli* WP2. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 455(1—2), 61—69. [https://doi.org/10.1016/S0027-5107\(00\)00076-2](https://doi.org/10.1016/S0027-5107(00)00076-2).
- Muta-ChromoPlate™ Basic Kit. (2025). *Biotoxicity*. Взято з <http://www.biotoxicity.com/index.php/ebpi-toxicity-tests/ames-tests/muta-chromoplate-basic-kit>.

- Müftügil, N., & Mocan, S. (1999). Genotoxic effects of UV-B on maize using *Tradescantia* and pollen mother cell tests. *Biologia Plantarum*, 42, 453—461. <https://doi.org/10.1023/A:1002155007390>.
- Nefic, H., & Musanovic, J. (2007). Genotoxicity testing of urban river water. *Archives of Industrial Hygiene and Toxicology*, 58(4), 437. <https://doi.org/10.2478/v10004-007-0035-9>.
- Noorbakhsh Varnosfaderani, S. M., Ebrahimzadeh, F., Akbari Oryani, M., Khalili, S., Almasi, F., Mosaddeghi Heris, R., Payandeh, Z., Li, C., Nabi Afjadi, M., & Alagheband Bahrami, A. (2024). Potential promising anticancer applications of  $\beta$ -glucans: a review. *Bioscience reports*, 44(1), BSR20231686. <https://doi.org/10.1042/BSR20231686>.
- OECD (2016). Test No. 473: *In Vitro Mammalian Chromosomal Aberration Test*. OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 4. OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/9789264264644-en>.
- OECD (2016). Test No. 487: *In Vitro Mammalian Cell Micronucleus Test*. OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 4. OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/9789264264866-en>.
- OECD (2020). Test No. 471: *Bacterial Reverse Mutation Test*. OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 4, OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/9789264071247-en>.
- Palamarchuk, O., Dzhurenko, N., Steshenko, O., & Chetverniya, S. (2016). The post-Chornobyl consequences and possibilities of radiation safety in Ukraine-situation of problem. *After the Chernobyl Accident*, 177. <https://doi.org/10.15414/2016.b-p2.9788055215280>.
- Pan, J. W., Zheng, K., Ye, D., Yi, H. L., Jiang, Z. M., Jing, C. T., ..., & Zhu, M. Y. (2004). Aluminum-induced ultraweak luminescence changes and sister-chromatid exchanges in root tip cells of barley. *Plant Science*, 167(6), 1391—1399. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2004.07.015>.
- Park, J., Yoo, E.-J., Shin, K., Depuydt, S., Li, W., Appenroth, K.-J., Lillcrap, A. D., Xie, L., Lee, H., Kim, G., Saeger, J. D., Choi, S., Kim, G., Brown, M. T., & Han, T. (2022). Interlaboratory Validation of Toxicity Testing Using the Duckweed *Lemna minor* Root-Regrowth Test. *Biology*, 11(1), 37. <https://doi.org/10.3390/biology11010037>.
- Pietrini, F., Iannilli, V., Passatore, L., Carloni, S., Sciacca, G., Cerasa, M., & Zacchini, M. (2022). Ecotoxicological and genotoxic effects of dimethyl phthalate (DMP) on *Lemna minor* L. and *Spirodela polyrrhiza* L. Schleid plants under a short-term laboratory assay. *Science of the Total Environment*, 806, 150972. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150972>.
- Radić, S., Stipaničev, D., Cvjetko, P., Rajčić, M. M., Širac, S., Pevalek-Kozlina, B., & Pavlica, M. (2011). Duckweed *Lemna minor* as a tool for testing toxicity and genotoxicity of surface waters. *Ecotoxicology and environmental safety*, 74(2), 182—187. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2010.06.011>.
- Ramos, F. A., de Lima, S. G., da Silva, M. A. P., de Moura, C. M., Feitosa, C. M., & de Almeida, R. N. (2017). Assessment of mutagenic and cytotoxic potential of *Maytenus rigida* Mart. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, 27, 188—192. <https://doi.org/10.1016/j.bjp.2016.11.005>.
- Rathore, D., Jani, R. H., & Vadalia, K. R. (2010). Genotoxicity assessment of herbal drugs. *The Open Nutraceuticals Journal*, 3(1), 84—88. <https://doi.org/10.2174/1876396001003010084>.
- Rawat, P., Yadav, S., Jain, D., & Rai, G. K. (2018). Toxicological profile of herbal medicine. *Research Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 10(4), 297—300. <https://doi.org/10.5958/0975-4385.2018.00055.2>.
- Ren, N., Atyah, M., Chen, W. Y., & Zhou, C. H. (2017). The various aspects of genetic and epigenetic toxicology: testing methods and clinical applications. *Journal of Translational Medicine*, 15, 1—13. <https://doi.org/10.1186/s12967-017-1218-4>.
- Ribeiro, L. R., Salvadori, D. M., & Marques, E. K. (2003). *Tradescantia* bioassays. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 540(2), 139—151. [https://doi.org/10.1016/S1383-5742\(03\)00073-3](https://doi.org/10.1016/S1383-5742(03)00073-3).
- Richmond, J. (2002). Refinement, reduction, and replacement of animal use for regulatory testing: future improvements and implementation within the regulatory framework. *ILAR journal*, 43(1), S63—S68. [https://doi.org/10.1093/ilar.43.Suppl\\_1.S63](https://doi.org/10.1093/ilar.43.Suppl_1.S63).
- Rodrigues, D. S., & Maistro, E. L. (2011). Genotoxicity of *Copaifera* oil-resin in mammalian cells. *Genetics and Molecular Research*, 10(3), 1375—1382. <https://doi.org/10.4238/vol10-3gmr1172>.

Sharma, A., & Shanker, R. (2021). Standardized *Allium* test protocol. *Environmental and Molecular Mutagenesis*, 62(4), 304—313. <https://doi.org/10.1002/em.22427>.

Sivagourounadin, K. (2022). Mutagenic Toxicity Testing. In: Lakshmanan, M., Shewade, D. G., Raj, G. M. (eds). *Introduction to Basics of Pharmacology and Toxicology*. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-5343-9\\_43](https://doi.org/10.1007/978-981-19-5343-9_43).

Skrbic, N., Pedersen, A. K., Christensen, S. C., Hansen, H. C. B., & Rasmussen, L. H. (2020). A novel method for determination of the natural toxin ptaquiloside in ground and drinking water. *Water*, 12(10), 2852. <https://doi.org/10.3390/w12102852>.

Teixeira, R. O., Ferreira, P. M. P., de Almeida, R. N., & Anselmo, N. P. (2013). Cytogenetic effects of plant extracts. *Acta Botanica Brasilica*, 27, 87—94. <https://doi.org/10.1590/S0102-33062013000100010>.

Tkachuk, N., & Zelena, L. (2022). An onion (*Allium cepa* L.) as a test plant. *Biota. Human. Technology*, 3, 50—59. <https://doi.org/10.58407/bht.3.22.5>.

Wessner, D. R., Maiorano, P. C., Kenyon, J., Pillsbury, R., & Campbell, A. M. (2000). Spot-overlay Ames test of potential mutagens. *Assoc. Biol. Lab. Educ.*, 22, 1—18.

Xue, J., Lei, D., Zhao, X., Hu, Y., Yao, S., Lin, K., ..., & Cui, C. (2022). Antibiotic residue and toxicity assessment of wastewater during the pharmaceutical production processes. *Chemosphere*, 291, 132837. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132837>.

Zeiger, E. (2019). Ames test history and future. *Environmental and Molecular Mutagenesis*, 60(10), 784—789. <https://doi.org/10.1002/em.22322>.

Zhang, H., Hu, L., Zhong, G., Huo, Z., Chen, Y., Zhao, S., & Huang, L. (2021). Preliminary assessment of genotoxic effects induced by radiation from EAST using *Vicia faba* micronucleus assay. *Journal of Radiological Protection*, 41(2), 239. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/abe0d1>.

## **IMPROVING THE QUALITY OF OIL AND FAT PRODUCTS AS A FACTOR OF STRENGTHENING ITS MARKET COMPETITIVENESS**

**O. Sheremet, V. Strashynskyi**

*National University of Food Technologies*

---

**Key words:**

*Oil and fat products  
Quality  
Competitiveness  
International standards  
House of Quality  
Export  
Premium segment  
QFD  
Quality management  
Certification*

---

**Article history:**

Received 04.09.2025  
Received in revised form  
19.09.2025  
Accepted 08.10.2025

---

**Corresponding author:**

V. Strashynskyi

**E-mail:**

volodymyr.strashynskyi@  
gmail.com

**Citation:** Шеремет О. О.,  
Страшинський В. І. (2025).  
Підвищення якості олійно-жирової продукції як фактор посилення її конкурентоспроможності на ринку. *Наукові праці НУХТ*, 31(5), 111—125.  
DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-5-10

**ABSTRACT**

---

The conducted research made it possible to comprehensively substantiate the importance of quality as a key determinant of the competitiveness of oil and fat products on the global market. It was proven that improving product quality strengthens positions in target markets with high entry barriers (EU, China, India), enables the formation of price premiums in the premium segment, reduces the risk of economic losses due to non-compliance with standards, and increases the trust of international partners through the stability of characteristics and adherence to certification systems (ISO, FSSC, BRC). A key outcome was the development of a House of Quality (QFD method), which established the relationship between consumer expectations (transparency, shelf life, environmental friendliness, brand trust) and technical parameters of oil (acid value, moisture, color, purity, presence of foreign odors). Based on a comparison of the requirements of the Codex Alimentarius, the Chinese standard GB2716-2018, EU Regulation No. 1333/2008, and Ukrainian DSTU standards, an indicative compliance matrix of technical parameters was developed. This matrix enables Ukrainian producers to adapt their products to the requirements of specific markets, minimizing technological risks. Furthermore, the study proposes an algorithm for assessing the impact of quality on product competitiveness, which is structured into three modules: Regulatory Compliance (evaluation according to ISO, Codex, and national regulations); Consumer Expectations (analysis based on expert surveys of importers and traders); and Technological Adaptability of Enterprises (availability of innovations, production flexibility, modernization of logistics solutions). The application of this algorithm allows for the ranking of production capacities by their export readiness and the prediction of the likelihood of entering premium segments of foreign markets. The findings not only confirm the strategic role of quality in shaping competitive advantages but also provide effective tools for diagnosing, adapting, and managing quality in the context of globalized trade.

---

**DOI:** 10.24263/2225-2924-2025-31-5-10

---

## ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ОЛІЙНО-ЖИРОВОЇ ПРОДУКЦІЇ ЯК ФАКТОР ПОСИЛЕННЯ ЇЇ КОНКУРЕНТОСПРОМОЖНОСТІ НА РИНКУ

О. О. Шеремет, В. І. Страшинський

Національний університет харчових технологій

Проведене дослідження дало змогу комплексно обґрунтувати значення якості як визначального чинника конкурентоспроможності оліє-жирової продукції на світовому ринку. Доведено, що підвищення якості продукції сприяє зміцненню позицій на цільових ринках із високими бар'єрами входу (ЄС, Китай, Індія), дозволяє формувати цінову надбавку в преміум-сегменті, знижує ризики економічних втрат через невідповідність стандартам і підвищує довіру міжнародних партнерів завдяки стабільності характеристик та відповідності сертифікаційним системам (ISO, FSSC, BRC). Ключовим результатом стала побудова «будинку якості» (метод QFD), що дала змогу встановити взаємозв'язок між споживчими очікуваннями (прозорість, термін зберігання, екологічність, довіра до бренду) і технічними параметрами олії (кислотне число, вологість, колір, чистота, наявність сторонніх запахів). На основі порівняння вимог Codex Alimentarius, китайського стандарту GB2716-2018, регламенту ЄС №1333/2008 та ДСТУ було створено індикативну матрицю відповідності технічних показників, що дозволяє українським виробникам адаптувати продукцію до вимог конкретного ринку, мінімізуючи технологічні ризики. Крім того, розроблено алгоритм оцінювання впливу якості на конкурентоспроможність продукції, який базується на трьох модулях: регуляторна відповідність (оцінка за ISO, Codex, національні нормативи); очікування споживачів (аналіз за результатами експертного опитування імпортерів і трейдерів); технологічна адаптивність підприємства (наявність інновацій, гнучкість виробництва, модернізація логістичних рішень). Застосування цього алгоритму дає змогу здійснити рейтингування виробничих потужностей за рівнем готовності до експорту та передбачити ймовірність виходу на преміальні сегменти зовнішніх ринків. Результати дослідження не лише підтверджують стратегічну роль якості у формуванні конкурентних переваг, а й пропонують дієві інструменти діагностики, адаптації та управління нею в умовах глобалізованої торгівлі.

**Ключові слова:** оліє-жирова продукція, якість, конкурентоспроможність, міжнародні стандарти, «будинок якості», експорт, преміум-сегмент, QFD, управління якістю, сертифікація.

**Постановка проблеми.** У контексті глобалізації агропродовольчих ринків, зростання конкуренції та посилення регуляторних вимог до безпечності й якості харчової продукції особливого значення набуває забезпечення стабільної конкурентоспроможності вітчизняної олійно-жирової галузі. Соняшникова олія, як один із провідних експортних товарів агросектору України, виступає не лише джерелом валютних надходжень, а й індикатором технологічної зрілості виробництва, здатності до адаптації до міжнародних стандартів та очікувань споживачів. У таких умовах якість продукції стає визначальним чинником доступу до преміальних

сегментів ринку, укладання довгострокових контрактів і формування сталої експортної позиції. Проте на практиці забезпечення високої якості потребує не лише відповідності технічним параметрам, а й системного управління ризиками, внутрішнього контролю та інтеграції превентивних інструментів на всіх етапах ланцюга створення вартості.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Огляд сучасних досліджень у сфері конкурентоспроможності агропродовольчої продукції демонструє широку палітру методологічних підходів, акцентів та емпіричних висновків, що дозволяють глибше зрозуміти структурні особливості аграрного експорту, якість продукції й технологічний рівень галузі.

Зокрема, багатофакторну оцінку агропродовольчого експорту країн ЄС з урахуванням технічної складності товарів, що дала змогу класифікувати продукцію за рівнем складності та виявити країни з інноваційним потенціалом агроекспорту, здійснено в межах дослідження європейських науковців (Lādaru та ін., 2024). Аналіз позицій ЄС на ринку США з акцентом на сильні сторони європейського агропродовольчого експорту й оцінкою перспектив його розширення за умов укладення угоди про Зону вільної торгівлі здійснено в дослідженні (Pawlak, 2022). На відміну від попередніх підходів, у праці, присвяченій якості соняшникової олії, увага зосереджена на технологічній стабільності виробництва, зокрема ідентифіковано критичні точки впливу на колірний показник та обґрунтовано використання наноматеріалів для очищення (Клеуменова, Nazina, Bolgova, & Kopylov, 2022).

Окремий науковий інтерес становлять дослідження якості біодизеля з відпрацьованої кулінарної олії (WCO), у яких узагальнено ключові чинники, що впливають на стабільність і придатність сировини, а також підкреслено роль належного збору й зберігання для запобігання деградації продукту (Lopresto, De Paola, & Calabrò, 2024). У вітчизняному контексті запропоновано стратегічне бачення розвитку олійно-жирового комплексу України з акцентом на інноваційну трансформацію галузі, модернізацію логістичних ланцюгів і просування продукції з високим вмістом олеїнової кислоти як чинників сталого конкурентного зростання (Бритвенко, 2019). Поведінкові та функціональні прояви конкуренції в межах галузі було проаналізовано за допомогою економіко-статистичного моделювання та виробничих функцій, що дозволило ідентифікувати вплив ресурсних чинників на динаміку виробництва (Благодир, & Вигонюк, 2015).

Перспективи розвитку галузі шляхом технічного оновлення, підтримки локальних сортів і технологічних інновацій висвітлено через комплекс заходів щодо підвищення довгострокової конкурентоспроможності підприємств (Буряченко, & Ткачук, 2021). Методичні підходи до оцінювання комплементарності зовнішньої торгівлі аграрного сектору України та емпіричний аналіз з використанням індексів і кластерного методу дозволили виявити нерозкритий потенціал агроекспорту й обґрунтувати напрями диверсифікації, зокрема підтримки малих виробників і органічної продукції (Куцик, Шавга, Семів, Куцик, & Вірт, 2023). Комплексний підхід до управління виробничою та зовнішньоекономічною діяльністю підприємств олійно-жирового комплексу як єдиного управлінського процесу, що поєднує економічні, соціальні, екологічні та інституційні ефекти, представлено в дослідженні (Казанджі, 2019).

Питання логістичного забезпечення в умовах невизначеності, що впливає на

переробку олійних культур, стабільність контрактів і продовольчу безпеку, розкрито через аналіз трансформації ланцюгів постачання (Харін, 2025). У міжнародному вимірі виявлено ключові детермінанти конкурентоспроможності країн-експортерів пальмової олії, серед яких — чисельність населення, структура імпорту та рівень ВВП на душу населення, що істотно впливають на торговельну перевагу (Tandra, Suroso, Syaikat, & Najib, 2022).

Попри значну увагу науковців до питань конкурентоспроможності оліє-жирової галузі, низка аспектів залишається недостатньо дослідженою. Зокрема, це стосується глибокого порівняння стандартів якості національного та міжнародного рівнів, впливу якості на формування преміальної ціни та стабільності експортних контрактів, а також інтеграції інструментів оцінювання споживчих очікувань у стратегії підприємств.

Наше дослідження спрямоване на заповнення цих прогалів шляхом обґрунтування ролі якості оліє-жирової продукції як ключового чинника її конкурентоспроможності на глобальному ринку з урахуванням сучасних вимог Codex Alimentarius, ISO та національних нормативів.

**Метою дослідження** є обґрунтування ролі якісних характеристик у зміцненні конкурентоспроможності олійно-жирової продукції на міжнародному ринку, а також розроблення прикладних інструментів для оцінювання й управління якістю з урахуванням вимог міжнародних стандартів.

**Матеріали і методи.** Методологічною основою дослідження є концепція поєднання якісного та порівняльного аналізу у вимірюванні конкурентоспроможності експортної продукції оліє-жирової галузі. Для досягнення мети було застосовано метод «будинку якості» (House of Quality, HoQ), який дозволяє інтегрувати споживчі очікування (WHATs) з технічними характеристиками продукції (HOWs), що піддаються управлінському впливу з боку виробника.

У ході побудови моделі «будинку якості» було визначено критичні технічні характеристики, що мають найбільшу вагу з погляду споживчої цінності та регуляторних вимог. Зокрема, дослідження охоплювало такі параметри, як термоокислювальна стабільність, прозорість, кислотне число та пероксидне число. Ці характеристики були співвіднесені з основними очікуваннями кінцевих споживачів та стандартами якості.

Для порівняльної оцінки рівня відповідності української соняшникової олії міжнародним вимогам використано аналітичний зіставний підхід із залученням положень Codex Alimentarius, стандартів ISO, регламентів ЄС, Китаю та Індії. Це дозволило оцінити поточний якісний стан продукції в контексті глобальних нормативних обмежень і виявити сегменти, де українська продукція має переваги або потенціал для адаптації до вищих вимог.

Крім того, для ідентифікації чинників, що обмежують стабільність конкурентних переваг, було розроблено матрицю ризиків якості. Вона охоплює ключові точки у ланцюгу створення вартості — від постачання сировини до експорту, з виокремленням найбільш уразливих ділянок. На основі цього було сформовано алгоритм внутрішнього моніторингу якості, спрямований на профілактику втрат, контроль критичних точок і забезпечення відповідності продукції вимогам міжнародних ринків у режимі постійного контролю.

Загальний підхід у дослідженні ґрунтується на емпіричній перевірці відповідності технічних характеристик продукції споживчим очікуванням, що дозволило надати обґрунтовані висновки щодо напрямів підвищення якості як ключового інструменту посилення експортної конкурентоспроможності.

**Викладення основних результатів дослідження.** У сучасних умовах глобалізації та посиленої конкуренції на агропродовольчих ринках ключового значення набуває комплексне оцінювання конкурентоспроможності експортної продукції. Науковці пропонують різноманітні підходи до визначення її рівня, які умовно поділяються на кількісні, якісні та інтегральні.

Застосування індексних методик, зокрема RSCA і TBI, для визначення стабільності конкурентоспроможності на світовому ринку рослинної олії обґрунтовано в дослідженні (Tandra, Suroso, Syaukat, & Najib, 2022), де доведено вплив демографічних чинників, структури імпорту та екологічних стандартів на ринкову позицію країни. Водночас комплементарність аграрного експорту та кластерний аналіз дозволяють виявити незадіяний потенціал українського агросектору й обґрунтувати напрями його диверсифікації (Куцик, Шавга, Семів, Куцик, & Вірт, 2023).

Конкурентоспроможність продукції доцільно розглядати не лише через призму торговельних показників, а й як результат системного управління виробничими й зовнішньоекономічними процесами, що забезпечує сукупний економічний, соціальний, екологічний та інституційний ефект (Казанджі, 2019). На тлі високої турбулентності логістичної інфраструктури окремі дослідження акцентують на логістичних бар'єрах як факторах, що впливають на збереження довгострокових контрактів і підтримку продовольчої безпеки (Харін, 2025). Водночас урахування споживчих очікувань та їх узгодження з технічними параметрами продукції виступає основою для формування стійкого ринкового бренда (Балик, Стасіцький, & Стець, 2025).

Узагальнюючи результати дискусії, можна стверджувати, що найчастіше оцінювання конкурентоспроможності ґрунтується на таких показниках, як частка на ринку, цінова привабливість, рівень експорту, відповідність стандартам і торговельний баланс. Поширеними також є інструменти стратегічного аналізу (SWOT, PEST), анкетування стейкхолдерів і методи оцінювання клієнтської цінності (Customer Value Analysis), які дозволяють інтегрувати якісні й кількісні аспекти в єдину аналітичну модель.

Однак, попри визнання ролі технічних характеристик, у наукових підходах рідко реалізується системне співвіднесення споживчих вимог і технологічних параметрів продукції. Саме цю прогалину намагається заповнити побудована в межах нашого дослідження модель «будинку якості», що забезпечує кількісну інтерпретацію вагомості технічних параметрів у забезпеченні цільових характеристик конкурентоспроможності.

Таким чином, порівняння з існуючими підходами підтверджує доцільність інтеграції якісних і кількісних інструментів аналізу конкурентоспроможності з урахуванням вимог ринку, технологічної досяжності та стандартів. Запропонована модель QFD виступає інноваційним доповненням до існуючих методик і дозволяє поглибити стратегічне управління якістю продукції у межах олійно-жирової галузі.

Одним із ефективних засобів інтегральної оцінки конкурентоспроможності продукції з урахуванням споживчих вимог і технологічних можливостей є метод QFD

(Quality Function Deployment), основним інструментом якого виступає «будинок якості» (House of Quality) (Пітерська, 2022). У межах дослідження конкурентоспроможності рафінованої соняшникової олії як ключового експортного продукту оліє-жирової галузі України запропоновано та побудовано модель «будинку якості». Її використання дало змогу здійснити системну інтерпретацію технічних параметрів продукції крізь призму запитів зовнішніх споживчих ринків і визначити пріоритети подальшого вдосконалення якості на основі об'єктивних ринкових критеріїв.

«Дах» моделі представляє вимоги споживачів до якості продукції. Ці вимоги були сформовані на основі міжнародних стандартів (Codex Alimentarius, ISO 21092), європейських регламентів і специфікацій імпорتنних ринків (Індії, Китаю, Нідерландів). Серед найважливіших споживчих очікувань: прозорість і відсутність осаду; нейтральний смак і запах; стабільність хімічного складу (насамперед кислотного й пероксидного числа); безпечність (відсутність пестицидів і важких металів); тривалий термін зберігання без втрати властивостей; відповідність кольору за шкалою Lovibond.

«Перший поверх» будинку охоплює технічні характеристики, що можуть бути виміряні, задокументовані й оптимізовані виробником. До них належать: кислотне число, пероксидне число, прозорість, вміст фосфоліпідів, колір (Lovibond), залишки пестицидів, вміст важких металів, Rancimat-індекс (термоокислювальна стабільність).

«Стіни» — це матриця зв'язків між WHATs і HOWs, яка дозволяє виявити силу впливу технічних параметрів на задоволення конкретних споживчих вимог. Наприклад, прозорість як споживча вимога тісно пов'язана з однойменним фізичним параметром, а також із кольором і вмістом фосфоліпідів. Безпечність продукції визначається рівнем пестицидів і важких металів. Стабільність складу залежить від кислотного та пероксидного числа і Rancimat-індексу. Усі зв'язки були оцінені експертами за п'ятибальною шкалою, що дозволило побудувати кількісно обґрунтовану матрицю відповідності (рис. 1).

	Кислотне число	Пероксидне число	Прозорість	Фосфоліпиди	Колір	Пестициди	Метали	Rancimat	Важливість
Прозорість і відсутність осаду	3	1	5	1	3	1	1	3	5
Нейтральний смак і запах	2	1	2	1	3	1	1	2	4
Стабільний хімічний склад	5	5	2	1	1	1	1	4	5
Безпечність (пестициди, метали)	1	1	1	2	1	5	5	1	5
Тривалий термін зберігання	2	2	3	1	1	1	1	5	3
Відповідність кольору	1	1	3	1	5	1	1	2	4
Σ (Інтегральна оцінка)	63	49	69	36	60	34	34	71	

**Рис. 1. Матриця відповідності споживчих вимог і технічних характеристик продукції в системі «будинку якості» (авторська розробка)**

Кожному зв'язку в матриці присвоєно бал інтенсивності (від 1 до 5) відповідно до експертної оцінки сили впливу кожної характеристики на реалізацію конкретної вимоги. Для забезпечення кількісної інтерпретації введено коефіцієнти важливості кожної споживчої вимоги (табл. 1), що ґрунтуються на результатах опитування провідних експортерів, трейдерів і представників роздрібних мереж країн-імпортерів.

**Таблиця 1. Перелік споживчих вимог до якості соняшникової олії та їх вагова важливість**

№ з/п	Споживча вимога	Важливість (за 5-бальною шкалою)
1.	Прозорість і відсутність осаду	5
2.	Нейтральний смак і запах	4
3.	Стабільний хімічний склад	5
4.	Безпечність (пестициди, важкі метали)	5
5.	Тривалий термін зберігання	3
6.	Відповідність кольору	4

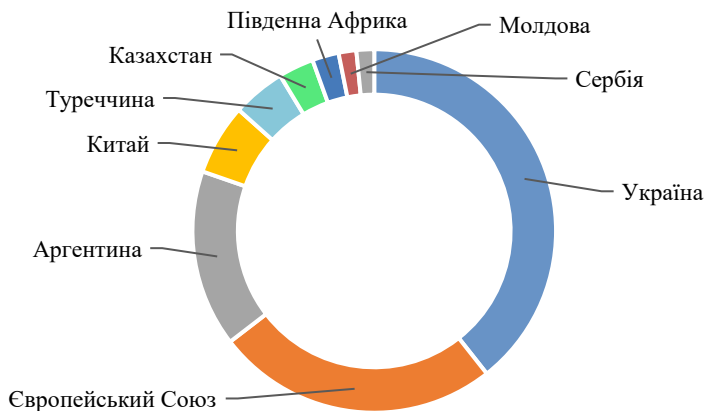
*Джерело:* авторська розробка.

«Підвал» моделі визначає цільові значення технічних характеристик, яких слід дотримуватись для відповідності міжнародним вимогам. Серед них: кислотне число —  $\leq 0,6$  мг КОН/г; пероксидне число —  $\leq 10$  ммоль/кг; прозорість — повна при 20 °C; Rancimat-індекс — не менше 10 годин; колір —  $\leq 1,5$  за червоною шкалою Lovibond; залишки пестицидів та важких металів — в межах, допустимих Codex Alimentarius.

«Корпус» моделі «будинку якості» (Competitive Assessment) реалізовано через багатовекторний аналіз конкурентних позицій України порівняно з основними країнами-виробниками та споживачами соняшникової олії. Особливу увагу приділено державам, які формують ключову конкуренцію або стабільний імпортерський попит: Аргентині, Туреччині, Китаю, Індії, а також країнам Європейського Союзу, оскільки саме на цих ринках рівень вимог до якості продукції та її сертифікації є особливо високим.

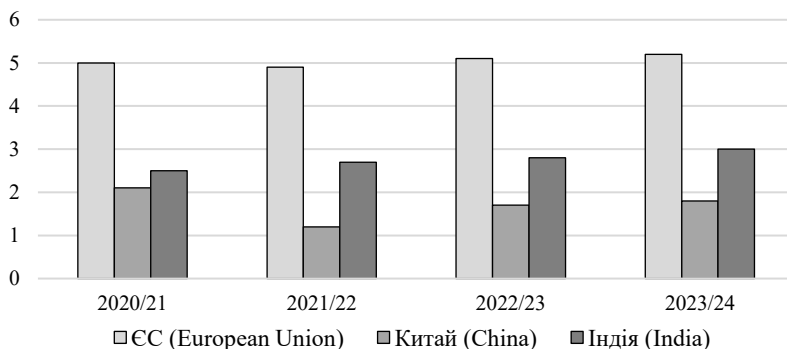
У цьому контексті важливим підґрунтям для оцінювання конкурентних переваг виступає структура світового виробництва насіння соняшнику, яка демонструє високу концентрацію та, відповідно, інтенсивне конкурентне середовище в олієжировій галузі. У 2024/2025 маркетинговому році Україна зберігає провідну позицію з часткою понад 39%, суттєво випереджаючи країни ЄС (25,2%) та Аргентину (15,7%). Водночас низка інших держав, зокрема Китай, Туреччина, Казахстан, Південна Африка, Молдова та Сербія, формують стабільний регіональний попит і дедалі активніше заявляють про себе як потенційні конкуренти в окремих ринкових нішах (рис. 2).

Аналіз структури світового виробництва насіння соняшнику (рис. 2) демонструє домінуючі позиції України, що створює основу для подальшого посилення експортного потенціалу в умовах високої конкуренції. Однак лідерство у виробництві має бути підкріплене відповідними зрушеннями у зовнішньоекономічній діяльності, зокрема в розширенні присутності на ключових ринках зростаючого попиту.



**Рис. 2. Частка провідних країн у світовому виробництві насіння соняшнику у 2024—2025 рр., %** (побудовано на підставі <https://www.chemanalyst.com/NewsAndDeals/NewsDetails/understanding-the-global-sunflower-oil-supply-chain-from-farm-to-end-use-38222>; <https://fsccluster.org/sites/default/files/2024-05/WFP-0000158232.pdf>)

Рис. 3 відображає динаміку внутрішнього споживання соняшникової олії у трьох основних імпортерах: Європейському Союзі, Китаї та Індії. За період 2020—2024 рр. спостерігається стійка тенденція до зростання споживання, що створює привабливі умови для нарощування експортних поставок з боку України. Особливо помітне збільшення внутрішнього попиту в Індії та Китаї, де якість, ціна та стабільність логістики є визначальними чинниками при формуванні довгострокових контрактів.



**Рис. 3. Внутрішнє споживання соняшникової олії в ЄС, Китаї та Індії у 2020—2024 рр., млн тонн** (джерело: побудовано на підставі <https://www.chemanalyst.com/NewsAndDeals/NewsDetails/understanding-the-global-sunflower-oil-supply-chain-from-farm-to-end-use-38222>; <https://fsccluster.org/sites/default/files/2024-05/WFP-0000158232.pdf>)

Крім того, цінова ситуація на світовому ринку олії, зокрема зниження котирувань українського експорту до \$1 110—1 115/т (FOB Black Sea), чинить тиск на маржинальність поставок, що актуалізує потребу в стратегічному позиціонуванні продукції в преміум-сегменті. У цьому контексті підвищення якісних параметрів, відповідність міжнародним стандартам і прозорість постачання набувають визначального значення.

На основі експертного порівняльного аналізу технічних характеристик рафінованої соняшникової олії встановлено, що українська продукція має низку конкурентних переваг, зокрема: високий рівень прозорості та відсутність осаду — результат застосування прогресивних методів рафінації та фільтрації; високий Rancimat-індекс — свідчення про високу термоокислювальну стабільність, що є критично важливим показником для тривалого зберігання й транспортування; низький рівень домішок (пестицидів, важких металів, фосфоліпідів), що підтверджує відповідність міжнародним регламентам Codex Alimentarius і вимогам імпортерів.

Водночас виявлено окремі зони потенційного вдосконалення, а саме: стабільність кольору (особливо при тривалому зберіганні в умовах високої вологості чи температури); смакові характеристики, які можуть змінюватися через логістичні фактори (наприклад, тривалі морські перевезення без оптимального температурного режиму); позиціонування в преміум-сегменті, що потребує підвищення сенсорної однорідності олії та маркування сертифікації.

Таким чином, «Корпус» моделі «будинку якості» вказує не лише на технічний стан продукту, а й на його стратегічну конкурентну позицію на ринку, визначає пріоритети для технологічних інновацій і спрямування маркетингових зусиль на країни з динамічним попитом.

На основі побудованої моделі здійснено розрахунок інтегральної значущості кожної технічної характеристики, що відображено в табл. 2.

*Таблиця 2. Інтегральна оцінка технічних характеристик за методом «будинку якості»*

№ з/п	Технічна характеристика	Інтегральний бал важливості
1.	Rancimat-індекс	71
2.	Прозорість	69
3.	Кислотне число	63
4.	Колір (Lovibond)	60
5.	Пероксидне число	49
6.	Вміст фосфоліпідів	36
7.	Залишки пестицидів	34
8.	Важкі метали	34

*Джерело:* авторська розробка.

Найвищі значення отримали Rancimat-індекс (71 бал), прозорість (69 балів), кислотне число (63 бали) та колір (60 балів). Саме ці параметри найбільше впливають на потрапляння продукції до преміального сегменту та визначають її стабільність у логістичних ланцюгах.

Узагальнення результатів побудови «будинку якості» підтверджує його цінність як аналітичної платформи для: визначення пріоритетних технічних параметрів продукції з урахуванням споживчих очікувань і ринкових вимог; формування ефективної системи внутрішнього контролю якості; мінімізації втрат якості під час зберігання, транспортування та тривалого експорту; забезпечення стабільності характеристик під час виходу на нові експортні ринки; впровадження механізмів бенчмаркінгу конкурентоспроможності на основі технічних індикаторів.

Отже, модель QFD довела свою результативність не лише як засіб діагностики сильних і вразливих місць у системі управління якістю олійно-жирової продукції,

а й як стратегічний інструмент для підвищення її експортного потенціалу. Завдяки системному підходу вдалося визначити ключові характеристики, що потребують першочергової оптимізації, і закласти підґрунтя для подальшої розробки інструментів управління, зокрема внутрішнього моніторингу якості та виявлення критичних точок ризику в межах усього виробничо-логістичного ланцюга.

Для поглибленої оцінки ринкової придатності української оліє-жирової продукції здійснено зіставлення середніх значень ключових показників якості з нормативами, встановленими провідними міжнародними стандартами та вимогами основних країн-імпортерів. Такий підхід дозволив оцінити рівень відповідності продукції українського походження регуляторним критеріям Codex Alimentarius, ISO, Європейського Союзу, а також національних технічних регламентів Індії та Китаю. Узагальнені результати наведено в табл. 3.

**Таблиця 3. Порівняння показників якості української соняшникової олії зі стандартами Codex Alimentarius, ISO, ЄС та окремих країн-імпортерів**

Показник якості	Україна (середнє)	Codex Alimentarius	ISO 21092/ISO 3960	ЄС (Reg. 1333/2008; 2019/1381)	Індія (IS 4277:2021)	Китай (GB 2716-2018)
Кислотне число, мг КОН/г	0,4	≤0,6	≤0,6	≤0,5	≤0,5	≤0,5
Пероксидне число, ммоль О <sub>2</sub> /кг	2,5	≤10	≤10	≤5	≤5	≤5
Колір (Lovibond)	до 2,5	н/д	н/д	визначений	≤2,0	≤2,0
Прозорість, ум.од.	висока	висока	визначається оптично	висока	прозора	прозора
Вміст фосфоліпідів, %	0,04	≤0,1	≤0,1	≤0,05	≤0,05	≤0,05
Залишки пестицидів, мг/кг	<0,01	макс. 0,01	н/д	≤0,01	≤0,01	≤0,01
Важкі метали: Pb, мг/кг	<0,05	≤0,1	н/д	≤0,1	≤0,1	≤0,1

*Джерело:* побудовано за <https://www.fao.org/4/y2774e/y2774e04.htm>; <https://www.iso.org/standard/73238.html>; [https://www.chinesestandard.net/PDF.aspx/GB2716-2018?English\\_GB%202716-2018](https://www.chinesestandard.net/PDF.aspx/GB2716-2018?English_GB%202716-2018); <http://data.europa.eu/eli/reg/2008/1333/oj>, <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/1381/oj/eng>

Результати проведеного порівняльного аналізу засвідчили, що українська соняшникова олія загалом відповідає вимогам провідних міжнародних стандартів якості, зокрема Codex Alimentarius, ISO 21092, а також регламентам Європейського Союзу, Індії та Китаю. Узгодженість базових показників з нормативними межами підтверджує високий технологічний рівень вітчизняного виробництва та потенціал продукції для стабільної присутності на зовнішніх ринках.

Зокрема, середнє кислотне число української олії становить 0,4 мг КОН/г, що є нижчим за граничні значення у більшості стандартів (0,5—0,6 мг КОН/г), і вказує на високу ступінь рафінації, стійкість до гідролізу та якісну стабільність продукту. Пероксидне число, як індикатор початкової стадії окислення жирних кислот, також утримується в межах допустимих рівнів (2,5 ммоль О<sub>2</sub>/кг при дозволених

5—10), що свідчить про свіжість олії, ефективність дезодорації та низький рівень вторинного псування.

Параметри кольору й прозорості відповідають регламентованим критеріям ЄС, Китаю та Індії, забезпечуючи привабливий зовнішній вигляд продукції та її належність до вищих споживчих категорій. Особливе значення мають також показники вмісту фосфоліпідів і залишкових пестицидів — у досліджуваних зразках вони становили відповідно 0,04% та <0,01 мг/кг, що є нижчим за максимально допустимі межі відповідних стандартів ( $\leq 0,05$ —0,1), що підтверджує високий рівень екологічної безпеки та санітарної відповідності.

У контексті токсикологічного контролю визначальним є рівень вмісту важких металів, зокрема свинцю (Pb), який у середньому не перевищує 0,05 мг/кг, що є суттєво нижчим за норму Codex Alimentarius, ЄС і азійських регламентів ( $\leq 0,1$  мг/кг). Це надає підстави вважати українську продукцію безпечною для здоров'я споживачів і конкурентоспроможною у країнах з жорсткими вимогами до харчових продуктів.

Таким чином, українська соняшникова олія має високий потенціал виходу на ринки Індії, Китаю, країн ЄС та інших регіонів за умови збереження стабільної якості, відповідного маркування та сертифікаційного супроводу. Відповідність міжнародним стандартам створює умови для позиціонування продукції в преміум-сегментах, отримання цінової надбавки, підвищення експортної маржинальності, а також укладання довгострокових контрактів зі зменшеними регуляторними ризиками.

Загалом, результати проведеного порівняння не лише підтвердили відповідність української соняшникової олії міжнародним вимогам, а й засвідчили наявність передумов для розширення її експортного потенціалу. Водночас ефективне використання виявлених конкурентних переваг потребує системного підходу до управління якістю на всіх етапах виробничо-логістичного ланцюга. У цьому контексті особливого значення набувають практичні інструменти, що дозволяють мінімізувати ризики втрати якісних характеристик продукції та забезпечити її стабільну відповідність вимогам споживачів.

В умовах зростаючих вимог до безпечності, стабільності та документованої якості харчової продукції на міжнародному ринку, ефективне управління ризиками якості на всіх етапах ланцюга створення вартості набуває критичного значення. Недостатньо лише відповідати стандартам на момент контролю готової продукції — важливо забезпечити безперервну якість на кожній технологічній фазі, починаючи з первинного виробництва та закінчуючи доставкою до кінцевого споживача.

З метою систематизації потенційних загроз якості та розроблення превентивних заходів було побудовано авторську матрицю ризиків у межах виробничо-логістичного ланцюга для експортоорієнтованої олійно-жирової продукції (табл. 4).

Запропонована матриця слугує інструментом стратегічного управління якістю, що дозволяє суб'єктам олійно-жирового сектору не лише виявляти слабкі ланки у виробничо-логістичному процесі, але й активно впливати на зниження ризиків втрати конкурентоспроможності.

Наступним елементом системного забезпечення конкурентоспроможності є роз-

роблення алгоритму внутрішнього моніторингу якості (рис. 4), який охоплює ключові функціональні блоки, взаємозв'язки між ними та механізми зворотного контролю.

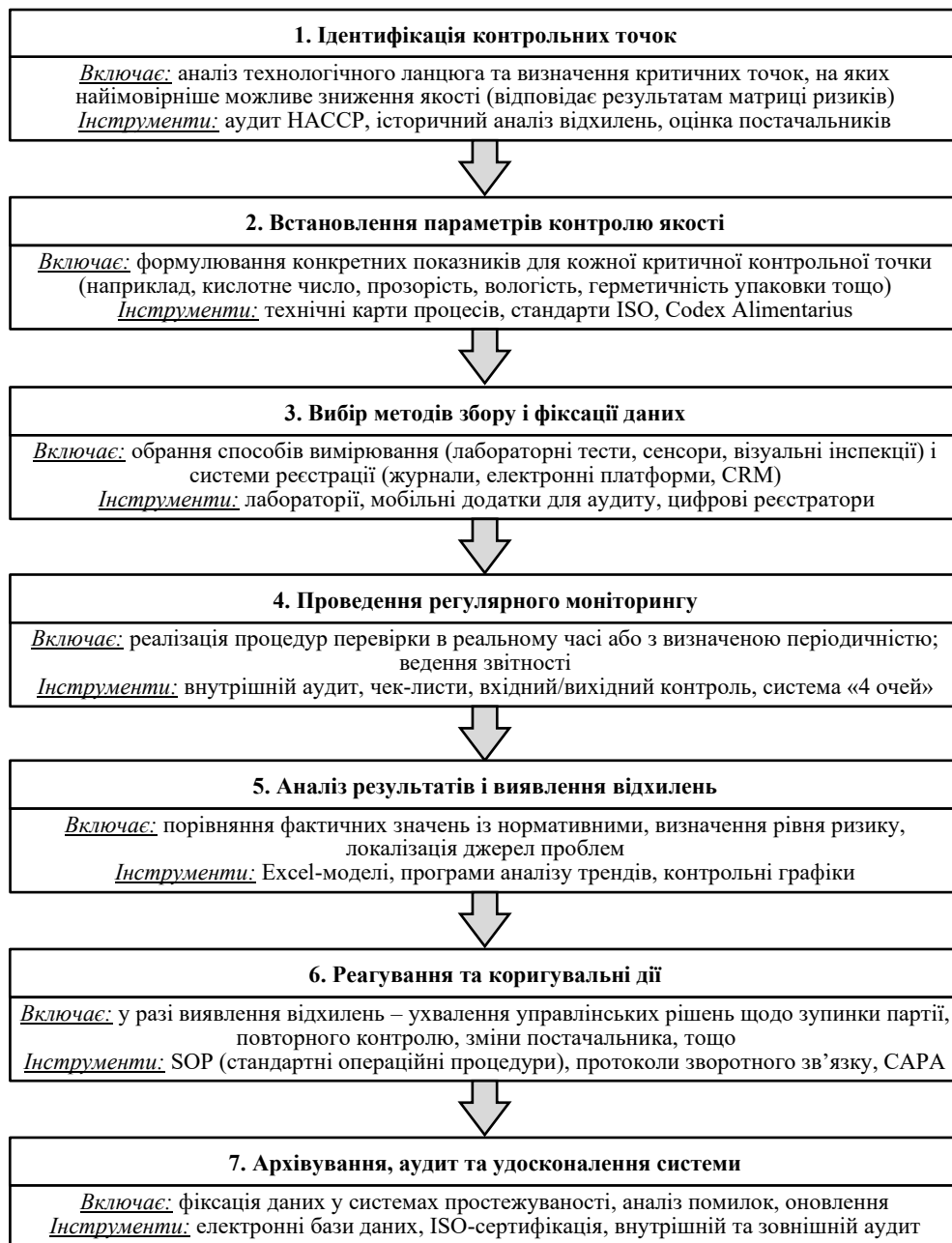
**Таблиця 4. Матриця ризиків якості у виробничо-логістичному ланцюзі олійно-жирової продукції**

Етап ланцюга	Можливі ризики	Критичність ризику	Рекомендовані заходи
Вирощування сировини	Контамінація пестицидами, важкими металами, мікотоксинами	Висока	Аудит ґрунтів, контроль агрохімікатів, впровадження GAP, агрономічний супровід
Зберігання сировини	Підвищена вологість, самозігрівання, розвиток плісняви, окислення ліпідів	Висока	Контроль температури та вологості, вентиляція, періодичний лабораторний аналіз
Переробка (екстракція, рафінація)	Залишки фосфоліпідів, нестабільне пероксидне число, недостатнє очищення	Висока	Впровадження НАССР, контроль параметрів рафінації, вхідний і вихідний контроль якості
Фасування та пакування	Контакт із повітрям, порушення герметичності, низька якість тари	Середня	Використання інертного середовища, сертифікованої упаковки, тестування бар'єрних властивостей
Логістика (внутрішня та міжнародна)	Температурні коливання, вібрація, затримки, механічні пошкодження	Середня	Вибір логістичних партнерів що забезпечать відповідний температурний контроль та дотримання умов перевезення у контрактах
Митне оформлення	Помилки в маркуванні, втрата документів, затримка з сертифікатами	Низька	Стандартизоване маркування, юридична та митна підготовка документів, попередній аудит зовнішньоекономічних договорів
Доставка кінцевому споживачеві	Пошкодження упаковки, тривале зберігання без температурного режиму	Середня	Температурний моніторинг останнього етапу, контроль від дистриб'ютора

*Джерело:* авторська розробка

Запропонований алгоритм формує системне середовище для превентивного управління якістю та дозволяє підприємствам: здійснювати оперативне реагування на потенційні порушення стандартів, підтримувати довіру з боку імпортерів і зовнішніх аудиторів, забезпечувати відстежуваність і прозорість усього ланцюга поставок, адаптувати систему до вимог ISO 22000, FSSC 22000, BRC та Global GAP.

Його впровадження виступає необхідною умовою для підвищення експортної привабливості олійно-жирової продукції, зменшення втрат, пов'язаних з рекамаціями, і зміцнення довгострокової конкурентоспроможності підприємства на глобальному ринку.



**Рис. 4. Алгоритм внутрішнього моніторингу якості оліс-жирової продукції**  
(джерело: авторська розробка)

## **Висновки**

У результаті проведеного дослідження було встановлено, що якість продукції

олійно-жирової галузі є ключовим фактором формування її конкурентоспроможності на міжнародному ринку, особливо в умовах посилення стандартів безпечності, простежуваності та сертифікаційних бар'єрів з боку країн-імпортерів. На основі побудови «будинку якості» ідентифіковано критичні технічні характеристики, які мають найбільшу вагу з точки зору споживчих очікувань та міжнародних регламентів, зокрема термоокислювальна стабільність, прозорість, кислотне і пероксидне число.

Порівняльний аналіз з Codex Alimentarius, стандартами ISO, регламентами ЄС, Китаю та Індії довів, що українська соняшникова олія в середньому відповідає базовим якісним показникам, а за деякими критеріями навіть перевищує мінімальні нормативи. Це створює потенціал для зміцнення позицій на зовнішніх ринках, особливо у преміальних сегментах, де якість продукції має прямий вплив на цінову надбавку, обсяг замовлень і стійкість контрактних зв'язків.

З метою стабільного утримання і масштабування конкурентних переваг доцільним є інституціоналізація управління якістю, що реалізується через впровадження дієвих внутрішніх інструментів. Побудована матриця ризиків дозволила виявити найуразливіші ділянки ланцюга постачання, а алгоритм внутрішнього моніторингу якості — структурувати дії щодо профілактики втрат, контролю критичних точок і забезпечення відповідності міжнародним стандартам у режимі реального часу.

Перспективи подальших досліджень полягають у розробленні цифрових рішень для автоматизації процесів моніторингу якості, інтеграції інструментів блокчейн-трансування та моделюванні впливу факторів якості на цінову еластичність експортної продукції.

## **Література**

Балик, У. О., Стасіцький, І. А., & Стець, О. М. (2025). Формування товарної стратегії розвитку бренда підприємства на олійно-жировому ринку. *Актуальні питання економічних наук*, 8. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14922655>.

Благодир, Л. М., & Виголюк, Н. Г. (2015). Конкуренція в олійно-жировій галузі України: поведінковий і функціональний аспекти. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 6, 35—42.

Бритвенко, А. С. (2019). Впровадження інновацій у виробництво оліе-жирової продукції. *Економічний вісник університету*, 42, 49—58. <https://doi.org/10.31470/2306-546X-2019-42-49-58>.

Буряченко, О., & Ткачук, Л. (2021). Оцінка перспектив одержання конкурентних переваг підприємствами олійно-жирової галузі України. *Економіка та суспільство*, 34. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-34-59>.

Казанджі, А. В. (2019). *Управління виробничою та зовнішньоекономічною діяльністю підприємств олійно-жирового комплексу України*: автореф. дис. ... канд. екон. наук, Миколаївський нац. аграр. ун-т. [https://www.mnau.edu.ua/files/spec\\_vchen\\_rad/d\\_38\\_806\\_01/ref\\_kazandzhi.pdf](https://www.mnau.edu.ua/files/spec_vchen_rad/d_38_806_01/ref_kazandzhi.pdf).

Котелевець, Д. О. (2016). Аналіз методичних підходів оцінювання конкурентоспроможності підприємств з перероблення сільськогосподарських продуктів. *Причорноморські економічні студії*, 8, 268—271. <https://www.bsos.in.ua/journals/2016/8-2016/54.pdf>.

Куцик, П., Шавга, Л., Семів, С., Куцик, В., & Вірт, М. (2023). Пріоритети та механізми збалансування зовнішньої торгівлі аграрною продукцією на засадах комплементарності. *Financial and Credit Activity Problems of Theory and Practice*, 3(50), 382—397. <https://doi.org/10.55643/fcaptr.3.50.2023.4042>.

Пітерська, В. М. (2022). Механізми використання моделі «Будинок якості» при здійсненні транспортно-експедиторської діяльності. Взято з <https://api.dspace.khadi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/53078bf0-ca3f-4563-9370-161be93bfd8d/content>.

Харін, О. С. (2025). Розвиток логістичних потоків на сучасному оліє-жировому ринку України. *Інвестиції: практика та досвід*, 4, 163—167.

ChemAnalyst News. Understanding the global sunflower oil supply chain. Взято з <https://www.chemanalyst.com/NewsAndDeals/NewsDetails/understanding-the-global-sunflower-oil-supply-chain-from-farm-to-end-use-38222>.

Codex Alimentarius. (1999). *Codex Standard for Named Vegetable Oils (CODEX-STAN 210-1999)*. Взято з <https://www.fao.org/4/y2774e/y2774e04.htm>.

International Organization for Standardization. (2019). *ISO 17515-3:2019. Intelligent transport systems — Evolved-universal terrestrial radio access network. Part 3: LTE-V2X*. Взято з <https://www.iso.org/standard/73238.html> [in English].

Kleymenova, N. L., Nazina, L. I., Bolgova, I. N., & Kopylov, M. V. (2022). Sunflower oil quality management based on statistical analysis of its indicators. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1052, 012089. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1052/1/012089>.

Lădaru, G. R., Lombardi, M., Petre, I. L., Dobrotă, C. E., Platania, M., & Mocanu, S. (2024). Analysis of export competitiveness of agri-food products at the EU-27 level through the perspective of technical complexity. *Sustainability*, 16(13), Article 5807. <https://doi.org/10.3390/su16135807>.

Lopresto, C. G., De Paola, M. G., & Calabrò, V. (2024). Importance of the properties, collection, and storage of waste cooking oils to produce high-quality biodiesel — An overview. *Biomass and Bioenergy*, 189, 107363. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107363>.

Mizik, T. (2021). Agri-food trade competitiveness: A review of the literature. *Sustainability*, 13(20), Article 11235. <https://doi.org/10.3390/su132011235>.

National Health Commission of the People's Republic of China, & State Administration for Market Regulation. (2018). *National Food Safety Standard — Vegetable Oil: GB 2716-2018* [Electronic resource]. Issued June 21, 2018. Implemented December 21, 2018. Взято з <https://www.chinese-standard.net/PDF.aspx/GB2716-2018?EnglishGB%202716-2018>.

Nurrochmat, N. A., Indrawati, I., Adzkie, U., & Ekayani, M. (2024). Market competitiveness of sunflower seed and oil products. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1379, 012024. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1379/1/012024>.

Pawlak, K. (2022). Competitiveness of the EU agri-food sector on the US market: Worth reviving transatlantic trade? *Agriculture*, 12(1), Article 23. <https://doi.org/10.3390/agriculture12010023>.

Regulation (EC) No 1333/2008 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2008 on food additives (Text with EEA relevance). *Official Journal of the European Union*, OJ L 354, 31.12.2008, 16—33. Взято з <http://data.europa.eu/eli/reg/2008/1333/oj>.

Regulation (EU) 2019/1381 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2019 on the transparency and sustainability of the EU risk assessment in the food chain and amending Regulations (EC) No 178/2002, (EC) No 1829/2003, (EC) No 1831/2003, (EC) No 2065/2003, (EC) No 1935/2004, (EC) No 1331/2008, (EC) No 1107/2009, (EU) 2015/2283 and Directive 2001/18/EC (Text with EEA relevance). *Official Journal of the European Union*, OJ L 231, 6.9.2019, 1—28. Взято з <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/1381/oj/eng>.

Tandra, H., Suroso, A. I., Syaikat, Y., & Najib, M. (2022). The determinants of competitiveness in global palm oil trade. *Economies*, 10(6), Article 132. <https://doi.org/10.3390/economies10060132>.

World Food Programme (WFP). (2024). *Ukraine wheat flour and sunflower oil value chains: Analysis of value chains with a focus on smaller farmers and processors near the frontline. Summary report*. Взято з <https://fscluster.org/sites/default/files/2024-05/WFP-0000158232.pdf>.

## RESEARCH ON THE IMPACT OF DIGITAL MARKETING TECHNOLOGIES ON THE ADVERTISING ACTIVITIES OF ENTERPRISES

L. Kapinus, O. Tur, O. Leleka

*National University of Food Technologies*

---

**Key words:**

*Digitalization  
Digital technologies  
Digital advertising  
Social networks  
Enterprise*

---

**Article history:**

Received 04.09.2025  
Received in revised form  
17.09.2025  
Accepted 10.10.2025

---

**Corresponding author:**

L. Kapinus

**E-mail:**

kapinuslv@nuft.edu.ua

**Citation:** Капінус Л. В., Тур О. В., Лелека О. О. (2025). Дослідження впливу цифрових маркетингових технологій на рекламну діяльність підприємств. *Наукові праці НУХТ*, 31(5), 126—138.  
DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-5-11

---

**ABSTRACT**

The importance of digital marketing technologies in the advertising activities of food industry enterprises is shown in the article. The relevance of the topic is driven by the need for businesses to quickly adapt to modern digital conditions, strengthen interactions with consumers, and use content as one of the key tools for shaping the value proposition of a food brand. The purpose of the study was to analyze the impact of digital marketing technologies on enterprises' advertising activities and to identify ways to enhance digital content for promoting food products in the online market.

General scientific methods, in particular theoretical generalization, systems analysis, and the method of comparison were used in the study. The following forms of digital advertising technologies for promoting food products: online advertising, social media marketing, intelligent and automated technologies, interactive visual technologies, and mobile and web portals were identified. There was also explored how consumers responded to various digital technologies used in food advertising.

Particular attention was given to creating a classification of digital technologies in food advertising, which includes communication channels, the level of interactivity, functional purpose, and degree of personalization. The proposed structure of marketing technologies in digital advertising makes it possible to develop more targeted communication campaigns. Such a classification also facilitates the reasonable integration of individual elements into a comprehensive strategy that aligns with current market trends and consumer demands.

Through a survey, consumer interaction with digital content about food products on social networks was examined. To enhance consumers' engagement with digital content, the introduction of gamified elements, interactive surveys, user-generated content, educational materials, personalized interaction, trending formats, and collaborations with influencers were proposed.

The results obtained may be valuable for marketers, digital communications specialists, as well as for scholars researching digital strategies in the field of branding and consumer behavior.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЦИФРОВИХ МАРКЕТИНГОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ НА РЕКЛАМНУ ДІЯЛЬНІСТЬ ПІДПРИЄМСТВ

Л. В. Капінус, О. В. Тур, О. О. Лелека

Національний університет харчових технологій

*У статті розглянуто значення цифрових маркетингових технологій у рекламній діяльності підприємств харчової промисловості. Актуальність теми обумовлюється потребою бізнесу швидко пристосовуватися до сучасних цифрових умов, посилювати взаємодію зі споживачами та використовувати контент як один із ключових засобів формування ціннісної пропозиції харчового бренду. Метою наукової роботи є дослідження впливу маркетингових діджитал-технологій на рекламну активність підприємств і визначення напрямів удосконалення цифрового контенту для просування харчових продуктів на онлайн-ринку.*

*У дослідженні використано загальнонаукові методи, зокрема теоретичне узагальнення, системний аналіз, метод порівняння. Таке методичне забезпечення надало можливість виокремити форми цифрових рекламних технологій для просування харчових продуктів: інтернет-реклама, маркетинг у соціальних мережах, інтелектуальні й автоматизовані технології, інтерактивні візуальні технології, мобільні та вебпортали. З'ясовано, як споживачі реагують на різні цифрові технології, які використовуються в рекламі харчових продуктів. Окрему увагу приділено систематизації цифрових технологій у рекламі харчових продуктів, яка включає такі класифікаційні ознаки: канали комунікації, рівень інтерактивності, функціональне призначення, ступінь персоналізації. Запропонована структура маркетингових технологій у діджитал-рекламі дає змогу розробляти більш цілеспрямовані комунікаційні кампанії. Також класифікація допомагає обґрунтовано поєднувати окремі маркетингові елементи в комплексну стратегію, що відповідає сучасним тенденціям ринку та споживчим запитам.*

*За допомогою методу опитування визначено взаємодію споживачів із цифровим контентом про харчові продукти у соціальних мережах. Для більш ефективної комунікативної активності споживачів із діджитал-контентом запропоновано впровадження гейміфікованих елементів, використання інтерактивних опитувань і залучення користувачького контенту (UGC), розвиток освітнього контенту, персоналізацію взаємодії брендів зі споживачами, використання актуальних трендів і колаборацій з інфлюенсерами.*

*Отримані результати можуть стати цінними для маркетологів, фахівців із цифрових комунікацій, а також для науковців, що досліджують цифрові стратегії у сфері брендингу та споживчої поведінки.*

**Ключові слова:** діджиталізація, цифрові технології, діджитал-реклама, соціальні мережі, підприємство.

**Постановка проблеми.** У сучасних умовах цифровізації світового економічного простору особливої ваги набуває наукове вивчення цифрових маркетингових

технологій у рекламній діяльності підприємств, зокрема підприємств харчової промисловості. Зростання ролі цифрових каналів зумовлене активною діджиталізацією комунікацій в діаді «підприємство—споживач», що істотно змінює способи формування попиту, моделі прийняття рішень споживачів про купівлю товарів та механізми їх просування на онлайн-ринку. Для харчової промисловості, яка задовольняє одну з базових потреб людини — харчування, особливо актуальною є формування теоретико-методичних і практичних основ застосування інноваційних діджитал-технологій у рекламі, які здатні одночасно впливати на емоційні, когнітивні та поведінкові аспекти споживчої поведінки.

Науковий сегмент дослідження цифрових маркетингових технологій дозволяє систематизувати існуючі інструменти, оцінити їхню результативність з огляду на різні групи споживачів, особливості продукту та специфіку каналів комунікації. Це стає запорукою розроблення пропозицій, які відповідають сучасним тенденціям відповідального споживання, високим стандартам безпеки харчових продуктів і соціальної відповідальності бізнесу. Тому розвиток наукових досліджень у галузі цифрових маркетингових технологій є ключовою умовою формування успішної рекламної діяльності підприємств харчової промисловості в умовах глобального ринку.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Цифрова реклама як вид комунікації є «потужним інструментом впливу на суспільну свідомість, формування споживчих переваг та стимулювання збуту товарів і послуг» (Гайкова, & Дніпровська, 2025). Зважаючи на те, що зростає рівень цифровізації в усіх сферах суспільства (Jusufi, & Xhafa, 2023), вчені відмічають певні тенденції. Персоналізація цифрових продуктів і послуг орієнтована на розроблення рекламних матеріалів, які максимально відповідають індивідуальним потребам і вподобанням споживачів (Бондаренко, & Омеляненко 2024). Відеореклама набирає дедалі більшої популярності у зв'язку зі зростанням обсягів відеоконтенту на платформах на кшталт YouTube та TikTok (Sharma, 2024). Соціальні мережі залишаються провідним каналом для розміщення цифрової реклами, охоплюючи публікації, сторіс та рекламні оголошення у месенджерах (Christina et al., 2019). Усе більшого значення набуває мобільна реклама в застосунках, а також використання оптимізованих вебресурсів як ефективних майданчиків для просування (Kumar, & Mittal, 2020). Інтеграція рекламних повідомлень у контент платформи зменшує їх нав'язливе сприйняття та підвищує привабливість для аудиторії (Seo, & Lee, 2021). Крім того, інтерактивні рекламні формати, що поєднують елементи взаємодії — голосові команди, анімаційні ефекти чи ігрові механіки, допомагають ефективно утримувати увагу цільових груп споживачів (Гайкова, & Дніпровська, 2025).

На нашу думку, такі тенденції невідворотно впливають на спосіб взаємодії бізнесу зі споживачами у сфері реклами харчових продуктів. Зважаючи на те, що харчова продукція є важливою складовою повсякденного життя кожної людини, особливої ваги набуває пошук сучасних підходів до її просування із використанням цифрових інструментів. Саме тому вважаємо доцільним і своєчасним розвивати тему розвитку цифрових технологій у рекламній діяльності підприємств харчової промисловості, що дозволить краще зрозуміти ефективні формати комунікації, підвищити рівень обізнаності споживачів та сприяти формуванню відповідального споживання.

**Мета дослідження:** дослідити вплив цифрових маркетингових технологій на рекламну діяльність підприємств і визначити напрями удосконалення цифрового контенту для просування харчових продуктів на онлайн-ринку.

**Матеріали і методи.** У цьому дослідженні використано комплекс загальнонаукових методів, серед яких провідну роль відіграє метод теоретичного узагальнення. Він дав змогу систематизувати та інтегрувати різнопланові напрацювання у сфері цифрової реклами та діджитал-технологій в маркетингу, а також поєднати дані з наукових публікацій, галузевих аналітичних звітів і практичного досвіду підприємств, що дозволило сформувати цілісне бачення сучасного стану використання цифрових технологій у рекламній діяльності підприємств харчової промисловості. Метод системного аналізу в цьому контексті забезпечує розгляд різних форм цифрових технологій у рекламі харчових продуктів як єдності взаємопов'язаних складових: діджитал-технологій і реакцій споживачів, а також ідентифікувати спільні та відмінні риси у цифрових технологіях у рекламі з метою розроблення класифікації за визначеними ознаками. Метод порівняння виступає важливим інструментом для формування пропозицій щодо використання цифрових технологій у рекламі харчових продуктів. Для вивчення взаємодії споживачів із технологіями рекламування харчових продуктів у соціальних мережах було використано метод опитування, який дозволив зібрати емпіричні первинні дані. Для побудови графіків і діаграм застосовано графічний метод візуалізації даних.

**Викладення основних результатів дослідження.** Опрацювання значної кількості наукової літератури надало можливість сформувати власне уявлення щодо визначення поняття «цифрові рекламні технології (digital advertising technologies)». Якщо узагальнити отриману інформацію, то це поняття можна трактувати як сукупність інструментів, онлайн-платформ і алгоритмів, що використовуються для створення, поширення, персоналізації та аналітики рекламного контенту в цифровому середовищі (Дорош, 2024; Серeda, & Єсімов, 2024; Храпкіна, & Іванова, 2021; Christina et al., 2019). Вони поєднують досягнення інформаційних технологій, маркетингових стратегій і поведінкової аналітики споживачів. Основу цифрових рекламних технологій становлять такі компоненти, як програматик-реклама (programmatic advertising), алгоритми машинного навчання для персоналізації повідомлень, використання Big Data для сегментації аудиторій, а також інструменти автоматизації маркетингу. До них також належать візуальні та інтерактивні елементи (AR/VR, відео, гейміфікація), які підвищують залучення споживачів (Saputra et al., 2024). Цифрові технології дозволяють здійснювати точне таргетування, ретаргетинг, аналіз поведінкових моделей користувачів і адаптацію контенту в режимі реального часу. Їхня ефективність значно вища порівняно з традиційними каналами через інтерактивність, вимірюваність результатів і гнучкість.

У рекламній діяльності підприємств харчової промисловості можна виділити такі форми цифрових рекламних технологій:

- інтернет-реклама: контекстна реклама (рекламні оголошення в Google, які з'являються за запитами користувачів); банерна реклама (візуальні оголошення на сайтах кулінарної тематики); нативна реклама (інтегровані тексти у фудблоггах, що рекламують продукт у вигляді тексту або поради);
- маркетинг у соціальних мережах (SMM): пости та публікації (візуальна подача продуктів та рецептів через Instagram, Facebook); Reels/Shorts/Clips (короткі

відео з приготування страв або розпакування продуктів); інтерактивний контент (опитування, голосування, тести, що підвищують залученість споживачів до бренду); колаборації з блогерами (огляди продуктів, челенджі, конкурси з призами від харчового бренду);

- інтелектуальні та автоматизовані технології: програматик-реклама (атоматизоване розміщення рекламних оголошень із точним таргетингом); ретаргетинг (повторна реклама користувачам, які вже цікавилися харчовим продуктом); AI/ML-рекомендації (алгоритми, які пропонують страви чи продукти за вподобанням користувача); Big Data-аналітика (персоналізація на основі демографії, поведінки користувачів, історії їхніх покупок);

- інтерактивні візуальні технології: AR (доповнена реальність) — AR-фільтри з продуктами, перегляд пакування у 3D-форматі; VR (віртуальна реальність) — віртуальні тури на виробництво 3D-дегустації; гейміфікація (онлайн-ігри на харчову тематику);

- мобільні та вебпортали: мобільні застосунки (здорове харчування, рецепти, бонус-програми з брендовою підтримкою); QR-коди (пропозиція користувачам перейти на сайт з рецептом, з інформацією про характеристики харчового продукту, акційні пропозиції від харчових брендів); e-mail-маркетинг (розсилки через електронну пошту з індивідуальними пропозиціями, купонами, новинками) (Серета, & Єсімов, 2024; Храпкіна, & Іванова, 2021; Christina et al., 2019; Wang, & Kim, 2018).

Узагальнення форм цифрових рекламних технологій сприяло виявленню цифрових рекламних технологій, які використовують українські харчові бренди для просування на онлайн-ринок своєї продукції (табл. 1).

**Таблиця 1. Найпоширеніші форми цифрової реклами продукції підприємств харчової промисловості**

Бренд	Цифрова технологія	Приклад/опис
ТМ «Яготинське для дітей»	SMM, інфлюенсер-маркетинг, відео-контент	В Instagram співпраця з мамами-блогерами, веселі відео про корисні сніданки
ТМ «Наша Ряба»	Big Data, програматик-реклама	Рекламні кампанії в Google з геотаргетингом, використання динамічних банерів
ТМ «Лімо»	Big Data, програматик-реклама	Конкурси на створення креативного десерту з продуктом, відео-рецепти в Instagram
ТМ «Рудь»	AR/VR, SMM, e-mail маркетинг	AR-кампанія з героями бренду, рецепти морозива на сайті, розсилки з акціями
ТМ «АВК»	AR/VR, SMM, e-mail маркетинг	Відео з дегустацією нових цукерок, челенджі з їжею, партнерство з фудблогерами
ТМ «Галичина»	SMM, екологічний storytelling, відеоконтент	Короткі відео про фермерство, «жива» естетика пакування, історії про походження продукту
ТМ «Верес»	YouTube, кулінарні канали, рецепти у блогах	Власні відео-рецепти, партнерство з кулінарними YouTube-блогерами

*Продовження таблиці 1*

ТМ «Чумақ»	SEO, нативна реклама, QR-коди	Посилання на рецепти з кетчупами на пакованні, партнерські статті у кулінарних ЗМІ
ТМ «Волошкове поле»	Email-розсилки, мобільні додатки (через доставку Rocket)	Програми лояльності, розсилки з акціями, рецепти з молоком і йогуртом

*Джерело: створено авторами.*

З табл. 1 видно, що підприємства харчової промисловості все активніше інтегрують цифрові рекламні технології у свої маркетингові стратегії. Це зумовлено змінами у поведінці споживачів, зростанням ролі інтернет-комунікацій, соціальних мереж і мобільних платформ у процесі прийняття рішень про покупку. Замість традиційної реклами (телебачення, друковані ЗМІ) компанії все частіше обирають такі інструменти, як таргетована реклама в соціальних мережах, відеоконтент у форматі коротких роликів, інфлюенсер-маркетинг, персоналізовані email-розсилки та технології доповненої реальності (AR).

Цифрові технології дозволяють харчовим брендам точно сегментувати аудиторію, здійснювати гнучке налаштування рекламних кампаній і відстежувати ефективність у режимі реального часу. Завдяки інтеграції Big Data та елементів штучного інтелекту, підприємства отримують можливість формувати більш релевантні рекламні повідомлення, адаптовані до потреб конкретних споживачів.

Цей підхід сприяє підвищенню конкурентоспроможності підприємств, формуванню лояльності споживачів, а також ефективному просуванню нових продуктів. У результаті цифрові рекламні технології стають невід’ємним компонентом сучасної комунікаційної політики підприємств харчової промисловості.

Також важливим питанням для розуміння ефективності сучасних комунікаційних інструментів є вивчення реакцій споживачів на різні форми цифрових технологій у рекламі харчових продуктів. Такі дослідження дозволяють виявити, які формати контенту, канали та рівень персоналізації найкраще впливають на залученість аудиторії та прийняття рішень про купівлю, що підвищує результативність маркетингових стратегій. Узагальнення досліджень, які показують, як споживачі реагують на різні цифрові технології в рекламі харчових продуктів, наведено в табл. 2.

З огляду на трансформаційні процеси в сучасному маркетингу, зростання обсягів і різноманітності цифрових інструментів, посилення конкурентного середовища та зміни в моделях споживання медіа й покупця виникає необхідність створення класифікації цифрових технологій у рекламі харчових продуктів. Споживачі харчових продуктів активно взаємодіють з контентом на різних цифрових платформах, шукають інформацію та відгуки, що вимагає від брендів гнучкості й присутності у відповідних точках контакту. Систематизований підхід до вибору цифрових рекламних технологій дозволяє оптимізувати маркетингові зусилля та, як наслідок, забезпечити сталу конкурентну перевагу на ринку. Запропонована класифікація зображена на рис. 1.

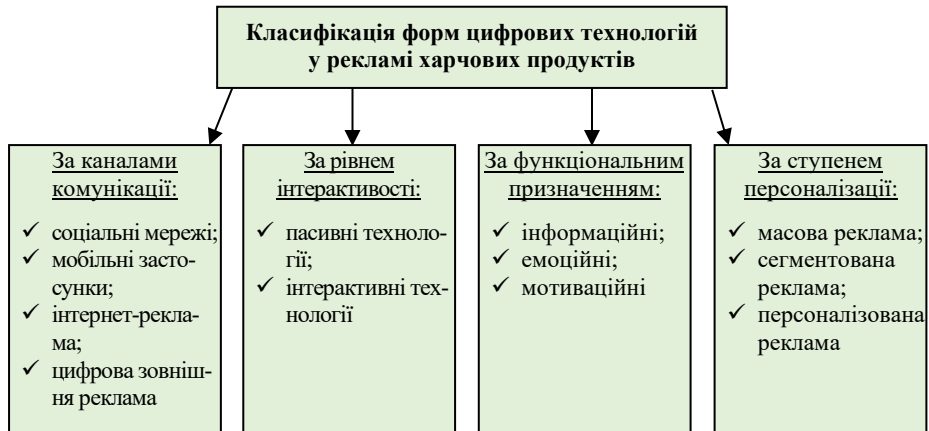
*Таблиця 2. Реакція споживачів на цифрові технології в рекламі харчових продуктів*

Технологія	Реакція споживачів	Результати досліджень
Соціальні мережі (Instagram, Facebook)	Високий емоційний відгук, особливо на відео з реальним досвідом: дегустації, рецепти. Споживачі довіряють контенту інфлюенсерів більше, ніж офіційній рекламі	68% молоді віком від 18 до 35 років підтвердило, що переглядають візуальний контент про продукти, рецепти приготування їжі в соціальних мережах (Hocaoglu, 2024)
Чат-боти та персоналізована реклама	Споживачі позитивно реагують на релевантну рекламу (врахування дієти, алергії, улюблених смаків)	62% споживачів очікують персоналізації, стверджуючи, що бренд втрапить їхню лояльність, якщо їхній досвід не буде персоналізованим. Водночас 49% стануть постійними покупцями, якщо буде запропоновано персоналізацію. Проте лише 40% споживачів кажуть, що довіряють брендам відповідально використовувати їхні дані та зберігати їх у безпеці (Data Analytics, 2022)
Відеоконтент (YouTube, Shorts, реклами перед роліками)	Відео викликають у споживачів вищу довіру, особливо якщо є процес приготування чи чесний відгук. Короткі відео краще сприймаються споживачами (до 30 сек)	Відеореклама забезпечує на 48% вищий рівень продажів, ніж статична реклама (Williams, 2020)
QR-коди або «розумне» пакування	У споживачів QR-коди викликають зацікавленість, якщо отримують корисний контент: рецепти, відео, історії виробництва харчового продукту, а також ігнорування, якщо в результаті споживачі отримують рекламу без додаткової цінності	57% споживачів стверджують, що будуть сканувати QR-коди, якщо знають, що отримують рецепт або книгу (Rotsios et al., 2022)
DOOH (Digital Out Of Home — цифрові білборди)	Споживачів захоплюють такі рекламні технології, особливо у містах, через інтерактивність, яскравість, рух	73% споживачів позитивно ставляться до цифрової зовнішньої реклами, 76% — готові діяти після взаємодії з DOOH (The Out of Home Advertising Association of America, 2024)

*Джерело: складено авторами.*

Систематизація форм цифрових технологій у рекламі харчових продуктів включає такі класифікаційні ознаки:

1. За каналами комунікації (характеризує, де саме відбувається взаємодія харчового бренду зі споживачем): соціальні мережі — популярні майданчики для відео, фото та взаємодії з харчовими брендами; мобільні платформи та застосунки — дозволяють персоналізувати рекламу та швидко доносити інформацію; інтернет-реклама — охоплює широкий спектр форматів на сайтах, у пошуку та e-mail; цифрова зовнішня реклама — екрани в публічних місцях, які поєднують візуальність і геолокацію.



**Рис. 1. Класифікація форм цифрових рекламних технологій для просування харчових продуктів** (розроблено авторами)

Соціальні мережі (Instagram, Facebook, YouTube) використовують для візуальної демонстрації приготування страв, food-контенту, оглядів харчових продуктів, фудблогів. Використання мобільних платформ і застосунків (чат-ботів, фудтрекерів) надають можливість ефективно просувати продукти через персональні поради, рецепти або рекомендації відповідно до дієти. Інтернет-реклама (банери, Google Ads, e-mail) дає змогу рекламувати знижки на продукти, запуск новинок у мережах супермаркетів, сезонні акції. Цифрова зовнішня реклама може показувати апетитні зображення страв, продуктів на вулицях, у ТРЦ, поруч із магазинами.

2. За рівнем інтерактивності (визначає ступінь залучення споживача у взаємодію з рекламою харчових продуктів): пасивні технології — не потребують дій від користувача, наприклад, відео чи банери; інтерактивні технології — вимагають активності від користувача (сканування, вибору, гри тощо). Пасивні технології — це різноманітні відео з приготування страв, банери з апетитним візуалом, які приваблюють увагу споживачів, але не вимагають дій. Інтерактивні технології — різноманітні AR-етикетки з рецептами, QR-коди на пакованні з інформацією про походження харчового продукту, гейміфіковані фудчеленджи в соціальних мережах.

3. За ступенем персоналізації (вказує на рівень рекламного повідомлення під конкретного споживача): масова реклама — однакове повідомлення для усіх споживачів; сегментована реклама — налаштована під групи користувачів за віком, статтю, поведінкою; персоналізована (прицільна) реклама — створюється на основі особистих даних, інтересів, попередніх дій користувача в мережі Інтернет. Як приклади, масова реклама — оголошення про знижки на печиво чи каву для усіх користувачів; сегментована реклама — спеціальні пропозиції для вегетаріанців, спортсменів або батьків маленьких дітей; персоналізована реклама — добірка безглютенних продуктів у мобільному додатку, яка формується на основі попередніх покупок або дієтичних налаштувань користувача.

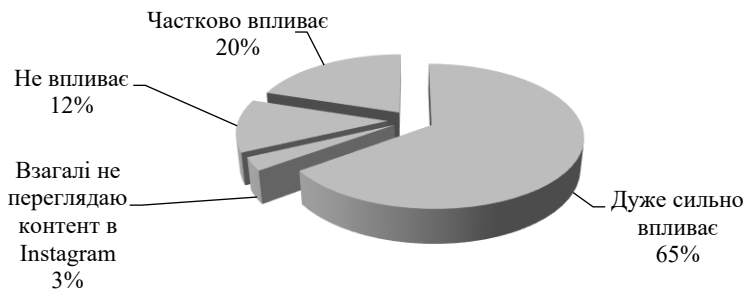
4. За функціональним призначенням (пояснює основну мету рекламного контенту): інформаційні — надають склад про склад, користь, особливості харчового

продукту; емоційні — формують позитивне ставлення через настрої, історії, візуальний стиль; мотиваційні — спонукають до дії (купівлі, участі, взаємодії через акції чи конкурси).

У сучасних умовах цифровізації ринку харчових продуктів зростає значущість системного підходу до вивчення форм цифрових рекламних технологій. Запропонована класифікація дозволяє структурувати різноманітні інструменти digital-комунікацій за каналами, рівнем інтерактивності, персоналізацією та функціональним навантаженням. Такий підхід дає змогу більш глибоко аналізувати ефективність окремих форматів реклами залежно від цільової аудиторії, типу продукту та комунікаційної мети.

Зокрема, чітке розмежування між пасивними та інтерактивними формами допомагає визначити ступінь залучення споживачів, а рівень персоналізації — адаптувати повідомлення під конкретні очікування споживача. Функціональний підхід дозволяє встановити, який саме вплив має реклама: когнітивний, емоційний чи поведінковий. Таким чином, класифікація виступає не лише як інструмент наукового аналізу, а й як практичний орієнтир для розробки цільових маркетингових стратегій у сфері просування харчової продукції.

На основі проведеного онлайн-опитування встановлено значущий вплив контенту про їжу, розміщеного в Instagram, на формування споживчого наміру спробувати або придбати конкретний харчовий продукт (рис. 2). Отримані результати підтверджують роль візуального та інформаційного контенту соціальних мереж як важливого чинника стимулювання купівельної активності цільової аудиторії (рис. 3).

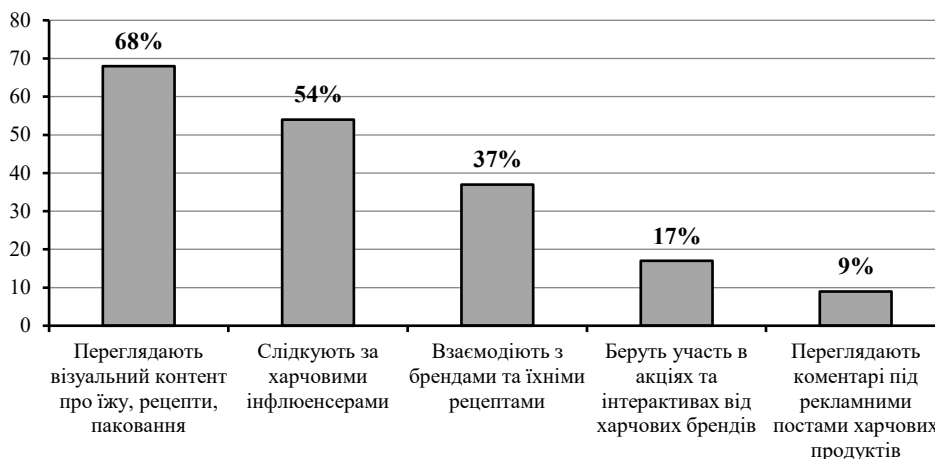


**Рис. 2.** Розподіл думок респондентів (18—45 років) про вплив контенту про їжу в Instagram на бажання споживачів спробувати або придбати харчовий продукт, % (створено авторами)

Взаємодія споживачів із харчовими продуктами в соціальних мережах має багаторівневий характер. Однією з найбільш поширених форм є перегляд візуального контенту (фото, відео, сторіс), який демонструє як готові страви, так і сам процес приготування, що сприяє емоційному залученню та стимулює апетитну мотивацію до споживання. Крім того, споживачі активно реагують на контент шляхом коментування, поширення та оцінювання, що забезпечує зворотний зв'язок і підвищує рівень довіри до бренду.

Значну роль відіграє користувачський контент (UGC), який створюється безпосередньо споживачами у вигляді відгуків, особистих рекомендацій або кулінар-

них публікацій. Такий контент функціонує як елемент соціального доказу, підсилюючи лояльність до бренду. Також важливим є елемент інтерактивної взаємодії через участь у конкурсах, опитуваннях і флешмобах. Застосування інструментів соціальної комерції, зокрема функцій прямого продажу в Instagram чи Facebook, формує новий канал реалізації, інтегрований у цифрове споживання.



**Рис. 3. Розподіл думок респондентів за видами взаємодії споживачів із контентом про харчові продукти в соціальних мережах, % (створено авторами)**

На основі вивчення теорії діджитал-технологій у рекламі й аналізу взаємодії споживачів із рекламою харчових продуктів у цифровому середовищі пропонуємо підходи до підвищення ефективності взаємодії споживачів із контентом про харчові продукти в соціальних мережах. Зокрема, доцільним є впровадження гейміфікованих елементів, використання інтерактивних опитувань і залучення користувачького контенту. Значну роль відіграє освітній контент у форматі експертних порад, коротких відеоуроків чи прямих ефірів із залученням фахівців. Персоналізація взаємодії за допомогою чат-ботів, голосування за новинки чи індивідуальні рекомендації сприяє зміцненню лояльності аудиторії. Додатково важливим є використання актуальних трендів і колаборацій з інфлюенсерами. Такий комплексний підхід сприяє формуванню залученості споживачів та підвищує ефективність просування продукції харчової промисловості у цифровому середовищі.

## **Висновки**

Вивчено теоретичні засади та практичні аспекти використання цифрових технологій у рекламній діяльності підприємств харчової промисловості, що дало змогу виокремити основні форми цифрових рекламних технологій для просування харчових продуктів, зокрема інтернет-рекламу, маркетинг у соціальних мережах, інтелектуальні та автоматизовані інструменти, інтерактивні візуальні рішення, мобільні застосунки та вебпортали, з метою подальшого розвитку ефективних стратегій цифрової комунікації у сфері просування харчової продукції та підвищення рівня залученості й обізнаності цільової аудиторії.

Розроблено класифікацію цифрових технологій у рекламі харчових продуктів, яка включає такі ключові ознаки, як канали комунікації, рівень інтерактивності, функціональне призначення та ступінь персоналізації, що є важливим кроком для підвищення ефективності маркетингової діяльності підприємств. Запропонована структура цифрових маркетингових технологій дає змогу формувати більш цілеспрямовані та комплексні комунікаційні кампанії, що відповідають актуальним вимогам ринку. Такий підхід допомагає підприємствам харчової промисловості не лише системно поєднувати різні інструменти діджитал-реклами, а й гнучко адаптувати їх до змін споживчих потреб, що сприяє залученню аудиторії та підвищенню лояльності до бренду.

За допомогою опитування визначено взаємодію споживачів із цифровим контентом про харчові продукти у соціальних мережах. З'ясовано, що для 65% опитаних віком від 18 до 45 років цифровий контент про їжу та харчові продукти в Instagram впливає на бажання спробувати або придбати певний харчовий продукт. У той же час 68% опитаних переглядають контент про їжу, рецепти, пакування харчових продуктів у соціальних мережах. Це свідчить про те, що соціальні мережі стають потужним каналом формування попиту. Результати демонструють, що візуальна привабливість, креативність і достовірність контенту безпосередньо впливають на рішення споживачів про купівлю продуктів. Зважаючи на це, для більш ефективної комунікативної активності споживачів із діджитал-контентом запропоновано напрями удосконалення цифрового контенту з фокусом на харчову тематику: гейміфікацію контенту (інтерактивні челенджі, сторіс-вікторини, додавання AR-фільтрів), використання користувачького контенту (організація конкурсів стимулювання користувачів ділитися власними рецептами від харчового бренду), інтеграція з трендовим контентом (колаборації з інфлюенсерами-фудблогерами, гумористичний формат, підлаштування контенту під популярні тренди), формування соціальної відповідальності та емоцій (створювати контент про локальних виробників, натуральні інгредієнти, здорове харчування, а також підкреслювати сталість виробництва харчових продуктів). Для брендів харчової галузі це є сигналом до активного інвестування ресурсів у створення візуально привабливого, релевантного та інтерактивного контенту, який підвищує залученість і спонукає до купівлі.

У контексті пропозицій хочемо виділити формування цифрового контенту для продуктів здорового харчування. Ми вважаємо, що подальші дослідження варто спрямувати на розроблення контенту, що популяризує здорове харчування через доказову інформацію, професійний візуал, інтерактивні формати та залучення користувачького контенту.

## **Література**

- Бондаренко, В., Омеляненко, О. (2024). Цифровий маркетинг сьогодні: переваги та недоліки. *Економіка та суспільство*, 67. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-67-3>.
- Гайкова, А. Р., Дніпровська, Т. В. (2025). Цифрова реклама в мові медіа: специфіка, види, впливовий потенціал. *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського*, 3(2), 283—288. <https://doi.org/10.32782/2710-4656/2025.3.2/42>.
- Дорош, М. М. (2024). Цифрова реклама як основний каталізатор успішного підприємництва. *Маркетинг і логістика в системі менеджменту: виклики цифрової глобалізації: тези доповідей*

XV Міжнародної науково-практичної конференції, 17—18 листопада 2024 р. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 116—118. URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/attachments/2024/35201/importantdoc/programa2024.pdf> (дата звернення: 05.07.2025).

Досенко, А. (2019). Digital-реклама як жанр: етичні параметри реалізації. *Образ*, 1(30), 52—60. [https://doi.org/10.21272/Obraz.2019.1\(30\)-52-60](https://doi.org/10.21272/Obraz.2019.1(30)-52-60).

Савицька, О., Салабай, В. (2020). Діджиталізація управління бізнесом підприємства в контексті розвитку індустрії 4.0 в Україні. *Бізнес, інновації, менеджмент: проблеми та перспективи*. <http://confmanagement.kpi.ua/proc/article/view/201202> (дата звернення: 26.06.2025).

Середа, В. В., Єсімов, С. С. (2024). Класифікація цифрових платформ для надання публічних послуг. *Науковий вісник Львівського державного університету внутрішніх справ*, 2, 58—65. <https://doi.org/10.32782/2311-8040/2024-2-9>.

Храпкіна, В. В., Іванова, А. О. (2021). Оцінка ефективності використання цифрової реклами та її вплив на маркетингову діяльність підприємства. *Приазовський економічний вісник*, 3(26), 75—79. <https://doi.org/10.32840/2522-4263/2021-3-13>.

Чмерук, Г. (2020). Цифровізація — тренд світового розвитку, який визначає розвиток економіки і суспільства. *Економічний простір*, 153, 18—24. <https://doi.org/10.32782/2224-6282/153-3>.

Chiguvi, D. (2022). Effectiveness of traditional and digital advertising platforms for the marketing of tourism. *International Journal of Research in Business and Social Science*, 11(10), 01—12. <https://doi.org/10.20525/ijrbs.v11i10.2141>.

Christina, I. D., Fenni, F., and Roselina, D. (2019) Digital marketing strategy in promoting product. *Management and Entrepreneurship: Trends of Development*, 4(10), 58—66. <https://doi.org/10.26661/2522-1566/2019-4/10-05>.

Confetto, M. G., Conte, F., Vollero, A., Covucci, C. (2020). From Dual Marketing to Marketing 4.0: The Role Played by Digital Technology and the Internet. *Beyond Multi-channel Marketing, Emerald Publishing Limited*, 141—161. <https://doi.org/10.1108/978-1-83867-685-820201012>.

Data Analytics News. URL: <https://digitalisationworld.com/news/data-analytics> (03 липня 2025).

Hocaoglu, D. (2024). Social Media as a Powerful Tool for Food Preparation and Gaining Healthy Eating Habits. [https://research.uca.ac.uk/6608/1/DHocaoglu\\_EFOOD\\_2024.pdf](https://research.uca.ac.uk/6608/1/DHocaoglu_EFOOD_2024.pdf) (last accessed: 28 June 2025).

Jusufo, L., & Xhafa, S. (2023). Digital Marketing and Social Media Marketing Trends in Kosovo. *ENTRENOVA — ENTerprise REsearch InNOVAtion*, 9(1), 305—318. <https://doi.org/10.54820/entre-nova-2023-0028>.

Kumar, V., Mittal, S. (2020). Mobile marketing campaigns: practices, challenges and opportunities. *International Journal of Business Innovation and Research*, 21(4), 523—539. <https://doi.org/10.1504/IJBIR.2020.105996>.

Purmomo, Y. J. (2023). Digital Marketing Strategy to Increase Sales Conversion on E-commerce Platforms. *Journal of Contemporary Administration and Management*, 1(2), 54—62. <https://doi.org/10.61100/adman.v1i2.23>.

Rotsios, K., Konstantoglou, A., Folinas, D., Fotiadis, Th., Hatzithomas, L., Boutsouki, Ch. (2022). Evaluating the Use of QR Codes on Food Products. *Scholarly Journal*, 14(8), 4437—4452. <https://doi.org/10.3390/su14084437>.

Saputra, A. H. D., Windiarsono Putra, S. N., & Bennet, D. (2024). Consumer Behavior and Brand Loyalty: A Study on Digital Marketing Practices. *Startupreneur Business Digital (SABDA Journal)*, 3(2), 160—170. <https://doi.org/10.33050/sabda.v3i2.630>.

The Out of Home Advertising Association of America. New study finds digital out of home advertising surpasses other media in driving favorability and action among consumers-2024. <https://surl.li/jaeync> (last accessed: 27 June 2025).

Seo, Y., & Lee, J. H. (2021). Digital transformation and advertising: insights from the 2020 ICAMA-KAS conference. *International Journal of Advertising*, 40(8), 1245—1246. <https://doi.org/10.1080/02650487.2021.2000180>.

Sharma, A. (2024). Content Marketing in the Digital Transformation Era: Trends and Best Practices. *Proceedings*, 101(1), 7. <https://doi.org/10.3390/proceedings2024101007>.

Stojanovic, I., Andreu, L., Curras-Perez, R. (2018). Effects of the intensity of use of social media on brand equity. *European Journal of Management and Business Economics*, 27(1), 83—100.

Wang, Z., Kim, Y. (2018). How Marketing Factors Influence Online Browsing and Sales: Evidence From China's E-Commerce Market. *Journal of Applied Business Research (JABR)*, 34(2), 253—264. <https://doi.org/10.19030/jabr.v34i2.10124>.

Williams, R. (2020). Video ads drive a 48% higher sales rate than static ads, study says. URL: <https://www.marketingdive.com/news/video-ads-drive-a-48-higher-sales-rate-than-static-ads-study-says/586025/> (last accessed: 25 June 2025).

Wuisan, D. S., & Handra, T. (2023). Maximizing Online Marketing Strategy with Digital Advertising. *Startupreneur Business Digital (SABDA Journal)*, 2(1), 22—30. <https://doi.org/10.33050/sabda.v2i1.275>.

40+ Social Commerce Statistics You Need to know in 2022. URL: <https://www.16best.net/social-commerce-statistics/> (last accessed: 17 June 2025).

## INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND PROSPECTS OF ENERGY STORAGE SYSTEMS IN THE ELECTRIC POWER INDUSTRY

V. Shpak, V. Romaniuk, P. Zinkevych  
*National University of Food Technologies*

---

**Key words:**

*Energy storage  
Lithium-ion capacitor  
Supercapacitor  
Lithium-ion battery  
Lithium iron phosphate  
battery  
Renewable energy  
sources*

---

**Article history:**

Received 15.09.2025  
Received in revised form  
30.09.2025  
Accepted 16.10.2025

---

**Corresponding author:**

V. Shpak  
**E-mail:**  
shpakvv@nuft.edu.ua

**Citation:** Шпак В. В., Романюк В. Т., Зінкевич П. О. (2025). Інноваційні технології та перспективи систем накопичення енергії в електроенергетиці. *Наукові праці НУХТ*, 31(5), 139—152.  
DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-5-12

---

**ABSTRACT**

Under martial law and as a result of the targeted destruction of critical energy infrastructure facilities caused by armed aggression by a state recognized by the Verkhovna Rada of Ukraine as an aggressor state, Ukraine's power system operates in extremely difficult conditions, so to prevent a mass failure and minimize the risk of blackouts, electrical energy storage systems have become particularly important. The analysis of modern literature on the functioning of energy storage systems in order to conduct a comprehensive review of modern innovative technologies of electrical energy storage systems, identify existing research on the use of various types of batteries and capacitors, their design, application features and innovative technologies in the energy sector was described in the article. The analysis of scientific literature confirmed that energy storage systems are not just additional equipment, but a fundamental element of the transformation of modern electric power. Innovative technologies indicated a shift in emphasis in research and implementation of electrochemical solutions of the so-called lithium-ion technologies, in particular lithium-iron-phosphate, which remains the main direction for safe energy storage and storage. The strategic role of lithium-ion capacitors has been recognized as a critical hybrid technology. Combining high energy density (like batteries) with ultra-high power density (like supercapacitors), they are ideal for rapid response, instantaneous grid balancing, and Black Start (starting the system after a complete blackout). As a result, energy storage systems are an integral part of a modern, sustainable, and green energy system, and further investment and government support for their implementation are critical to ensuring energy security and resilience in the face of military and climate threats.

## ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЦІ

В. В. Шпак, В. Т. Романюк, П. О. Зінкевич

Національний університет харчових технологій

*В умовах воєнного стану та внаслідок цілеспрямованого руйнування об'єктів критичної енергетичної інфраструктури, спричиненого збройною агресією росії, визнаної Верховною Радою України державою-агресором, енергосистема України працює в надзвичайно складних умовах, тому для запобігання масового збою та мінімізації ризику блекаутів особливо важливого значення набули системи накопичення електричної енергії. Стаття присвячена аналізу сучасної літератури щодо функціонування систем накопичення енергії з метою здійснення комплексного огляду сучасних інноваційних технологій систем накопичення електричної енергії, визначення наявних досліджень використання різних видів акумуляторних батарей і конденсаторів, їхньої конструкції, особливостей застосування та інноваційних технологій в енергетичній сфері. Аналіз наукової літератури підтверджує, що системи накопичення енергії є не просто додатковим обладнанням, а фундаментальним елементом трансформації сучасної електроенергетики. Інноваційні технології вказують на зміщення акцентів у дослідженнях і впровадженні електрохімічних рішень так званих літій-іонних технологій, зокрема літій-залізо-фосфату, що залишається основним напрямком для безпечного накопичення та зберігання енергії. Стратегічну роль літій-іонних конденсаторів визнано критично важливою гібридною технологією. Завдяки поєднанню високої цільності енергії (як у батарей) та надвисокої цільності потужності (як у суперконденсаторів), вони ідеально підходять для швидкого реагування, миттєвого балансування мережі та забезпечення функції «Black Start» (запуск системи після повного блекауту). Як результат, системи накопичення енергії є невід'ємним елементом сучасної, стійкої та «зеленої» енергетичної системи і подальші інвестиції та державна підтримка їхнього впровадження є критично важливими для забезпечення енергетичної безпеки та стійкості в умовах військових і кліматичних загроз.*

**Ключові слова:** накопичення енергії, літій-іонний конденсатор, суперконденсатор, літій-іонна батарея, літій-залізо-фосфатна батарея, відновлювальні джерела енергії.

**Постановка проблеми.** В умовах воєнного стану та внаслідок цілеспрямованого руйнування об'єктів критичної енергетичної інфраструктури, спричиненого збройною агресією росії, визнаної Верховною Радою України державою-агресором, енергосистема України працює в надзвичайно складних умовах, тому для запобігання масового збою та мінімізації ризику блекаутів особливо важливого значення набули системи накопичення електричної енергії (Energy storage systems), і їхнє значення постійно зростає, особливо в осінньо-зимовий період, оскільки вони є ключовим елементом підвищення стійкості та автономності енергосистеми, що забезпечує функціонування критичних об'єктів держави під час системних криз. Системи накопичення електричної енергії — це комплекс технологій і пристроїв,

які зберігають енергію, що може бути використана через певний проміжок часу (Мирутенко, & Лістовщик, 2022).

В останні роки широко використовуються літій-іонні акумулятори та літій-іонні конденсатори як представники енергетичних і силових пристроїв, особливо в транспортних засобах, 3С-електронних виробках і для електрохімічного накопичення енергії.

Однак існує брак фундаментальних досліджень та особливостей застосування літій-іонних акумуляторів і літій-іонних конденсаторів, зокрема збільшення ємності, швидкості й терміну служби електродних матеріалів, збільшення іонної передачі та ємності накопичення анодів і катодів, покращення межі електрод/електроліт та стабільності твердого електролітного міжфазного шару.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Накопичення енергії є одним із актуальних напрямків досліджень, оскільки цей процес важливий для стабільної роботи енергетичних систем, адже може скоротити вплив виробництва енергії на навколишнє середовище, підвищити ефективність системи, а також рівень використання відновлюваних джерел енергії (Elalfy, Gouda, Kotb, Bureš, & Sedhom, 2024).

Зважаючи на швидке зростанням індустрії систем накопичення енергії, електрохімічні системи накопичення енергії, такі як літій-іонні акумулятори та суперконденсатори, привертають увагу (Zou, Cai, Cao, Zou, & Hou, 2020). Однак у більшості пристроїв накопичення енергії щільність енергії та щільність потужності демонструють неоптимальне співвідношення (Lain, Brandon, & Kendrick, 2019).

Застосування систем накопичення відіграє вирішальну роль у перетворенні енергетичних мереж на більш складні, інтегровані й адаптивні системи. Вони є невід'ємною частиною живлення широкого спектра окремих пристроїв, включаючи побутову електроніку, медичне обладнання та портативні електроінструменти. Тут основна увага приділяється оптимізації розміру й ефективності рішень для зберігання даних для підвищення загальної корисності та продуктивності пристроїв малого масштабу. Постійний розвиток технологій акумуляторів, особливо літій-іонних і нових твердотілих акумуляторів, значно збільшив час роботи цих пристроїв між зарядами, підвищуючи зручність та ефективність використання. Портативні електроінструменти використовують компактні, але потужні акумулятори, що забезпечує відсутність дротових джерел живлення без шкоди для продуктивності (Rey та ін., 2023).

Системи накопичення енергії дозволяють оптимізувати споживання енергії в житлових будинках (Li, & Dong, 2018). Ці системи часто поєднуються з відновлюваними джерелами енергії, такими як сонячні панелі. При перебоях з електропостачанням ці системи є важливим джерелом резервного живлення (Zhao, Luo, Zhu, & Ranzi, 2023).

Системи накопичення енергії знайшли використання у функціонуванні електротранспорту. Акумулятори в електромобілях зазвичай більші та потужніші, ніж ті, що використовуються виключно для зберігання енергії в побутових умовах (Yu, Niu, Shang, Shao, Jia, & Jian, 2022).

Системи накопичення енергії відіграють важливу роль у покращенні управління енергією для промислових підприємств і громадської інфраструктури, що сприяє оптимізації використання енергії, зниженню експлуатаційних витрат та підвищенню надійності шляхом зменшення пікових навантажень. Енергія накопичується в

періоди поза піковими навантаженнями, коли вона дешевша. Також може забезпечуватись резервне живлення, що має вирішальне значення для підтримки роботи під час відключень електроенергії, таким чином забезпечуючи безперервність виробничого процесу (Saaravia-Guerrero, & Espinosa-Juárez, 2021).

Розроблено віртуальні електростанції, які є інноваційними та застосовуються для об'єднання потужностей малих енергогенеруючих установок і систем накопичення енергії, функціонуючи як єдина гнучка й адаптивна електростанція (Lu, Qiu, Zhang, Lei, & Zhu, 2024). Суть їхньої роботи полягає у використанні колективної потужності децентралізованих енергетичних ресурсів. Такі станції можуть або постачати енергію в мережу, або поглинати надлишкову енергію з підвищеною ефективністю та гнучкістю (Shafiekhani, Ahmadi, Homaei, Shafie-khah, & Catalão, 2022).

Системи накопичення енергії особливо критичні в комунальних системах і мережевих послугах для підвищення надійності мережі, підвищення операційної гнучкості та сприяння інтеграції відновлюваних джерел енергії (Zhao, Andersen, Træholt, & Hashemi, 2023). Ці системи часто підключаються безпосередньо до мережі на підстанціях або поблизу об'єктів відновлюваної енергетики, таких як вітрові або сонячні станції. Окрім накопичення енергії, вони здатні регулювати частоту для виправлення дисбалансу між попитом і пропозицією, а також підтримувати напругу, забезпечувати можливості запуску без напруги після значних перебоїв (Wan, Tao, Qiu, & Lai, 2021).

У поєднанні з досягненнями в технології акумуляторів і зниженням витрат на зберігання роль систем накопичення енергії розширюється для досягнення стійких, надійних та ефективних енергетичних систем (Qiu та ін., 2023).

Ключову роль у системах накопичення енергії відіграють конденсатори. Вони виконують роль тимчасових сховищ електричного заряду, що дозволяє швидко накопичувати й віддавати енергію. Крім того, вони забезпечують стабілізацію напруги, захищають компоненти від стрибків напруги, допомагають запускати двигуни. У сучасних системах з відновлюваними джерелами енергії конденсатори допомагають підтримувати стабільність мережі.

Наразі існують різні види конденсаторів, які мають свої властивості та призначення.

**Мета дослідження:** на основі аналізу сучасної літератури щодо функціонування систем накопичення енергії провести комплексний огляд сучасних інноваційних технологій систем накопичення електричної енергії, визначити особливості конструкції та використання різних видів акумуляторних батарей і конденсаторів.

**Матеріали і методи.** Методами теоретичного аналізу вивчено основні дослідження, що охоплюють технології систем накопичення електричної енергії та їх застосування в електромережах. Шляхом порівняльного аналізу ключових характеристик технологій накопичення енергії було визначено їхню роль в інтеграції відновлюваних джерел енергії та забезпеченні стабільності роботи електричної мережі.

**Викладення основних результатів дослідження.** Широкого використання набули літій-іонні конденсатори. Зазвичай, літій-іонний конденсатор складається з емнісного катода (активоване вугілля, змінний струм) та анода батарейного типу (графіт, м'який вуглець, твердий вуглець). Іноді елементи конденсатора можуть заряджатися до напруги, вищої за номінальну, в умовах електричного зловживання,

при несправності зарядного обладнання та/або неналежному керуванні конденсаторами (Soltani, & Beheshti, 2021). Оскільки анодний потенціал досить низький під час процесу заряджання і його можна контролювати, регулюючи кількість анодних матеріалів, характеристики перезаряджання повного елемента переважно залежать від катода змінного струму (Karimi, Behi, Van Mierlo, & Beresibar, 2022), тому необхідно незалежно дослідити поведінку перезаряджання катода змінного струму в неводних літій-іонних електролітах без втручання анодного електрода.

Проведено дослідження, в якому напівелементи з різними літій-іонними електролітами були гальваностатично заряджені та розряджені від потенціалу нульового заряду до різних граничних напруг при 2 мА. Вершинна напруга збільшувалася від 3,4 В до 4,5 В з кроком 0,1 В. Відповідно до критерію енергетичної ефективності для визначення граничної напруги, стабільні верхні межі потенціалу електродів змінного струму в електролітах — 1 М гексафторфосфат літію, розчиненого в суміші розчинників етиленкарбонату, діетилкарбонату та диметилкарбонату в об'ємному співвідношенні 1:1:1, 1 М гексафторфосфат літію, розчиненого в суміші етиленкарбонату, діетилкарбонату, пропіленкарбонату у співвідношенні 3:1:4, 1 М гексафторфосфат літію, розчиненого в пропіленкарбонаті, визначено як 4,0 В, 4,0 В та 4,1 В відповідно. Напівелементи змінного струму/літій були заряджені до 5,0 В та 10,0 В відповідно. У результаті встановлено, що для напівелементів з електролітами на основі пропіленкарбонату напруга різко зросла до 10,0 В з вертикальною прямою лінією в кінці процесу перезаряджання, що свідчить про те, що відкладення розкладання електроліту відокремили поверхню електрода змінного струму від електролітів, утворюючи самозахисну пасиваційну плівку з діелектричними конденсаторними властивостями. Щільна та компактна пасиваційна плівка відіграє важливу роль у відокремленні поверхні електрода змінного струму від електролітів і запобіганні розширенню об'єму та вибуху елементів літій-іонних конденсаторів в умовах електричного зловживання та перезаряджання (Sun та ін., 2023).

Літій-іонні конденсатори визнані перспективними пристроями накопичення енергії для подолання низької щільності енергії, зберігаючи при цьому високу щільність потужності й тривалий термін служби конденсаторів. Вища щільність енергії зумовлена підвищеною напругою елемента (~4 В), що пояснюється низькою та вузькою варіацією анодного потенціалу під час циклічного заряду/розряду (Guo та ін., 2019). У конденсаторах анодний потенціал попередньо знижують шляхом легування іонів літію в активний матеріал анода в заданій кількості, тобто літіюють або легують, що є важливим для зниження початкового потенціалу анода (Madabattula, Wu, Marinescu, & Offer, 2020). Було досліджено вплив повної попередньої літіації на швидкість розрядки та циклічні характеристики кремнієвого літій-іонного конденсатора. Повної літіації анода було досягнуто шляхом складання півелемента з кремнієвим анодом розміром 2 мкм та металевим літієм. Було зібрано триелектродний повний елемент (100% попередня літіація) з використанням катода з активованого вугілля з високою питомою площею поверхні (3041 м<sup>2</sup>/г), повністю попередньо літіюваного кремнієвого анода та металевого літієвого електрода порівняння та триелектродний повний елемент (87% попередня літіація) з використанням кремнієвого анода, попередньо літіюваного 87% іонів літію. Обидва елементи демонстрували подібні рівні щільності енергії при нижчій щільності потужності. Однак при вищій щільності потужності (1 кВт/кг) чим більший був

відсоток попередньої літації, тим вища щільність енергії підтримувалась (Eguchi, Sugawara, Abe, Tomioka, & Kumagai, 2022).

Кремній використовують як анодний матеріал завдяки його високій теоретичній ємності та низькому робочому потенціалу. Однак він зазнає екстремальних змін об'єму до 300%, що призводить до короткого терміну служби. Щоб зменшити механічне напруження в кремнієвих анодах, було досліджено можливість виготовлення тривимірного структурованого кремнієвого електрода з використанням пороутворюючого агента. Мережа пор структурованого кремнієвого електрода ефективно буферизувала зміну об'єму, зменшуючи утворення тріщин в електроді та покращуючи стабільність циклу. Повний елемент літій-іонного конденсатора з використанням структурованого кремнію мав високу щільність енергії  $191,4 \text{ Вт}\cdot\text{год}\cdot\text{кг}^{-1}$  при щільності потужності  $723,7 \text{ Вт}\cdot\text{кг}^{-1}$ . Такий підхід може забезпечити економічно ефективний і практичний метод отримання чистих кремнієвих анодів, придатних для використання в літій-іонних конденсаторах, завдяки простому процесу структурування пор (Baek та ін., 2023).

У літій-металевих батареях використовують вуглецеві матеріали, які мають належну електропровідність. Під час впровадження вуглецевих матеріалів у конструкцію літій-металевих акумуляторів слід одночасно враховувати негативні наслідки, такі як хімічна/електрохімічна стабільність, структурна стабільність тощо. Під час проектування тривимірних струмозбірників на основі вуглецю слід одночасно враховувати вплив пористості та питомої площі поверхні: занадто велика пористість послабить переваги, що надаються 3D-структурою, тоді як занадто мала пористість вплине на процес масопереносу іонів літію в ній. Велика питома площа поверхні може досягти рівномірнішого осадження шляхом диспергування локальної густини струму, але водночас вона також збільшить площу плівки та зменшить ефективність акумулятора. Надмірний вміст літію та електроліту значно подовжує час виходу з ладу акумулятора. Надлишок металевого літію зменшить фактичну питому ємність акумулятора. Використання вуглецевих матеріалів може певною мірою покращити стабільність циклу розрядки та термін служби літій-металевих акумуляторів (Wu, Sun, & Wang, 2022).

Через повільну дифузію іонів на аноді літій-іонної батареї та швидку електростатичну взаємодію іонів на катоді суперконденсатора, що призводить до дисбалансу переносу іонів між електродами, виникають проблеми в розробці високопродуктивних літій-іонних конденсаторів. Досліджено продуктивність 3D графеноподібного мікропористого цеолітного вуглецю, яка була досить високою. Цеолітний вуглець був синтезований з використанням бета-цеоліту як твердої бази й етилену як джерела вуглецю. Отриманий бета-цеоліт характеризувався великою площею поверхні  $3400 \text{ м}^2\cdot\text{г}^{-1}$ . Попередньо літійований електрод (використовувався як анод літій-іонної батареї, а виготовлений електрод — як катод суперконденсатора. Доведено високу щільність енергії та потужності, а також циклічну стабільність протягом понад 30 000 циклів. Ці результати пояснюються полегшеною адсорбцією/десорбцією іонів літію шляхом десольватації іонів у середовищі пор з вузьким розподілом розмірів (Park, Vera, Yoon, & Kim, 2025).

Матеріали антифлюоритового типу  $\text{Li}_{5+x}\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_4$ , були досліджені як катод для використання в літійовій вторинній батареї. Під час першого процесу заряджання структура зазнає фазової зміни в міру видалення літію. Початкова структура

антифлюориту майже повністю втрачається, коли 1,5 еквівалента літію деінтеркалюються зі структури, як у випадку  $\text{Li}_5\text{FeO}_4$ . Ця тенденція була менш очевидною у зразках, легованих кобальтом, і 2,1 еквівалента літію можна було видалити до зникнення початкової решітки. Легування кобальтом допомагає підтримувати початкову конфігурацію решітки та підвищує циклічну стабільність (Imanishi та ін., 2005).

Проведено аналіз наявності ресурсів літію для підтримки глобальної декарбонізованої енергетичної системи з використанням накопичувачів електроенергії на основі літій-залізофосфатних батарей. За даними дослідників для задоволення світового попиту на електроенергію у 2050 році достатньо мережі з нульовим рівнем викидів вуглецю, що складається з існуючих ядерних і гідроенергетичних потужностей у співвідношенні 50/50 з поєднанням вітрової та сонячної енергії. Необхідна номінальна потужність становитиме 10 МВт·год. Глобальна система зберігання потребуватиме лише близько 12,3% від існуючих наразі запасів літію (Scarlett, & Utgikar, 2025).

Встановлено, що має місце електрохімічне старіння вуглецевого електрода в літій-іонних конденсаторах. Залежно від максимальної напруги системи досягали різних критеріїв закінчення терміну служби: при 4,0 В ємність зменшується з одночасним збільшенням опору, а при 4,6 В було більш виражене збільшення опору. При 4,0 В спостерігалися хімічні та структурні зміни електрода: була наявна просторова перешкода у вигляді залишків розкладання електроліту, що призводить до закупорювання пор і зменшення питомої поверхні. При напрузі старіння вище 4,2 В виявлено утворення ефірних і фенольних груп, що призводить до збільшення опору. Доведено, що вища напруга старіння викликає швидше окислення вуглецю (Slesinska, Réty, Matei-Ghimbeu, FicJakub, & Menzel, 2025).

Низька початкова кулонівська ефективність аморфних вуглецевих анодів (наприклад, твердого вуглецю та м'якого вуглецю) обмежує щільність енергії літій-іонного конденсатора, недокористовуючи ємність катода. Досліджено застосування глибокого попереднього літіювання на основі розчину для вуглецевих анодів з домінуванням пари контактних іонів, що забезпечує високу щільність енергії на основі систематичного балансування електродів та збільшення ємності катода понад початкову теоретичну межу. Збільшуючи анодну початкову кулонівську ефективність до 150%, ємність активованого вугілля подвоюється шляхом активації накопичення катіонів  $\text{Li}^+$ . Збільшена ємність активованого вугілля призводить до щільності енергії  $106,6 \text{ Вт}\cdot\text{год}/\text{кг}^{-1}$  активованого вугілля + м'якого вуглецю, що еквівалентно 281% від щільності літій-іонного конденсатора без попереднього літіювання. Цей процес також знижує співвідношення мас катода й анода, зменшуючи товщину комірки на 67% без шкоди для її ємності (Jeon та ін., 2024).

Літій-іонні конденсатори як перспективна система накопичення енергії досліджуються щодо їх практичного використання в різних сферах. Асиметричні літій-іонні конденсатори мають високу щільність енергії та потужності порівняно з традиційними системами накопичення енергії, такими як електрохімічні двошарові конденсатори та літій-іонні акумулятори. Для забезпечення належної роботи негативний електрод слід попередньо літіювати. Було досліджено використання  $\text{Li}_2\text{CoO}_4$  як альтернативного джерела літію металевому літію. Велика кількість  $\text{Li}^+$

може бути електрохімічно вилучена зі структури, вбудованої в позитивний електрод, за допомогою високонезворотного процесу. Більша частина вилученого  $\text{Li}^+$  доступна для попередньої літації негативного електрода під час першого заряду. Ця поведінка  $\text{Li}_2\text{CoO}_4$  підходить для забезпечення достатньої кількості  $\text{Li}^+$  негативного електрода (Lim та ін., 2015).

Досліджено композити графен/м'який вуглець і композити графен/активоване вугілля для покращення продуктивності літій-іонних конденсаторів за рахунок підвищення швидкості роботи анода та збереження ємності катода. Композити графен/м'який вуглець і графен/активоване вугілля виготовляються за допомогою швидкого самопоширеного процесу високотемпературного синтезу. Для анода графен збагачує реакційну поверхню м'якого вуглецю та покращує кінетику електрохімічної реакції. Таким чином, композит графен/м'який вуглець демонструє чудову швидкісну здатність (200 мА рт. ст. при  $4 \text{ Аг}^{-1}$ ) разом з високою питомою ємністю 360 мА рт. ст. при  $0,1 \text{ Аг}^{-1}$ . Завдяки чудовій графеновій сітці композит графен/активоване вугілля демонструє значно підвищену провідність  $2941 \text{ См}^{-1}$  та відмінне збереження ємності 84% при  $10 \text{ Аг}^{-1}$ . Літій-іонні конденсатори на основі цих композитів демонстрували високу щільність енергії  $151 \text{ Вт год/кг}^{-1}$  та високу щільність потужності  $18,9 \text{ кВт/кг}^{-1}$ . Крім того, композит графен/м'який вуглець синтезується у великих масштабах і збирається у комірку-мішечок конденсатора великої ємності (1170 F або 650 мА/г), яка демонструє щільність енергії  $31,5 \text{ Вт год/кг}^{-1}$  (на основі загальної маси пристрою) та циклічну продуктивність (збереження ємності 93,8% після 10 000 циклів при  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ ) (An та ін., 2021, а).

Для підвищення комплексної продуктивності літій-іонних конденсаторів досліджували наночастинки нікелю, інкапсульовані у вуглецеві наноцибулини, які є перспективними в галузі накопичення енергії завдяки своїм електропровідним властивостям, великій площі зовнішньої поверхні та наноскопічним розмірам. Початкова розрядна та зарядна ємність цього комплексу як анодів (у напівелементах (порівняно з Li)) становила 869 та 481  $\text{мАг} \cdot \text{г}^{-1}$  при  $0,1 \text{ А} \cdot \text{г}^{-1}$  відповідно. При щільності струму  $10 \text{ А} \cdot \text{г}^{-1}$  оборотна питома ємність залишалася на рівні  $111 \text{ мАг} \cdot \text{г}^{-1}$ . Вуглецеві наноцибулини з наночастинками нікелю були використані як анодні матеріали та продемонстрували циклічну стабільність після оптимізації співвідношення мас позитивного та негативного електродів. Щільність енергії конденсатора досягла  $140,1 \text{ Вт} \cdot \text{год} \cdot \text{кг}^{-1}$  при  $280,2 \text{ Вт} \cdot \text{кг}^{-1}$  і підтримувала  $76,6 \text{ Вт} \cdot \text{год} \cdot \text{кг}^{-1}$  при  $27,36 \text{ кВт} \cdot \text{кг}^{-1}$ . Конденсатори також продемонстрували циклічну стабільність зі збереженням ємності 94,09% протягом 40 000 циклів (Zhang та ін., 2023).

Стратегія попередньої металізації з використанням методу донорства може компенсувати незворотне споживання іонів металів і зменшити потенціал анода, підвищуючи таким чином циклічні характеристики, а також напругу холостого ходу для повністю металоіонних конденсаторів. Однак через зловживання великими дозами, надмірний потенціал розкладання та побічні ефекти від залишків розкладання, широке застосування цього методу обмежене. Запропоновано зв'язаний інтерфейс  $\text{M-O-C}$ ,  $\text{M}=\text{Li/Na/K}$  та електронодонорну групу для регулювання ширини забороненої зони та найвищого зайнятого рівня молекулярної орбіталі оксалату металу ( $\text{M}_2\text{C}_2\text{O}_4$ ), зменшуючи явище поляризації та вільну енергію Гіббса, необхідну для розкладання, що знижує практичний потенціал розкладання з 4,50 до

3,95 В. Повністю натрієві іонні конденсатори, що складаються з комерційних матеріалів (активоване вугілля/твердий вуглець), можуть забезпечити значну щільність енергії 118,2 Вт·год/кг, а також гарну циклічну стабільність при наднизькому дозуванні реагенту попереднього натріювання 15—30 мас. % Цей принцип був успішно використаний у високопродуктивних літій/калій-іонних конденсаторах з  $\text{Li}_2\text{C}_2\text{O}_4/\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4$  як реагентом попередньої металізації, що сприятиме комерціалізації мікроконденсаторів (Song та ін., 2022).

Запропоновано метод видалення нестабільного кисневого елемента з пористих вуглецевих матеріалів, що дозволить розробити вдосконалені металоіонні конденсатори з високою щільністю енергії й тривалим терміном служби. Пористий вуглець з наднизьким вмістом кисню 0,973 мас. % синтезовано шляхом нагрівання пористого вуглецю на основі крохмалю в атмосфері змішування водню й аргону. Питома ємність пористого вуглецю досягає  $106,7 \cdot \text{F} \cdot \text{g}^{-1}$  при  $50 \text{ mA} \cdot \text{g}^{-1}$ . Завдяки високій питомій ємності пористого вуглецю літій-іонний конденсатор, побудований з катодом з пористого вуглецю та м'яким вуглецевим анодом, може забезпечити високу щільність енергії  $123,5 \text{ Вт} \cdot \text{год} / \text{кг}^{-1}$ . Пористий вуглець демонструє збереження ємності на рівні 96,77% після 10 000 циклів при високій швидкості завдяки стабільному електрохімічному складу пористого вуглецю (An та ін., 2021, b).

Натрій-іонні конденсатори привернули значну увагу завдяки вищій щільності енергії та потужності порівняно з іншими конденсаторами, суперконденсаторами та натрій-іонними батареями. Через брак натрію в катоді, попереднє осаджування є критично важливим для конденсаторів з метою подальшого підвищення продуктивності. Однак як матеріал для попереднього осаджування використовується натрій, і потрібне складання/розбирання напівелементів, що є небезпечним та збільшує час і вартість конденсатора, призводить до обмеження їх індустріалізації та комерціалізації. Досліджено технологію попереднього осаджування, в якій спочатку використовується  $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$  як донор, що має значно нижчі витрати. Після екстракції натрію додаткові залишки не фіксуються. У поєднанні з комерційним активованим вугіллем як катодом і комерційним твердим вугіллем як анодом сконструйовані натрій-іонні конденсатори мішечкового типу демонструють високу щільність енергії та потужності  $91,7 \text{ Вт} \cdot \text{год} / \text{кг}$  та  $13,1 \text{ кВт} / \text{кг}$  відповідно (Sun та ін., 2022).

Для використання в натрій-іонних пристроях розроблено гнучкий негативний електрод на основі гелевого полімеру, що містить олово. Електроди були виготовлені шляхом захоплення мікрочастинок олова в пористій електролітній мембрані, утвореній шляхом фазової інверсії занурення в осадження та замочування в рідкому електроліті, що проводить натрій-іони. Частинки олова є активними матеріалами електрода, а також провідниками електронів, тоді як гель-полімер забезпечує ефективний перенос іонів до частинок олова. Питома ємність конденсатора демонструє початкове збільшення до 175 циклів заряду-розряду. Це збільшення пояснюється збільшенням площі поверхні олова через розпад більших частинок при багаторазовому введенні/видаленні натрію. Пориста полімерна плівка, що використовується в конденсаторі, забезпечила необхідні властивості безпеки, стійкості до протікання, гнучкості та довговічності пристрою (Yadav, & Hashmi, 2022).

Розроблено нанотехнологію, засновану на методі рідкої трансформації, для

синтезу пористого монокристалічного  $\text{NaTi}_2(\text{PO}_4)_3$  в низькотемпературному рідкому середовищі, що дозволяє отримати матеріал з дрібними частинками, пористою наноструктурою та властивостями монокристалів. Як негативний матеріал для водного конденсатора натрієвих іонів електрод демонструє швидкість заряду  $80\text{—}102 \text{ mA} \cdot \text{год}^{-1}$  при різних густинах струму  $0,5\text{—}3,0 \text{ A} \cdot \text{г}^{-1}$ , зберігаючи 80% ємності навіть при шестикратній швидкості зарядки (повна зарядка менш ніж за дві хвилини). Порівняно з традиційними літій-іонними акумуляторами однією з переваг водних натрієво-іонних конденсаторів є їх застосування в гнучких електронних пристроях, що може стабільно працювати в навколишньому середовищі без захисних заходів, таких як інкапсуляція, що значно знижує вартість пристрою. Крім того, продуктивність цього пристрою рідко змінюється в стані безперервного згинання від  $0$  до  $180^\circ$  (Yang, & Zhi, 2018).

Загалом існує ряд проблем функціонування систем накопичення електроенергії: висока вартість технологій, наявність втрат у мережах, недостатній обсяг існуючих потужностей, екологічні проблеми, пов'язані з виробництвом й утилізацією накопичувачів.

Досліджено алгоритм керування системою накопичення електроенергії з урахуванням її енергетичного стану з використанням прогнозних значень потужності генерації та навантаження. Прогнозовані дані поділяються на часові інтервали, у межах яких спостерігається прогнозоване надлишкове споживання електроенергії із зовнішньої мережі. Межі таких інтервалів визначаються за моментами переходу від мінімальних до максимальних значень на графіку прогнозної сумарної потужності навантаження та генерації фотоелектричної станції без урахування роботи накопичувача енергії. У межах зазначених інтервалів здійснюється перерозподіл енергетичних потоків від станції та зовнішньої мережі з метою компенсації прогнозованого надлишкового споживання. На основі прогнозних значень навантаження та генерації станції формується графік мінімального рівня стану заряду, необхідного для недопущення перевищення споживання електроенергії із зовнішньої мережі (Зінькевич, Балюта, & Куєвда, 2023).

Накопичувачі енергії використовуються також при функціонуванні підприємств харчової промисловості. Під час створення системи керування електропостачанням підприємства харчової промисловості доцільно використовувати декомпозицію процесу керування та методи системного аналізу, що дозволяє визначити основні етапи процесу керування, умови забезпечення функцій керування, основні інформаційні потоки, що забезпечують керування електропостачанням, організаційні й технічні механізми реалізації функцій керування. Керування на основі математичних моделей з використанням методів динамічного програмування дозволить максимально використовувати енергію, отриману від фотоелектричних установок, забезпечити енергоефективні режими роботи акумуляторної батареї системи накопичення енергії та зменшити пікові навантаження мережі живлення. Синтез автоматизованої системи керування електропостачанням підприємства харчової промисловості з використанням фотоелектричних установок і систем накопичення енергії доцільно проводити з використанням методу сумісності та інтеграції для забезпечення функціональної, інформаційної, програмної й технічної інтеграції елементів системи (Baliuta, & Zinkevych, 2022).

Інноваційним є розроблення моделі зберігання енергії як послуги та спільного

використання сховищ енергії. Ця концепція дозволяє користувачам платити за рішення для зберігання енергії як за постійну послугу, а не за авансову покупку продукту (Tao, Qiu, Lai, & Zhao, 2020). Такий підхід включає встановлення, експлуатацію й обслуговування систем зберігання енергії постачальником послуг, який також керує продуктивністю та ризиками, пов'язаними з системою. Спільне використання накопичувачів енергії передбачає спільне використання спільної системи накопичення енергії. Спільне використання більшої системи може зменшити витрати окремих користувачів завдяки економії від масштабу як при закупівлі, так і при обслуговуванні. Крім того, спільна система може оптимізувати використання енергії в кількох точках, підвищуючи загальну ефективність та зменшуючи втрати (Dai, Esmacilbeigi, & Charkhgard, 2021). У комунальних умовах спільне накопичення енергії може підвищити стійкість до перебоїв у подачі електроенергії (Du, Li, Hao, & Chen, 2022).

Однак існує ряд викликів, зокрема сумісність такої інноваційної системи з існуючою мережевою інфраструктурою, інтеграція мережі, проблеми конфіденційності та безпеки даних, економічні виклики (Dong, Tao, Lai, Wang, & Zhang, 2025).

Отже, застосування систем накопичення енергії з різними накопичувачами, зокрема конденсаторами, допомагає підтримувати стабільність енергосистеми, особливо під час руйнування ліній електропередач чи підстанцій. Однак існує ряд викликів, які потребують додаткового вивчення та рішень.

## **Висновки**

Аналіз наукової літератури підтверджує, що системи накопичення енергії є не просто додатковим обладнанням, а фундаментальним елементом трансформації сучасної електроенергетики. Інноваційні технології вказують на зміщення акцентів у дослідженнях і впровадженні електрохімічних рішень так званих літій-іонних технологій, зокрема літій-залізо-фосфату, що залишається основним напрямком для безпечного накопичення та зберігання енергії. Стратегічну роль літій-іонних конденсаторів визнано критично важливою гібридною технологією. Завдяки поєднанню високої щільності енергії (як у батареї) та надвисокої щільності потужності (як у суперконденсаторів) вони ідеально підходять для швидкого реагування, миттєвого балансування мережі та забезпечення функції «Black Start» (запуск системи після повного блекауту).

Як результат, системи накопичення енергії є невід'ємним елементом сучасної, стійкої та «зеленої» енергетичної системи і подальші інвестиції й державна підтримка їхнього впровадження є критично важливими для забезпечення енергетичної безпеки та стійкості в умовах військових і кліматичних загроз.

## **Література**

Мирутенко, П., Лістовщик, Л. К. (2022). Накопичувачі енергії. Основні типи та перспективи використання. *Енергетика: економіка, технології, екологія*, 4, 107—116. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2022.273433>.

Зінкевич, П. О., Балота, С. М., Куєвда, Ю. В. (2023). Алгоритм керування накопичувачем електроенергії в системі електрозабезпечення з активними споживачами. *Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами*: матеріали X Міжнародної науково-технічної Internet-конференції, 23—24.

An, Y., Liu, T., Li, C., Zhang, X., Hu, T., Sun, X., Wang, K., Wang, C., Ma, Y. (2021). A general route for the mass production of graphene-enhanced carbon composites toward practical pouch lithium-ion capacitors. *Journal of Materials Chemistry A*, 9(28), 15654—15664. <https://doi.org/10.1039/d1ta03933d>.

An, Y., Li, C., Sun, X., Wang, K., Su, F., Liu, F., Zhang, X., Ma, Y. (2021). Deoxygenated porous carbon with highly stable electrochemical reaction interface for practical high-performance lithium-ion capacitors. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 55(4), 045501. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac2db3>.

Baek, J., Suh, S., Kim, H., Park, H., Kumar, S., Tamulevičius, T., Tamulevičius, S., Kim, H.-J. (2023). Improving electrochemical performances of lithium-ion capacitors employing 3D structured Si anodes. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 126, 204—213. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.06.010>.

Baliuta, S., Zinkevych, P. (2022). Automated power supply control system for a food industry enterprise using a photovoltaic plant and energy storage. *Ukrainian Journal of Food Science*, 10(2), 184—199. <https://doi.org/10.24263/2310-1008-2022-10-2-8>.

Dai, R., Esmailbeigi, R., Charkhgard, H. (2021). The Utilization of Shared Energy Storage in Energy Systems: A Comprehensive Review. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12(4), 3163—3174. <https://doi.org/10.1109/tsg.2021.3061619>.

Dong, Z., Tao, Y., Lai, S., Wang, T., Zhang, Z. (2025). Powering Future Advancements and Applications of Battery Energy Storage Systems Across Different Scales. *Energy Storage and Applications*, 2(1), 1. <https://doi.org/10.3390/esa2010001>.

Du, X., Li, X., Hao, Y., Chen, L. (2022). Sizing of centralized shared energy storage for resilience microgrids with controllable load: A bi-level optimization approach. *Frontiers in Energy Research*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.954833>.

Eguchi, T., Sugawara, R., Abe, Y., Tomioka, M., Kumagai, S. (2022). Impact of Full Prelithiation of Si-Based Anodes on the Rate and Cycle Performance of Li-Ion Capacitors. *Batteries*, 8(6), 49. <https://doi.org/10.3390/batteries8060049>.

Elalfy, D. A., Gouda, E., Kotb, M. F., Bureš, V., Sedhom, B. E. (2024). Comprehensive review of energy storage systems technologies, objectives, challenges, and future trends. *Energy Strategy Reviews*, 54, 101482. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101482>.

Guo, X., Gong, R., Qin, N., Jin, L., Zheng, J., Wu, Q., Zheng, J. P. (2019). The influence of electrode matching on capacity decaying of hybrid lithium ion capacitor. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 845, 84—91. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2019.05.046>.

Imanishi, N., Inoue, Y., Hirano, A., Ueda, M., Takeda, Y., Sakaebe, H., Tabuchi, M. (2005). Anti-fluorite compounds,  $\text{Li}_{5+x}\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_4$ , as a lithium intercalation host. *Journal of Power Sources*, 146(1—2), 21—26. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.03.010>.

Jeon, S., Im, S., Kang, I., Shin, D., Yu, S., Lee, M., Hong, J. (2024). Solution-Based Deep Prelithiation for Lithium-Ion Capacitors with High Energy Density. *Small*, 20(30). <https://doi.org/10.1002/smll.202401295>.

Karimi, D., Behi, H., Van Mierlo, J., Berecibar, M. (2022). A Comprehensive Review of Lithium-Ion Capacitor Technology: Theory, Development, Modeling, Thermal Management Systems, and Applications. *Molecules*, 27(10), 3119. <https://doi.org/10.3390/molecules27103119>.

Lain, M. J., Brandon, J., Kendrick, E. (2019). Design Strategies for High Power vs. High Energy Lithium Ion Cells. *Batteries*, 5(4), 64. <https://doi.org/10.3390/batteries5040064>.

Li, T., Dong, M. (2019). Residential Energy Storage Management With Bidirectional Energy Control. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(4), 3596—3611. <https://doi.org/10.1109/tsg.2018.2832621>.

Lim, Y.-G., Kim, D., Lim, J.-M., Kim, J.-S., Yu, J.-S., Kim, Y.-J., Byun, D., Cho, M., Cho, K., Park, M.-S. (2015). Anti-fluorite  $\text{Li}_6\text{CoO}_4$  as an alternative lithium source for lithium ion capacitors: an experimental and first principles study. *Journal of Materials Chemistry A*, 3(23), 12377—12385. <https://doi.org/10.1039/c5ta00297d>.

Lu, X., Qiu, J., Zhang, C., Lei, G., Zhu, J. (2024). Seizing unconventional arbitrage opportunities in virtual power plants: A profitable and flexible recruitment approach. *Applied Energy*, 358, 122628. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122628>.

Madabattula, G., Wu, B., Marinescu, M., Offer, G. (2019). How to Design Lithium Ion Capacitors: Modelling, Mass Ratio of Electrodes and Pre-lithiation. *Journal of The Electrochemical Society*, 167(1), 013527. <https://doi.org/10.1149/2.0272001jes>.

Park, H., Bera, R. K., Yoon, H., Kim, K. (2025). 3D Graphene-like Microporous Carbon for Ultra-long-Life Lithium-Ion Capacitors. *ACS Applied Energy Materials*, 8(13), 9489—9496. <https://doi.org/10.1021/acsaem.5c01138>.

Qiu, J., Zhao, J., Wen, F., Zhao, J., Gao, C., Zhou, Y., Tao, Y., Lai, S. (2024). Challenges and Pathways of Low-Carbon Oriented Energy Transition and Power System Planning Strategy: A Review. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 11(6), 5396—5416. <https://doi.org/10.1109/tNSE.2023.3344729>.

Rey, S. O., Romero, J. A., Romero, L. T., Martínez, À. F., Roger, X. S., Qamar, M. A., Domínguez-García, J. L., Gevorkov, L. (2023). Powering the Future: A Comprehensive Review of Battery Energy Storage Systems. *Energies*, 16(17), 6344. <https://doi.org/10.3390/en16176344>.

Scarlett, C., Utgikar, V. (2025). Exploring the Material Feasibility of a LiFePO<sub>4</sub>-Based Energy Storage System. *Energies*, 18(15), 4102. <https://doi.org/10.3390/en18154102>.

Saaravia-Guerrero, J. A., Espinosa-Juarez, E. (2022). Optimal Sizing of BESS for Peak Shaving in a Microgrid. *2022 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, 1—6. <https://doi.org/10.1109/ropec55836.2022.10018610>.

Shafiekhani, M., Ahmadi, A., Homaei, O., Shafie-khah, M., Catalão, J. P. S. (2022). Optimal bidding strategy of a renewable-based virtual power plant including wind and solar units and dispatchable loads. *Energy*, 239, 122379. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122379>.

Slesinska, S., Réty, B., Matei-Ghimbeu, C., Fic, K., Menzel, J. (2025). Identifying the Activated Carbon Electrode Aging Pathways in Lithium-Ion Hybrid Capacitors. *ACS Applied Energy Materials*, 8(2), 810—820. <https://doi.org/10.1021/acsaem.4c01940>.

Soltani, M., Beheshti, S. H. (2021). A comprehensive review of lithium ion capacitor: development, modelling, thermal management and applications. *Journal of Energy Storage*, 34, 102019. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102019>.

Song, Z., Zhang, G., Deng, X., Zou, K., Xiao, X., Momen, R., Massoudi, A., Deng, W., Hu, J., Hou, H., Zou, G., Ji, X. (2022). Ultra-Low-Dose Pre-Metallation Strategy Served for Commercial Metal-Ion Capacitors. *Nano-Micro Letters*, 14(1). <https://doi.org/10.1007/s40820-022-00792-x>.

Sun, X., An, Y., Zhang, X., Wang, K., Yuan, C., Zhang, X., Li, C., Xu, Y., Ma, Y. (2022). Unveil Overcharge Performances of Activated Carbon Cathode in Various Li-Ion Electrolytes. *Batteries*, 9(1), 11. <https://doi.org/10.3390/batteries9010011>.

Sun, C., Zhang, X., Li, C., Wang, K., Sun, X., Liu, F., Wu, Z.-S., Ma, Y. (2022). A safe, low-cost and high-efficiency presodiation strategy for pouch-type sodium-ion capacitors with high energy density. *Journal of Energy Chemistry*, 64, 442—450. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2021.05.010>.

Tao, Y., Qiu, J., Lai, S., Zhao, J. (2021). Integrated Electricity and Hydrogen Energy Sharing in Coupled Energy Systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12(2), 1149—1162. <https://doi.org/10.1109/tSG.2020.3023716>.

Wan, T., Tao, Y., Qiu, J., Lai, S. (2021). Data-Driven Hierarchical Optimal Allocation of Battery Energy Storage System. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 12(4), 2097—2109. <https://doi.org/10.1109/tSTE.2021.3080311>.

Wu, Z., Sun, K., Wang, Z. (2022). A Review of the Application of Carbon Materials for Lithium Metal Batteries. *Batteries*, 8(11), 246. <https://doi.org/10.3390/batteries8110246>.

Yadav, N., Hashmi, S. A. (2022). Novel Tin-based Gel Polymer Electrode and Its Use in Sodium-ion Capacitor (Version 1). *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2201.09665>.

Yang, Q., Zhi, C. (2018). Novel Nanotechnology For The Practical Application Of Aqueous Sodium Ion Capacitors. Режим доступу: <https://passive-components.eu/novel-nanotechnology-for-the-practical-application-of-aqueous-sodium-ion-capacitors/>.

Yu, H., Niu, S., Shang, Y., Shao, Z., Jia, Y., Jian, L. (2022). Electric vehicles integration and vehicle-to-grid operation in active distribution grids: A comprehensive review on power architectures, grid connection standards and typical applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 168, 112812. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112812>.

Zhang, X., Zhang, K., Zhang, W., Zhang, X., Wang, L., An, Y., Sun, X., Li, C., Wang, K., Ma, Y. (2023). Carbon Nano-Onion-Encapsulated Ni Nanoparticles for High-Performance Lithium-Ion Capacitors. *Batteries*, 9(2), 102. <https://doi.org/10.3390/batteries9020102>.

Zhao, Z., Luo, F., Zhu, J., Ranzi, G. (2023). Multi-Stage Mobile BESS Operational Framework to Residential Customers in Planned Outages. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 14(5), 3640—3653. <https://doi.org/10.1109/tsg.2023.3245094>.

Zhao, C., Andersen, P. B., Træholt, C., Hashemi, S. (2023). Grid-connected battery energy storage system: a review on application and integration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 182, 113400. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113400>.

Zou, K., Cai, P., Cao, X., Zou, G., Hou, H., Ji, X. (2020). Carbon materials for high-performance lithium-ion capacitor. *Current Opinion in Electrochemistry*, 21, 31—39. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2020.01.005>.

УДК 641.56-056.84:641.85

## **DIRECTIONS FOR IMPROVING TECHNOLOGY, PRODUCTION ORGANIZATION AND QUALITY MANAGEMENT OF SPECIAL-PURPOSE VEGETARIAN PUDDINGS FOR RESTAURANT ENTERPRISES**

**A. Maksymiuk, O. Pavliuchenko, O. Kuzmin**

*National University of Food Technologies*

---

**Key words:**

*Vegetarian pudding  
Hemp protein  
Stevia  
Erythritol  
Special-purpose purpose  
Glycemic index  
Critical control points  
restaurant enterprise*

---

**Article history:**

Received 11.09.2025  
Received in revised form  
29.09.2025  
Accepted 17.10.2025

---

**Corresponding author:**

O. Pavliuchenko  
**E-mail:**  
5098@ukr.net

**Citation:** Максимюк А. І., Павлюченко О. С., Кузьмін О. В. (2025). Напрями удосконалення технології, організації виробництва та управління якістю вегетаріанських пудингів спеціального призначення для закладів ресторанного господарства. *Наукові праці НУХТ*, 31(5), 153—167. DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-5-13

**ABSTRACT**

---

The results of a comprehensive study of the innovative technology for vegetarian puddings of special purpose, developed for restaurant establishments, fully meet modern requirements for rational and health-promoting nutrition.

The feasibility of improving the formulation of vegetarian pudding has been confirmed by the complete replacement of sugar with a mixture of natural sweeteners (stevia and erythritol) and enrichment with hemp protein (in the amounts of 24 g and 10 g respectively per 125 g of the finished product).

A comparative evaluation of the control and innovative samples based on sensory characteristics showed that the innovative pudding significantly outperformed the control sample in appearance, color, and taste, as evidenced by a higher comprehensive quality index (0.848 versus 0.714).

Rheological measurements established that the innovative pudding was characterized by a higher initial viscosity (up to 800 mPa·s) compared to the control ( $\approx$ 400 mPa·s), forming a denser and more pleasant texture.

The nutritional value calculation demonstrated that the use of hemp protein and sugar replacement contributed to an increase in protein (4.7 g) and fat (4.9 g) content and a reduction in carbohydrates (13.8 g).

A significant increase in the amino acid score for all essential amino acids was found, along with enrichment in B-group vitamins and key minerals (magnesium, phosphorus, potassium, iron, zinc, and copper).

The glycemic index of the innovative pudding was found to be considerably lower (49) compared to the control sample (63).

Critical Control Points (CCPs) were identified: at the stages of temporary storage of raw materials, cooking, cooling in molds, and temporary storage of finished products. Monitoring of CCPs will ensure the quality and safety of the products, improving the management of technological processes in catering establishments.

---

**DOI:** 10.24263/2225-2924-2025-31-5-13

---

## **НАПРЯМИ УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ, ОРГАНІЗАЦІЇ ВИРОБНИЦТВА ТА УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ВЕГЕТАРІАНСЬКИХ ПУДИНГІВ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ДЛЯ ЗАКЛАДІВ РЕСТОРАННОГО ГОСПОДАРСТВА**

**А. І. Максимюк, О. С. Павлюченко, О. В. Кузьмін**

*Національний університет харчових технологій*

*Результати комплексного дослідження інноваційної технології вегетаріанських пудингів спеціального призначення, розроблених для закладів ресторанного господарства, повністю відповідають сучасним вимогам раціонального, корисного для здоров'я харчування. Підтверджено доцільність удосконалення рецептури вегетаріанського пудингу шляхом повної заміни цукру на суміші натуральних підсолоджувачів (стевія та еритритол) і збагачення конопляним протеїном (у кількостях 24 г та 10 г відповідно на 125 г готового продукту).*

*Порівняльна оцінка контрольного та інноваційного зразків за органолептичними показниками показала, що інноваційний пудинг значно перевершив контрольний зразок за зовнішнім виглядом, кольором і смаком, про що свідчить вищий комплексний показник якості (0,848 проти 0,714).*

*Реологічні вимірювання встановили, що інноваційний пудинг характеризується вищою початковою в'язкістю (до 800 мПа·с) порівняно з контролем ( $\approx 400$  мПа·с), що формує більш щільну та приємну текстуру.*

*Розрахунок поживної цінності продемонстрував, що використання конопляного протеїну та заміна цукру сприяють збільшенню вмісту білків (4,7 г), жирів (4,9 г) та зменшенню вуглеводів (13,8 г).*

*Встановлено суттєве зростання амінокислотного скору за всіма незамінними амінокислотами, а також збагачення вітамінами групи В й ключовими мінералами (магній, фосфор, калій, залізо, цинк, мідь).*

*Глікемічний індекс інноваційного пудингу ПІ (49) значно нижчий порівняно з контролем (63).*

*Ідентифіковано критичні контрольні точки (ККТ) на етапах: тимчасового зберігання сировини, варіння, охолодження у формах та тимчасового зберігання готової продукції. Моніторинг за ККТ забезпечить якість і безпеку продукції, покращуючи управління технологічними процесами у закладах ресторанного господарства.*

**Ключові слова:** вегетаріанський пудинг, конопляний протеїн, стевія, еритритол, спеціальне призначення, технологія, організація виробництва, біологічна цінність, глікемічний індекс, реологічні властивості, органолептичні показники, управління якістю, критичні контрольні точки, заклад ресторанного господарства.

**Постановка проблеми.** У сучасному світі, на тлі зростаючої уваги населення до питань здоров'я та харчування, серед споживачів продукції ресторанного господарства спостерігається значне збільшення попиту на спеціальні харчові продукти (Погорельська, Павлюченко, & Силка, 2023).

Традиційні десерти та холодні солодкі страви закладів ресторанного господарства, включаючи пудинги, попри їхню популярність і різноманітність смаків, часто характеризуються високим вмістом цукру та низькою поживною й біологічною цінністю, зокрема і через відсутність достатньої кількості повноцінних білків, які є життєво важливими макронутрієнтами, що відіграють ключову роль у підтримці м'язової маси, синтезі ферментів, гормонів і загальному функціонуванні організму.

Саме тому особливої актуальності набуває проблема удосконалення технології виробництва солодких страв закладів ресторанного господарства, що відповідають основним принципам здорового харчування та потребам споживачів, які дотримуються певних харчових обмежень, зокрема вегетаріанців і веганів.

Одним із напрямів досягнення поставленої мети є використання високобілкової рослинної сировини та зниження глікемічного навантаження за рахунок заміни цукру. При цьому важливим є збереження привабливих органолептичних показників готової продукції. Вирішення поставлених завдань дозволить розширити асортимент якісної продукції спеціального призначення для закладів ресторанного господарства та сприятиме формуванню здорових харчових звичок серед споживачів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблема покращення поживної цінності страв і розробки альтернатив, що відповідають потребам здорового харчування, є актуальним напрямом світових наукових досліджень. Значна увага вітчизняних і закордонних науковців зосереджена на вивченні потенціалу використання рослинних білків і натуральних підсолоджувачів у технології солодких страв для закладів ресторанного господарства.

Дослідження українських науковців сфокусовані на вивченні технологічних аспектів додавання ізоляту соєвого білка до бісквітних напівфабрикатів. У (Грищенко, 2019) автор аналізує вплив соєвого білка на структуру, об'єм та інші ключові характеристики готового продукту, що є важливим для створення високоякісних десертів. Актуальність теми підтверджують дослідження, присвячені структурі та фізико-хімічним властивостям десертів з рослинними добавками (Поліщук, Кузьмик, Осьмак, Курмач, & Басс, 2021). Існують також дослідження впливу рослинних білків (вівсяний, соєвий, гороховий ізолят) на властивості молочного морозива, зокрема його фізико-хімічні, текстурні та органолептичні показники (Mykhalevych, Polishchuk, Bandura, Osmak, & Bass, 2024).

У світовій науковій спільноті активно досліджується конопляний протеїн як перспективне джерело білка. Був проведений систематичний огляд щодо його отримання, харчових властивостей, а також описані сучасні методи модифікації, що є корисним для адаптації білка в рецептурах десертів (Karabulut, Kahraman, Pandalaneni, Karoog, & Feng, 2023). Досягнення у модифікації рослинного білка, з акцентом на конопляному протеїні, висвітлюються в окремих оглядових працях (Liu, Xue, & Adhikari, 2024). Додатково досліджувався вплив методу екстракції та сорту коноплі на кінцеву структуру, функцію та поживну якість отриманого білка

(Eckhardt, Bu, Franczyk, & Michaels, 2024). Вплив методів екстракції та концентрації білка на його структурні, функціональні та реологічні властивості, а також гелеутворювальні характеристики, детально проаналізовані у низці публікацій (Dash, Singh, & Singha, 2024, 2025). Особливості виділення, мікроструктуру та фізико-хімічні особливості білкових тіл з насіння конопель розглянуто в (Do, Ye, Singh, & Acevedo-Fani, 2024). Вплив конопляного білка на смакові компоненти та фізико-хімічні властивості продуктів, зокрема йогурту на рослинній основі, є предметом досліджень у (Хуа та ін., 2022). Вивчалися антиоксидантні властивості гідролізатів конопляного білка (Montserrat-de la Paz та ін., 2023), а також підтверджувалася його харчова цінність порівняно з казеїном у дорослих з гіпертонією (Samsamikor, & Aluko, 2024). Різні аспекти використання коноплі в харчовій промисловості, зокрема її потенціал як джерела білка, аналізувалися в загальних оглядах (Yano, & Fu, 2023).

Паралельно значна увага приділяється натуральним підсолоджувачам. Вивчалися можливості застосування цукрозамінників (ізомальтитулу та суміші ізомальтитулу з еритритолом) у технології вівсяного печива (Чаркіна, & Дорохович, 2023). Стевія розглядається як «солодкі ліки для здорового світу» (Sakthivel, & Kumar, 2025). Досліджувався вплив еритритолу на метаболізм глюкози, ліпідів і білків (Huang, Wang, & Xiao, 2025), а також нейронні реакції на еритритол (Budzinska та ін., 2025). Існують праці, присвячені виробництву та оцінці нових підсолоджувачів з амінокислот стевії (Khattab, Massoud, & El-Faham, 2015). Рандомізоване перехресне дослідження показало, що шоколад із сумішшю цукрозамінників (стевія, еритритол, інулін) дає нижчу постпрандіальну відповідь глюкози у людей з діабетом, що є практичним підтвердженням ефективності таких сумішей (Oliveira, Falkenhain, & Little, 2022).

Незважаючи на значні досягнення, подальшого вивчення потребують питання комплексного поєднання конопляного протеїну з натуральними підсолоджувачами (стевією та еритритолом) у гелеутворюючих десертах, зокрема пудингах, з метою досягнення оптимальних структурно-механічних і сенсорних характеристик без втрати поживних якостей. Актуальним залишається дослідження стабільності таких інноваційних продуктів під час зберігання.

**Метою дослідження** є удосконалення технології, організація виробництва та управління якістю вегетаріанських пудингів спеціального призначення для закладів ресторанного господарства.

**Матеріали і методи.** Об'єктом дослідження була технологія вегетаріанських пудингів спеціального призначення, організація виробництва та забезпечення якості й безпеки продукції на всіх етапах технологічного процесу.

Як предмети дослідження обрано конопляний протеїн ТМ «Здорово», суміш підсолоджувачів стевії й еритритолу ТМ «Green Leaf», дослідні зразки пудингів, виготовлені за традиційною (контрольний зразок) та удосконаленою рецептурою із заміною цукру та збагачені білком, показники якості, параметри технологічного процесу, контрольні критичні точки.

Органолептичні показники якості дослідних зразків пудингів визначали шляхом дегустації з подальшим оцінюванням за 5-бальною шкалою, що відповідає загальноприйнятим методам сенсорного аналізу харчової продукції.

Комплексний показник якості розраховували за методом Гаррінгтона, в основі якого лежить ідея перетворення натуральних значень індивідуальних відгуків у безрозмірну шкалу бажаності (переваг). Для цього було проведено дослідження органолептичних властивостей пудингів, визначено базові відмітки шкали бажаності, побудовано узагальнену функцію бажаності, розраховано узагальнений показник якості, проведено аналіз результатів і зроблено висновки (Shapovalenko, Pavliuchenko, Furmanova, Sharan, & Kuzmin, 2020).

Фізико-хімічні показники, такі як в'язкість і пружність гелів, досліджували з використанням ротаційного віскозиметра Kinexus pro+.

Поживну й енергетичну цінність, вміст вітамінів, макро- та мікроелементів розраховували за даними хімічного складу, який наданий на упакуванні та з відкритих джерел.

Біологічну цінність білків дослідних зразків пудингів оцінювали шляхом порівняння вмісту незамінних амінокислот у їх складі з амінокислотою шкалою «ідеального» еталонного білка, рекомендованою ФАО/ВООЗ, для визначення амінокислотного скору. Аналіз глікемічного індексу (ГІ) проводився розрахунковим методом.

**Викладення основних результатів дослідження.** У межах представленого дослідження було удосконалено технологію вегетаріанських пудингів спеціального призначення, спрямовану на підвищення їхньої поживної, біологічної цінностей і покращення споживних властивостей. Для порівняльної оцінки було виготовлено два варіанти продукту: контрольний зразок та інноваційний пудинг. Контрольний вегетаріанський пудинг виготовляли за традиційною рецептурою пуерто-риканського пудингу «Темблеке» з використанням цукру.

Натомість, інноваційний пудинг був модифікований шляхом повної заміни цукру на комбінацію натуральних підсолоджувачів (стевії та еритритолу), а також збагачений високоякісним рослинним білком — конопляним протеїном. Ці зміни були спрямовані на зниження глікемічного навантаження продукту та підвищення його поживної і біологічної цінності, що відповідає сучасним тенденціям здорового та вегетаріанського харчування.

Відповідно до сучасних уявлень про раціональне та здорове харчування, а також з огляду на зростаючий попит на вегетаріанські продукти було удосконалено рецептуру й технологію вегетаріанського пудингу «Тамблеке» шляхом внесення конопляного протеїну та повної заміни цукру на суміш підсолоджувачів стевії й еритритолу.

У межах дослідження було проаналізовано зразки пудингу з різним рецептурним складом, зокрема:

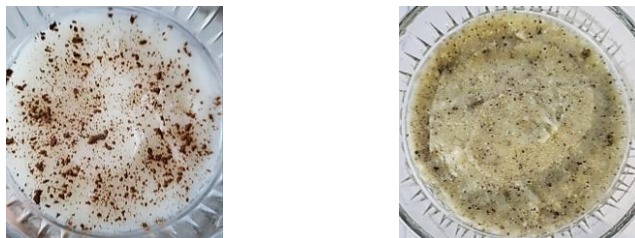
- контрольний зразок — кокосовий напій, сіль, кукурудзяний крохмаль і цукор;
- інноваційний зразок — кокосовий напій, сіль, кукурудзяний крохмаль, суміш стевії та еритритолу, конопляний протеїн.

У ході попередніх досліджень було визначено раціональне дозування конопляного протеїну у кількості 10 г, суміші стевії та еритритолу (солідність 1:1) у кількості 24 г як альтернативи цукру.

Зовнішній вигляд отриманих дослідних зразків пудингів наведено на рис. 1 (фото авторів з верхнього ракурсу).

Одними з визначальних показників якості готової продукції, які здатні прива-

бити та задовольнити смакові очікування потенційних споживачів, є їх органолептичні властивості, які для вегетаріанського пудингу «Темблеке» мають відповідати вимогам, наведеним у табл. 1.



а

б

Рис. 1. Зовнішній вигляд дослідних зразків: а — контрольний зразок пудингу, б — інноваційний зразок пудингу

Таблиця 1. Органолептичні властивості базового вегетаріанського пудингу (контролю) «Темблеке»

Показник	Характеристика
Зовнішній вигляд	Готовий пудинг повинен мати рівномірну, гладку поверхню з легким блиском, що характерно для страв на основі крохмалю
Колір	Насичений білий або злегка кремовий відтінок з нижнім коричневим відтінком від кориці, якщо вона присутня
Запах	Має легкий аромат кокосового молока і невиражений запах спецій. Готовий пудинг виділяє приємний аромат з нотками кориці та кокоса
Смак	Ніжний, солодкий смак з вершковим відтінком кокосового молока та пряними нотками кориці
Консистенція	Густа, однорідна, без грудочок консистенція. Готовий пудинг — м'який, злегка пружний, легко ламається ложкою, з однорідною структурою без грудочок

Дослідження органолептичних властивостей здійснювали шляхом дегустування, показники оцінювали за 5-бальною шкалою, враховуючи коефіцієнти вагомості для кожного окремого показника.

За отриманими результатами органолептичного оцінювання було побудовано профілограми (рис. 2).

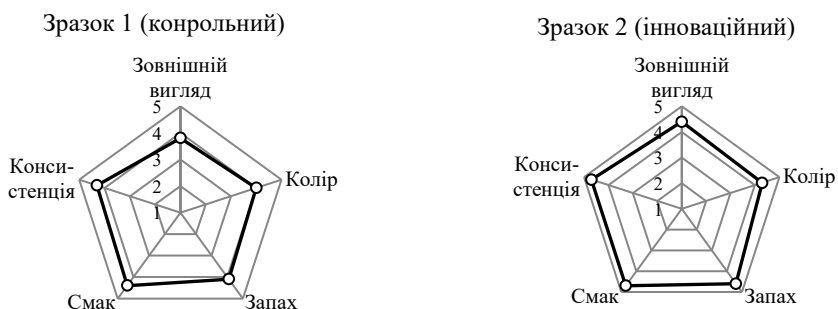


Рис. 2. Профілограми органолептичних показників якості дослідних зразків пудингів

Введення конопляного протеїну та суміші альтернативних підсолоджувачів (стевії та еритритолу) дозволило покращити органолептичні показники (рис. 2) зокрема за зовнішнім виглядом, який став більш привабливий, з'явився більш яскравий кремовий колір (рис. 1) та приємний смак з відчутним горіховими нотками конопляного протеїну. Для дослідних зразків розраховано комплексний показник якості (рис. 3) на основі діапазону показника бажаності від 0 до 1.

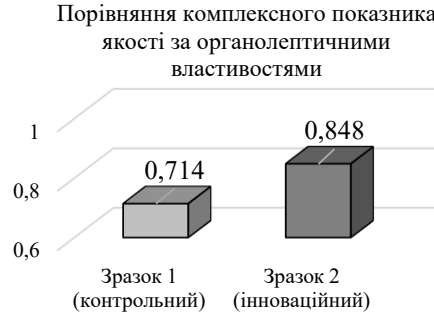


Рис. 3. Комплексний показник критеріїв якості пудингів

Завдяки проведеному органолептичному тестуванню було встановлено, що інноваційний зразок пудингу досяг вищого комплексного показника якості (0,848) порівняно з контрольним (0,714). Це свідчить про помітне покращення його сенсорних властивостей, що підтверджує успішність впроваджених змін у рецептурі чи виробничому процесі.

Текстура харчових продуктів та їхня поведінка під час обробки й споживання значною мірою визначаються реологічними властивостями. Для пудингів, що належать до класу гелів, ключовим параметром є в'язкість, яка коливається залежно від прикладеної сили. Для точного вимірювання цих властивостей використовувався реометр Kinexus pro+. Цей прилад забезпечує об'єктивність і повторюваність даних, мінімізуючи вплив оператора завдяки стандартизованим процедурам.

Дослідження проводилося при кімнатній температурі із застосуванням програми Shear Rate Ramp, що дозволило відстежувати зміну динамічної в'язкості ( $\eta$ ) відповідно до швидкості зсуву ( $\dot{\gamma}$ ) в логарифмічному масштабі, використовуючи стандартну геометрію виміральної системи. Графік залежності в'язкості від швидкості зсуву для контрольного зразка пудингу (без додатків білка чи заміників цукру) представлений на рис. 4.

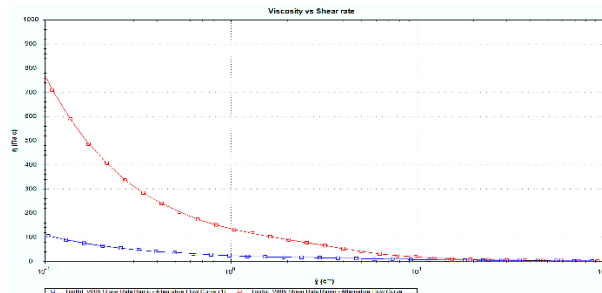


Рис. 4. Графік залежність в'язкості від швидкості зсуву для контрольного зразка пудингу

Крива в'язкості контрольного пудингу показує його псевдопластичні властивості: в'язкість знижується при зростанні швидкості зсуву, що є ознакою структурованого гелю, який деформується під навантаженням. При низьких швидкостях зсуву його максимальна в'язкість сягає приблизно 400 мПа·с, що підтверджує високу щільність структури продукту. Порівняно з цим, на рис. 5 відображено графік залежності в'язкості для інноваційного пудингу, до складу якого входять конопляний протеїн, стевія та еритритол.

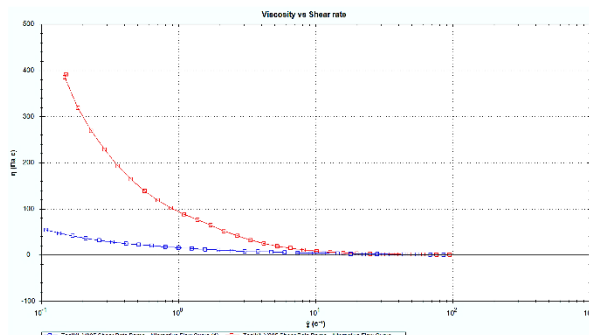


Рис. 5. Графік залежності в'язкості інноваційного пудингу, який містить білкове збагачення та заміники цукру

Інноваційний пудинг також виявляє псевдопластичні властивості, проте його початкова в'язкість при низьких швидкостях зсуву значно вища, сягаючи до 800 мПа·с. Цей показник свідчить про більш щільну або зміцнену структуру продукту. Ймовірно, це зумовлено впливом доданих білкових компонентів і змінами в міжмолекулярних взаємодіях у гелевій системі. Хоча обидва зразки демонструють псевдопластичну поведінку, помітно вища початкова в'язкість інноваційного пудингу вказує на суттєві зміни в його структурній організації, спричинені введенням білкових добавок і цукрозамінників. Таке підвищення в'язкості може також позитивно впливати на сенсорне сприйняття, зокрема на відчуття густоти, повноти смаку й насичення під час споживання.

Реологічні дослідження підтвердили, що як контрольний, так і інноваційний пудинги демонструють псевдопластичну поведінку, при якій в'язкість зменшується зі зростанням швидкості зсуву. Це свідчить про наявність у них структурованої гелевої матриці. Проте інноваційний пудинг суттєво перевершує контрольний за початковою в'язкістю, досягаючи до 800 мПа·с порівняно з приблизно 400 мПа·с в контрольному зразку. Це значне збільшення в'язкості вказує на формування більш щільної та зміцненої структури інноваційного продукту, що, ймовірно, є наслідком взаємодії білкових компонентів (конопляного протеїну) та заміників цукру (стевії, еритритолу) в гелевій системі. Вища в'язкість інноваційного пудингу не тільки підтверджує зміни в його структурній організації, але й позитивно впливає на сенсорне сприйняття, надаючи продукту бажаної густоти, повноти смаку та відчуття насичення.

У результаті розрахунків поживної цінності дослідних зразків пудингів було встановлено, що інноваційний зразок містить (на 100 г): 4,7 г білків, 4,9 жирів, 13,8 г вуглеводів, калорійність готового продукту становить 118 ккал.

Порівняно з пудингом-контролем, інноваційний зразок характеризується вищим на 89% вмістом білків, на 37% — жирів, дещо нижчою калорійністю та меншою на 1,7% кількістю вуглеводів, що зумовлено введенням конопляного протеїну та заміною цукру на суміш стевії й еритритолу.

Одним із ключових аспектів оцінки поживної цінності білковмісних продуктів є визначення амінокислотного скору (АКС). Цей показник відображає відсоток вмісту кожної незамінної амінокислоти в досліджуваному білку порівняно з еталонним білком, рекомендованим ВООЗ/ФАО

Для кращого розуміння доцільності використання конопляного протеїну складено табл. 2, в якій наведено порівняння амінокислотного скору контрольного зразка та інноваційного пудингу.

*Таблиця 2. Порівняння амінокислотного скору контрольного та інноваційного пудингів, %*

Амінокислота	Пудинг-контроль (скор %)	Інноваційний пудинг (скор %)
Лейцин	26	63
Ізолейцин	34	73
Валін	39	75
Лізин	19	78
Метіонін	20	78
Фенілаланін	21	64
Треонін	40	86
Триптофан	18	107

*Джерело:* розраховано авторами на основі даних з відкритих джерел.

Аналіз амінокислотного скору (АКС) підтвердив суттєве покращення біологічної цінності інноваційного пудингу порівняно з контрольним зразком, у якому спостерігаються надзвичайно низькі показники за вмістом незамінних амінокислот, зокрема лізин (19%) і триптофан (18%) є лімітуючими, що вказує на низьку якість білка та його недостатню засвоюваність організмом.

На противагу цьому, інноваційний пудинг, завдяки своєму збагаченому складу, демонструє значно вищі показники АКС для всіх амінокислот. Найбільш вражаючим є збільшення скору для триптофану 107%, що свідчить про повне забезпечення потреби або навіть надлишок цієї амінокислоти. Значно покращились показники лізину (78%), метіоніну (78%), треоніну (86%), валіну (75%) та ізолейцину (73%). Хоча лейцин (63%) та фенілаланін (64%) мають дещо нижчі показники порівняно з іншими, їхній рівень також значно перевищує показники контрольного зразка.

Внесення конопляного протеїну до рецептури пудингу дозволило суттєво збалансувати амінокислотний профіль готового продукту, підвищивши його біологічну цінність до рівня, що відповідає або навіть перевищує рекомендовані норми. Це підтверджує, що інноваційний пудинг може бути джерелом білка, здатним ефективно задовольнити потреби організму в незамінних амінокислотах, зокрема веганів і вегетаріанців.

Порівняльний аналіз вітамінного складу дослідних зразків пудингів наведено в табл. 3.

*Таблиця 3. Вітамінний склад дослідних зразків пудингів (на 100 г)*

Назва вітаміну	Пудинг контроль		Пудинг інновація	
	Вміст у пудингу, мг	Забезпечення добової потреби, %	Вміст у пудингу, мг	Забезпечення добової потреби, %
Вітамін А	1,2	0,2	1,2	0,2
Вітамін В <sub>1</sub>	0,02	1,3	0,17	11,1
Вітамін В <sub>2</sub>	0,03	1,8	0,06	3,7
Ніацин (В <sub>3</sub> )	0,3	1,5	1,4	7,0
Вітамін В <sub>6</sub>	0,02	1,0	0,1	5
Фолієва кислота (В <sub>9</sub> )	1,8	0,5	14,9	4,1
Вітамін Е	0,8	5,3	1,22	8,1
Вітамін К	0,1	0,1	0,43	0,4

*Джерело:* розраховано авторами на основі даних з відкритих джерел.

Аналіз вітамінного складу контрольного та інноваційного пудингів (табл. 3) демонструє значні відмінності у забезпеченні добової потреби організму у вітамінах, особливо групи В. Хоча вміст і відсоток забезпечення добової потреби у вітаміні А залишається незмінним в обох зразках (1,2 мг, 0,2%), інноваційний пудинг значно перевершує контрольний за вмістом більшості вітамінів групи В. Зокрема, вміст вітаміну В<sub>1</sub> в інноваційному пудингу зростає з 0,02 мг до 0,171 мг, збільшуючи забезпечення добової потреби майже у 9 разів (з 1,33% до 11,1%). Аналогічна тенденція спостерігається для ніацину (В<sub>3</sub>), де показник зростає з 0,3 мг (1,5%) до 1,395 мг (6,98%), та вітаміну В<sub>6</sub> — з 0,02 мг (1%) до 0,091 мг (4,6%). Вміст вітаміну В<sub>2</sub> також подвоюється — з 0,03 мг до 0,063 мг. Хоча забезпечення добової потреби фолієвою кислотою (В<sub>9</sub>) залишається порівняно низьким для обох зразків, в інноваційному пудингу цей показник зростає з 1,8 мг до 14,9 мг, забезпечуючи 4,1% від добової норми.

Крім того, інноваційний пудинг демонструє незначне, але позитивне збільшення вмісту вітамінів Е (з 0,8 мг до 1,217 мг, забезпечуючи 8,1% добової потреби) та К (з 0,1 мг до 0,433 мг).

Отже, збагачення пудингу конопляним протеїном суттєво підвищує його вітамінний профіль, особливо за рахунок вітамінів групи В. Це робить інноваційний продукт значно ціннішим з погляду мікронутрієнтного складу та сприяє кращому забезпеченню добової потреби організму в цих життєво важливих вітамінах.

У табл. 4 наведено мінеральний склад досліджуваних зразків пудингів.

*Таблиця 4. Мінеральний склад пудингів (на 100 г)*

Назва мінералу	Контрольний зразок		Інноваційний зразок	
	Вміст у пудингу, мг	% забезпечення добової потреби	Вміст у пудингу, мг	% забезпечення добової потреби
Кальцій (Са)	17	1,7	31,5	3,2
Магній (Mg)	10	2,5	110,1	27,5
Фосфор (P)	19	2,4	254,9	31,9
Калій (K)	70	1,4	241,6	4,8
Натрій (Na)	120	8,0	121,2	8,1
Залізо (Fe)	0,2	1,1	1,34	7,4
Цинк (Zn)	0,1	0,7	1,52	10,1
Мідь (Cu)	0,03	3,0	0,26	25,8

*Джерело:* розраховано авторами на основі даних з відкритих джерел.

Аналіз мінерального складу інноваційного та контрольного зразків пудингів підтвердив значне підвищення вмісту багатьох ключових мінералів в інноваційному зразку, що суттєво покращує його поживну цінність.

Зокрема, спостерігається майже подвоєння вмісту кальцію (Ca), з 17 мг до 31,5 мг та значне зростання забезпечення добової потреби з 1,7 до 3,2%. Найбільш помітним є збільшення Магнію (Mg) — з 10 мг (2,5% добової потреби) до 110,1 мг (27,5%), і Фосфору (P) — з 19 мг (2,4%) до 254,9 мг (31,9%). Вміст Калію (K) також зростає більш ніж утричі (з 70 мг до 241,6 мг), забезпечуючи 4,8% добової потреби.

Також інноваційний пудинг демонструє значно більший вміст за наступними мікроелементами: Залізо (Fe) збільшується з 0,2 мг (1,1%) до 1,34 мг (7,4%), Цинк (Zn) — з 0,1 мг (0,67%) до 1,52 мг (10,1%), а Мідь (Cu) — з 0,03 мг (3%) до 0,26 мг (25,8%). Вміст Натрію (Na) залишається помірним, практично незмінним, що є позитивним з погляду гігієни харчування.

Таким чином, інноваційний пудинг, завдяки своєму удосконаленому рецептурному складу, є багатшим джерелом таких важливих мінералів, як магній, фосфор, калій, залізо, цинк і мідь. Це робить його продуктом, що сприяє кращому забезпеченню організму необхідними макро- та мікроелементами для підтримки життєво важливих функцій.

Глікемічний індекс (ГІ) є показником, що відображає, як швидко вуглеводи з продукту підвищують рівень глюкози в крові. Продукти з низьким ГІ забезпечують більш стабільний рівень цукру та енергії, тоді як продукти з високим ГІ викликають різкий стрибок.

Отримані дані після розрахунків свідчать, що інноваційний пудинг має значно нижчий глікемічний індекс (ГІ 49), ніж контрольний зразок (ГІ 63). Це вказує на те, що його споживання спричинить менш різке та повільніше підвищення рівня глюкози в крові. Отже, рецептура з конопляним протеїном і сумішшю стевії з еритритолом потенційно робить цю страву кращою для контролю цукру в крові порівняно з традиційним. Однак для точного підтвердження ГІ потрібні експериментальні дослідження.

Удосконалена технологія вегетаріанського пудингу спеціального призначення, збагаченого конопляним протеїном, з повною заміною цукру на суміш стевії й еритритолу не потребує додаткового устаткування та інвентарю, тому може бути реалізована у виробничих приміщеннях більшості закладів ресторанного господарства, які працюють як на сировині, так і на напівфабрикатах.

Технологічна схема виробництва складається з таких етапів (підсистем):

1. Підготовка сировини (підсистема С). Кухонну сіль, цукор, кукурудзяний крохмаль та корицю просіюють. Для цукру та солі діаметр отворів сита становить 0,001...0,003 мм, а для кориці та крохмалю — 0,001 мм.

2. Приготування рецептурної суміші та напівфабрикату пудингу (підсистема В). В окремій невеликій посудині до повного розчинення змішуються 3...4 столові ложки (від рецептурної кількості) кокосового напою з кукурудзяним крохмалем. Після цього отримана суміш виливається у ємність для подальшого варіння. До неї додаються просіяні цукор, сіль і залишок кокосового напою. Далі, постійно помішуючи, доводять до кипіння, варять близько 5...7 хв, поки маса не стане густою та однорідною.

3. Порціонування, оформлення та реалізація пудингу (Підсистема А). Готову суміш (напівфабрикат пудингу) розливають у відповідні форми, охолоджують до кімнатної температури, накривають кожен харчовою плівкою і охолоджують у холодильнику до повного застигання (від 3 год). Після повного застигання пудинг виймають з форми, викладають на тарілку та прикрашають, притрушуючи корицею. Характеристику системи «Технологія пудингу» наведено у табл. 5.

*Таблиця 5. Структура системи «Технологія пудингу»*

Підсистема	Назва підсистеми	Мета функціонування підсистеми
А	Порціонування, оформлення та реалізація	Забезпечення отримання пудингу з оптимальними органолептичними та фізико-хімічними показниками якості, що відповідають вимогам безпеки під час зберігання
В	Ключовий етап: приготування рецептурної суміші (напівфабрикату) пудингу	Формування стабільної емульсійної структури, яка характеризується однорідністю та стійкістю до розшарування. Забезпечення консистенції і смакових властивостей продукту
С	Підготовка сировини	Підготовка основних інгредієнтів згідно з рецептурою для забезпечення необхідних органолептичних, структурно-механічних і функціональних властивостей, що відповідає сучасним вимогам до здорового харчування

З огляду на дані, наведені в табл. 5, доцільним є реалізація підсистем С та В у умовах гарячого цеху, а підсистеми А — в холодному цеху закладу ресторанного господарства.

У результаті розробки системи управління безпечністю для виробництва вегетаріанських пудингів спеціального призначення в умовах закладів ресторанного господарства було охоплено всі етапи виробництва. Ідентифіковано критичні контрольні точки (ККТ) на таких етапах: тимчасового зберігання сировини; варіння; охолодження у формах; тимчасове зберігання готової продукції.

Для кожної з ККТ встановлено чіткі граничні значення тимчасового зберігання. Бакалійні товари: температура — 18...20 °С, відносна вологість — 60...75%, тривалість зберігання — 7...10 днів (відкрита тара). Кокосовий напій: температура — від +2 °С до +5 °С, відносна вологість — 80...85%, тривалість зберігання — 3...5 днів (відкрита тара). Варіння напівфабрикату пудингу: температура — 92...96 °С, тривалість — 5...7 хв; охолодження у формах: температура — від +2 °С до +5 °С, тривалість — 3 год; тимчасове зберігання готової продукції: температура — від +2 °С до +5 °С, відносна вологість — 85...87%, тривалість — 3...5 днів.

Далі на основі ідентифікованих ККТ необхідно розробити процедуру моніторингу, визначити коригувальні заходи та провести оцінку їх ефективності.

Виконання алгоритму може гарантувати безпечність продукції на кожному етапі технологічного процесу виробництва вегетаріанських пудингів спеціального призначення, відповідність вимогам НАССР і сприятиме покращенню управління технологічними процесами в закладах ресторанного господарства.

## **Висновки**

Проведені дослідження демонструють доцільність удосконалення технології, організації виробництва вегетаріанських пудингів спеціального призначення та

можливості їх реалізації в умовах закладів ресторанного господарства.

Шляхом заміни цукру на суміш стевії та еритритолу і збагачення вегетаріанського пудингу конопляним протеїном у кількостях 24 та 10 г відповідно (на 125 г готового продукту) досягнуто значного покращення його поживної цінності та споживчих властивостей. Отриманий вегетаріанський пудинг спеціального призначення містить (на 100 г): 4,7 г білків, 4,9 г жирів, 13,8 г вуглеводів, калорійність готового продукту становить 118 ккал.

Реологічні дослідження підтвердили, що інноваційний продукт володіє більш щільною та зміцненою структурою (початкова в'язкість до 800 мПа·с проти 400 мПа·с у контролю), що позитивно впливає на його текстуру та сенсорне сприйняття.

Внесення до рецептури конопляного протеїну дозволило покращити біологічну цінність вегетаріанського пудингу спеціального призначення. Він демонструє суттєво вищі показники амінокислотного скору за всіма незамінними амінокислотами, найбільше за триптофаном 107%, значно покращились показники лізину (78%), метіоніну (78%), треоніну (86%), валіну (75%) та ізолейцину (73%). Хоча лейцин (63%) та фенілаланін (64%) мають дещо нижчі показники порівняно з іншими, їхній рівень також значно перевищує показники контрольного зразка, що підтверджує його поліпшену біологічну цінність як джерела повноцінного білка.

За мінеральним і вітамінним складом також спостерігаються покращення, зокрема зростання вмісту таких життєво важливих елементів, як магній, фосфор, калій, залізо, цинк, мідь і більшості вітамінів групи В.

Розрахунок глікемічного індексу показав, що вегетаріанський пудинг спеціального призначення має значно нижчий (ГІ 49) порівняно з контрольним зразком (ГІ 63), що робить його сприятливим для контролю рівня глюкози в крові.

Загалом, комплексне оцінювання довело, що інноваційний пудинг не лише має вищий комплексний показник якості (0,848 проти 0,714) за органолептичними властивостями, але й є продуктом з покращеним поживним профілем і привабливими органолептичними, текстурними характеристиками.

У результаті розробки системи управління безпеністю для виробництва вегетаріанських пудингів спеціального призначення в умовах закладів ресторанного господарства ідентифіковано критичні контрольні точки (ККТ) на таких етапах: тимчасового зберігання сировини; варіння; охолодження у формах; тимчасове зберігання готової продукції.

Удосконалена технологія дає змогу створити й організувати виробництво вегетаріанського пудингу спеціального призначення з покращеним поживним профілем, відповідними реологічними властивостями і привабливими органолептичними показниками, що відповідає сучасним вимогам до здорового, вегетаріанського харчування, безпеки продукції та сприятиме розширенню асортименту десертів спеціального призначення для закладів ресторанного господарства.

## Література

Грищенко, В. В. (2019). Використання ізоляту соєвого білка при виробництві бісквітних напівфабрикатів. *Збірник наукових праць НУХТ*, (2), 115—121.

Поліщук, Г., Кузьмик, У., Осьмак, Т., Курмач, М., & Басс, О. (2021). Аналіз природи складових речовин кисломолочного десерту з рослинними наповнювачами. *Східно-Європейський журнал передових технологій*, 6(11(114)), 68—73. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.246309>.

Погорельська, А. С., Павлюченко, О. С., Кузьмін, О. В., Польовик, В. В., & Силка, І. М. (2023). Теоретичні аспекти доцільності створення безглютенових кексів, збагачених сиром кисломо-лочним для закладів ресторанного господарства. *Наукові праці НУХТ*, 29(1), 151—162.

Чаркіна, Д., & Дорохович, В. (2023). Можливості застосування цукрозаїнінів в технології вієсного печива. *Наукові здобутки молоді — вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті*: матеріали 89 Міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів: НУХТ.

Budzinska, A., Dupont, P., Byl, L., Teyssiere, F., Wölnerhanssen, B., Flad, E., Meyer-Gerspach, A. C., Van Oudenhove, L., & Weltens, N. (2025). Caloric labels do not influence taste pleasantness and neural responses to erythritol and sucrose. *NeuroImage*, 308, 121061. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2025.121061>.

Dash, D. R., Singh, S. K., & Singha, P. (2024). Viscoelastic behavior, gelation properties and structural characterization of Deccan hemp seed (*Hibiscus cannabinus*) protein: Influence of protein and ionic concentrations, pH, and temperature. *International Journal of Biological Macromolecules*, 263(1), 130120. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130120>.

Dash, D. R., Singh, S. K., & Singha, P. (2025). Deccan hemp (*Hibiscus cannabinus*) seed as a sustainable protein source: Impact of ultrasound coupled alkaline extraction on structural, functional, nutritional, and rheological properties. *Food Chemistry Advances*. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2025.100911>.

Do, D. T., Ye, A., Singh, H., & Acevedo-Fani, A. (2024). Protein bodies from hemp seeds: Isolation, microstructure and physicochemical characterisation. *Food Hydrocolloids*, 149, 109597. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109597>.

Eckhardt, L., Bu, F., Franczyk, A., & Michaels, T. (2024). Hemp (*Cannabis sativa* L.) protein: Impact of extraction method and cultivar on structure, function, and nutritional quality. *Current Research in Food Science*, 8, 100746. <https://doi.org/10.1016/j.crf.2024.100746>.

Huang, H., Wang, B., & Xiao, W. (2025). Research on the effects of different sugar substitutes — Mogroside V, Stevioside, Sucralose, and Erythritol — On glucose, lipid, and protein metabolism in type 2 diabetic mice. *Food Research International*, 209, 116262. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116262>.

Karabulut, G., Kahraman, O., Pandalaneni, K., Kapoor, R., & Feng, H. (2023). A comprehensive review on hempseed protein: Production, functional and nutritional properties, novel modification methods, applications, and limitations. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253(7): 127240. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127240>.

Khattab, S. N., Massoud, M. I., & El-Faham, A. (2015). Production and physicochemical assessment of new stevia amino acid sweeteners from the natural stevioside. *Food Chemistry*, 173, 979—985. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.10.093>.

Liu, X., Xue, F., & Adhikari, B. (2024). Recent advances in plant protein modification: spotlight on hemp protein. *Sustainable Food Technology*, 2(4), 893—907. <https://doi.org/10.1039/d3fb00215b>.

Montserrat-de la Paz, S., Toscano-Sanchez, R., Rivero-Pino, F., Marti, M. E., Villanueva, A., Millan, F., & Millan-Linares, M. C. (2023). Nutritional composition, ultrastructural characterization, and peptidome profile of antioxidant hemp protein hydrolysates. *Food Bioscience*, 53, 102561. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102561>

Mykhalevych, A., Polishchuk, G., Bandura, U., Osmak, T., & Bass, O. (2024). Determining the influence of plant-based proteins on the characteristics of dairy ice cream. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(11(130)), 6—15. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.308635>.

Oliveira, B., Falkenhain, K., & Little, J. P. (2022). Sugar-Free Dark Chocolate Consumption Results in Lower Blood Glucose in Adults With Diabetes. *Nutrition and Metabolic Insights*, 15. <https://doi.org/10.1177/11786388221076962>.

Shapovalenko, O., Pavliuchenko, O., Furmanova, Y., Sharan, L., Kuzmin O. (2020). Improvement of the recipe composition of special-purpose gluten-free chocolate muffins. *Food science and technology*, 14(4), 20—30. <https://doi.org/10.15673/fst.v14i4.1897>.

Sakthivel, M. A., & Kumar, S. R. (2025). Stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni): Sweet medicine for a healthier world. *Journal of Agriculture and Food Research*, 21, 101980. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101980>.

Samsamikor, M., Mackay, D. S., Mollard, R. C., Alashi, A. M., & Aluko, R. E. (2024). Hemp seed protein and its hydrolysate compared with casein protein consumption in adults with hypertension: a double-blind crossover study. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 120(1), 56—65. <https://doi.org/10.1016/j.ajcnut.2024.05.001>.

Xua, J., Xua, X., Yuana, Z., Huaa, D., Yana, Y., Baia, M., Songa, H., Yanga, L., Zhua, D., Liud, J., & Huoe, D. (2022). Effect of hemp protein on the physicochemical properties and flavor components of plant-based yogurt. *LWT*, 172, 114145. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114145>.

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>.

УДК 664.664.9

## COMPARATIVE STUDY OF THE INFLUENCE OF DRY WHEAT GLUTEN AND ENZYME PREPARATION FOR ADJUSTING THE BAKERY PROPERTIES OF FLOUR

O. Bilyk, A. Zabroda

*National University of Food Technologies*

L. Kaprelyants

*Odessa National Technological University*

N. Nepokrytova

*Stern Ingredients UKRAINE LLC*

---

**Key words:**

*Dry wheat gluten  
Enzyme preparation  
MSgluten Enhancer 22  
Bread quality  
Color*

---

**Article history:**

Received 22.09.2025  
Received in revised form  
07.10.2022  
Accepted 21.10.2025

---

**Corresponding author:**

O. Bilyk  
**E-mail:**  
bilyklena@gmail.com

**Citation:** Білик О. А., Заброта А. В., Капрельянц Л. В., Непокротова Н. О. (2025). Порівняльне дослідження впливу сухої пшеничної клейковини та ферментного препарату для коригування хлібопекарських властивостей борошна. *Наукові праці НУХТ*, 31(5), 168—185.  
DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-5-14

**ABSTRACT**

---

A comparative study of the effect of dry wheat gluten and the enzyme preparation MSgluten Enhancer 22 on laboratory baking trials to establish the possibility of adjusting the baking properties of wheat flour in order to ensure high quality indicators of bakery products made from wheat flour is presented in this article. It has been found that when using premium wheat flour with a gluten content of  $24.0 \pm 1\%$ , the optimal addition of dry wheat gluten was 2% or 0.2% of the enzyme preparation MSgluten Enhancer 22 to the flour mass. These dosages provide the best sensory and physicochemical properties of the products, as evidenced by the maximum values of the complex quality indicator.

It has been proven that the use of dry wheat gluten or the enzyme preparation MSgluten Enhancer 22 activated the dough fermentation process: when using dry wheat gluten, this was due to the improvement of the composition of the liquid phase and additional nutrition of the yeast, and the enzyme preparation — to the enzymatic cleavage of protein bonds, increasing the elasticity and gas-holding capacity of the dough.

It has been shown that the crust to crumb ratio after 72 hours of storage in products with dry wheat gluten decreased by 23.8%, and in products with the enzyme preparation — by 47.6% compared to the control, which significantly slowed down the staling process.

It was found that the addition of dry wheat gluten caused a darker creamy shade of the crumb due to the intensification of the melanoidin formation reaction, while the use of the enzyme preparation MSgluten Enhancer 22 contributed to the formation of a more porous and lighter crumb by improving the protein structure and gas-holding capacity of the dough.

---

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-5-14

---

## ПОРІВНЯЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СУХОЇ ПШЕНИЧНОЇ КЛЕЙКОВИНИ ТА ФЕРМЕНТНОГО ПРЕПАРАТУ ДЛЯ КОРИГУВАННЯ ХЛІБОПЕКАРСЬКИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БОРОШНА

О. А. Білик, А. В. Заброта

Національний університет харчових технологій

Л. В. Капрельяни

Одеський національний технологічний університет

Н. О. Непокритова

ТОВ «ШТЕРН ІНГРЕДІЄНТС УКРАЇНА»

У статті здійснено порівняльне дослідження впливу сухої пшеничної клейковини та ферментного препарату MSgluten Enhancer 22 за пробним лабораторним випіканням для встановлення можливості коригування хлібопекарських властивостей пшеничного борошна з метою забезпечення високих показників якості хлібобулочних виробів з пшеничного борошна.

Встановлено, що під час використання пшеничного борошна вищого сорту з вмістом клейковини  $24,0 \pm 1\%$  оптимальними є додавання 2% сухої пшеничної клейковини або 0,2% ферментного препарату MSgluten Enhancer 22 до маси борошна. Саме такі дозування забезпечують найкращі органолептичні та фізико-хімічні властивості виробів, про що свідчать максимальні значення комплексного показника якості.

Доведено, що застосування сухої пшеничної клейковини чи ферментного препарату MSgluten Enhancer 22 активізує процес бродіння тіста: суха пшенична клейковина покращує склад рідкої фази та живить дріжджі, а ферментний препарат розцеплює білкові зв'язки, підвищує еластичність і газоутримувальну здатність тіста.

Підтверджено, що співвідношення скоринки до м'якушки через 72 год після випікання у виробів із сухою пшеничною клейковиною знижується на 23,8%, а у виробів із ферментним препаратом — на 47,6% порівняно з контролем, що значно сповільнює процес черствіння.

Виявлено, що додавання сухої пшеничної клейковини зумовлює темніший кремовий відтінок м'якушки через інтенсифікацію реакції меланоїдиноутворення, тоді як застосування ферментного препарату MSgluten Enhancer 22 сприяє формуванню більш пористого та світлішого м'якушка за рахунок покращення структури білків і газоутримувальної здатності тіста.

**Ключові слова:** суха пшенична клейковина, ферментний препарат MSgluten Enhancer 22, якість хліба, колір.

**Постановка проблеми.** Хлібобулочні вироби — це харчові продукти, що займають значне місце в раціоні людей багатьох країн. Їх популярність зумовлена доступністю, готовністю до вживання, низькою вартістю, різноманітністю сортів з різними смаками, текстурами та харчовими цінностями. Хліб також служить

джерелом необхідних поживних речовин, зокрема вуглеводів, клітковини, білка та деяких мінералів, таких як магній, фосфат і залізо (Sadeghi, Kardooni, Ebrahimi, Assadpour, & Mahdi Jafari, 2025; Mastromatteo та ін., 2014). Значна частина сучасних наукових досліджень зосереджена на технологічних і харчових удосконаленнях за допомогою інноваційних стратегій, підходів, інгредієнтів та методів (Cappelli, Bettaccini, & Cini, 2020).

Найбільше наукових досліджень зосереджено на покращенні якості хлібобулочних виробів корегуванням хлібопекарських властивостей пшеничного борошна за рахунок використання різноманітних інгредієнтів, харчових добавок, ензимів, хлібопекарських поліпшувачів (Farbo та ін., 2020; Bilyk, Stabnikov, Vasheka, Bondarenko, & Kochubei-Lytvynenko, 2022; Lambert-Meretei, Szendrei, Nogula-Nagy, & Fekete, 2010). Хлібопекарські підприємства, зазвичай, використовують суху пшеничну клейковину, яка надає тісту еластичності, що позитивно впливає на питомий об'єм тіста і хліба (Peressini та ін., 2017).

Клейковина — зв'язний, в'язко-еластичний білковий матеріал, отриманий як побічний продукт виділення крохмалю з пшеничного борошна. Клейковина продається у висушеному стані як «життєво важлива пшенична клейковина». У цій формі функціональні властивості пшеничної клейковини можуть бути відновлені шляхом регідратації. Крім того, багато продуктів отримують з клейковини шляхом різних форм модифікації, що робить їх придатними для широкого спектра використання з доданою вартістю (Day, Augustin, Batey, & Wrigley, 2006). Негативним у використанні сухої пшеничної клейковини є низький термін зберігання, висока вартість, а також те, що вона є алергеном, тож виробники хлібобулочних виробів вимушені шукати способи заміни внесення сухої пшеничної клейковини на ферментні препарати для коригування хлібопекарських властивостей пшеничного борошна. На сьогодні забезпечення виробництва безпечної, якісної і технологічно стабільної продукції, особливо для споживачів хворих на целиакію, є надзвичайно актуальним, але ця заміна пов'язана з низкою технологічних проблем.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Якість готових хлібобулочних виробів формується безпосередньо в процесі виробництва, що зумовлює необхідність урахування хлібопекарських властивостей борошна під час розробки виробничої рецептури і регулювання технологічних параметрів.

Споживчі показники якості хлібобулочних виробів значною мірою залежать від вмісту високомолекулярних сполук, таких як білки та крохмаль, а також від кількості та якості клейковини і стану ферментних комплексів у борошні. Для виробництва хлібобулочних виробів необхідне борошно з підвищеним вмістом клейковини (Хомич, Горобес, Левченко, Висоцька, & Корнієнко, 2020). Також борошно для виготовлення хлібобулочних виробів повинно бути середнім за силою для забезпечення структурно-механічних властивостей тіста, які, у свою чергу, будуть формувати питомий об'єм і пористість м'якушки виробів (Карпик, & Свента, 2024).

У статті (Жигунов, Єнгібарян, & Мельник, 2025) автори узагальнили дані експериментів, які підтверджують, що внесення СПК у кількості 3...5% до маси борошна забезпечує оптимальний питомий об'ємом, структуру м'якушки виробів,

органолептичні показники якості хліба, особливо при використанні борошна з низьким вмістом сирої клейковини або додаванням волокнистих речовин.

Газоутримувальна здатність тіста і питомий об'єм хлібобулочних виробів залежать від суцільності та міцності клейковини тіста. Якщо борошно характеризується низьким вмістом клейковини і якість її незадовільна, то бульбашки вуглекислого газу, що утворюються під час бродіння тіста, злипаються між собою, утворюючи великі порожнини, що призводить до отримання виробів малого питомого об'єму та нерівномірної пористості м'якушки. Додавання сухої пшеничної клейковини в разі переробки такого борошна призводить до забезпечення рівномірного розподілу напруження у стінках бульбашок вуглекислого газу, зменшує швидкість коалесценції газових клітин і підвищує стабільність піни до моменту коагуляції білків під час випікання (Kokelaar, van Vliet, & Prins, 1996; Жигунов, Єнгібарян, & Мельник, 2025).

Встановлено, що суха пшенична клейковина відіграє суттєву роль у формуванні органолептичних показників якості хлібобулочних виробів. Вироби, в рецептуру яких включена суха пшенична клейковина, мають пружну та еластичну м'якушку, насичений аромат і темніше забарвлення скоринки за рахунок пришвидшення реакції меланоїдиноутворення під час випікання (Chernykh, Petrenko, & Kovalenko, 2024; Жигунов, Єнгібарян, & Мельник, 2025).

Якість комерційних зразків сухої пшеничної клейковини суттєво відрізняється між собою за фізико-хімічними та в'язкопружними властивостями. Випечений хліб також мав різні органолептичні, фізико-хімічні й текстурні властивості, які все більше відрізнялися під час зберігання. Це призводить до того, що виробникам хлібобулочних виробів при отриманні нової партії сухої пшеничної клейковини необхідно щоразу регулювати технологічний процес і встановлювати оптимальне дозування для отримання продукції належної якості (Hermans, Janssen, & van der Meer, 2024).

Непереносимість глютену була визначена як автоімунне захворювання, спричинене вживанням глютенів білків у генетично схильних осіб, що охоплює такі хвороби, як целиакія, алергія на пшеницю, нецелиакічна чутливість до глютену та глютеніна атаксія. Наразі непереносимість глютену стала одним з найпоширеніших захворювань, що тривають протягом усього життя. В Європі її поширеність, коливається від 0,3% до 2% від загальної популяції (Jiang та ін., 2026). Тому з точки зору безпечності суха пшенична клейковина є складною білковою фракцією, яка складається з проламінів (гліадинів) і глутелінів (глутенінів), через що здатна викликати цілий спектр негативних реакцій у чутливих осіб.

У технології хлібобулочних виробів ферменти відіграють життєво важливу роль, змінюючи властивості тіста та забезпечуючи високі споживчі властивості й свіжість. Ферменти допомагають змінити текстуру тіста, покращити утворення клейковини тіста. Амілази перетворюють крохмаль на цукор, глюкозу, мальтозу, високо- та низькомолекулярні декстрини, інтенсифікують процес бродіння тіста надають приємного смаку готовим виробам. Ліпази надають еластичності тісту та подовжують термін зберігання готовим виробам. Оксидози зміцнюють тісто, окислюючи певні сполуки, збільшуючи питомий об'єм виробів і покращуючи стан м'якушки. Ці ферменти каталізують біохімічні реакції, які забезпечують бажану

текстуру, смак і стабільність терміну зберігання хлібобулочних виробів (Chowdhury та ін., 2024).

Використання ксиланаз у виготовленні хліба відіграє певну роль у гідролізі ксилану, перешкоджаючи повторній агрегації глютенної мережі та покращуючи утримання води в тісті (Dahiya, Bajaj, Kumar, Tiwari, & Singh, 2020).

У технології хліба використання глюкозооксидази сприяє каталізу утворення дисульфідних зв'язків, що підвищує міцність і стабільність клейковини тіста (Xiao та ін., 2021).

Використання  $\alpha$ -амілази Novamy1™, що виділена з *Bacillus stearothermophilus*, поліпшує якість хліба завдяки своїй ендоамілазній активності за вищої оптимальної температури. Вона передусім каталізує зниження молекулярної маси амілози та генерує мальтозу й мальтодекстрин з бічного ланцюга амілопектину (Ruan, Zhang, & Xu, 2022).

Для покращення питомого об'єму хлібобулочних виробів у разі використання сильного борошна або з короткорваною клейковиною рекомендують використовувати протеази, що підвищують набухання, розтяжність і пластичність клейковини, в результаті чого зростає газотримувальна здатність тіста і, відповідно, питомий об'єм виробів (Cavia-Saiz, Gerardi, Muñiz, García-Tojal, & Salazar, 2025).

На ринку ферментів сьогодні з'явилося багато комплексів з різноманітних ферментів для впливу на якість виробів аналогічно комплексним хлібопекарським поліпшувачам. Виробник ферментних препаратів Mühlenchemie пропонує виробникам хлібобулочних виробів ферментний препарат MСgluten Enhancer 22 для часткової або повної заміни додаткового використання сухої пшеничної клейковини, тому порівняльний аналіз впливу сухої пшеничної клейковини та ферментного препарату MСgluten Enhancer 22 для коригування якості пшеничного борошна є актуальним.

**Мета дослідження:** встановити доцільність заміни використання сухої пшеничної клейковини в технології хліба у разі використання борошна зі зниженим вмістом клейковини ферментним препаратом MСgluten Enhancer 22.

**Матеріали і методи.** Для досліджень обрано хліб з пшеничного борошна вищого сорту, рецептура якого така: 1000 г борошна пшеничного вищого сорту, дріжджі хлібопекарські — 30 г, сіль кухонна — 1,3 г.

Для встановлення технологічно можливого дозування сухої пшеничної клейковини в рецептуру хліба проводили пробне лабораторне випікання. Дослідні зразки тіста замішували з включенням у рецептуру контрольного зразка 1, 2, 3 та 4% сухої пшеничної клейковини до маси борошна.

Використовували суху пшеничну клейковину VeneoPro VWG 75 від німецького виробника Mühlenchemie (Німеччина).

Для встановлення технологічно можливого дозування ферментного препарату MСgluten Enhancer 22 у рецептуру хліба проводили пробне лабораторне випікання. Дослідні зразки тіста замішували з включенням в рецептуру контрольного зразка 0,1, 0,2, 0,3 та 0,4% до маси борошна ферментного препарату MСgluten Enhancer 22.

Використовували ферментний препарат MСgluten Enhancer 22, який складається з комплексу ферментів, рослинних волокон та аскорбінової кислоти, виробник Mühlenchemie (Німеччина).

Тісто для всіх зразків замішували в тістомісильній машині ESHER (Італія) на першій швидкості 4...6 хв та 6...8 хв — на другій швидкості. Початкова температура тіста становила 28...29 °С. Тісто залишали на бродіння протягом 120 хв (з однією обминкою через 60 хв) за температури 30...32 °С. Після бродіння тісто ділили на шматки масою по 450 г, з яких формували тістові заготовки для двох формових виробів та одного подового. Зразки поміщали на вистоювання у шафу Sveba Dahlin AB DC-21 (Швеція) за температури 35...38 °С. Кінець вистоювання встановлювали органолептично. Вистояні тістові заготовки випікали в 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: станом поверхні, правильністю форми, структурою пористості, еластичністю, кольором і розжовуваністю м'якушки, а також ароматом і смаком (Galenko, Shevchenko, Seccanti, 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.

Формостійкість визначали шляхом вимірювання висоти та діаметра подових виробів (мм) і розрахунку їх співвідношення. Об'єм хліба встановлювали за допомогою об'ємомірника (ємності з дрібним зерном), який працює за принципом витіснення зерна хлібом. Об'єм витісненого зерна (см<sup>3</sup>), 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 см<sup>3</sup>/100 г (Zhu, Sakulnak, & Wang, 2016).

Дослідження процесу бродіння тіста проводили, відстежуючи динаміку виділення вуглекислого газу зі 100 г тіста при температурі 30 °С протягом усього часу бродіння та вистоювання заготовок. Для цього застосовували волюмометричний метод вимірювання об'єму CO<sub>2</sub> за сталих температури та тиску (Verheyen, Albrecht, Elgeti, Jekle, & Becker, 2015; Munteanur та ін., 2019; Shevchenko, Drobot, & Galenko, 2022).

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 наукового ступеня 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 ексикаторі та зважували аналітичними вагами з чутливістю  $\pm 0,01$  г.

Для встановлення впливу порошкоподібно сирого типу голландський на ступінь підрум'янювання скоринки хліба під час випікання досліджували колір скоринки та м'якушки. Дослідження здійснювали за методикою, описаною авторами (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 ( $-b^*$ ) і жовтий ( $+b^*$ ). Показники  $a^*$  та  $b^*$  обмежені калібруванням білого. Числове значення  $\Delta E$  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 ( $WI$ ), насичення кольору, індекс потемніння ( $BI$ ) кожного зразка визначали за рівняннями, наведені 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 в 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.** Початковий етап дослідження передбачав встановлення оптимального дозування сухої пшеничної клейковини та ферментного препарату MCgluten Enhancer 22 для покращання якості хліба з пшеничного борошна вищого сорту з вмістом клейковини 24,2% та хорошою якістю. За результатами пробного лабораторного випікання (табл. 1) встановлено, що внесення як сухої пшеничної клейковини, так і ферментного препарату

MCgluten Enhancer 22 не впливає на кислотність виробів.

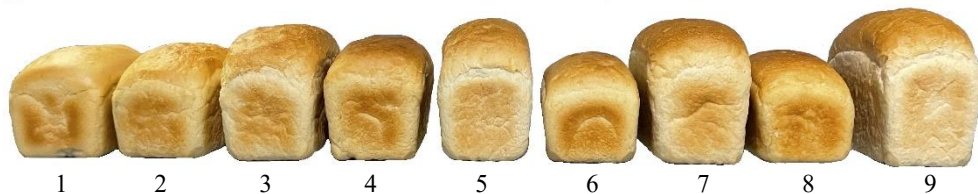
**Таблиця 1. Показники якості виробів у разі використання сухої пшеничної клейковини, ферментного препарату MCgluten Enhancer 22 (n=3, p≥0,95, δ=3...5%)**

Показник	Досліджувані зразки								
	Контроль	внесено сухої пшеничної клейковини (СПК)/ферментного препарату MCgluten Enhancer 22 (ФП), % до маси борошна							
		СПК	ФП	СПК	ФП	СПК	ФП	СПК	ФП
		1	0,1	2	0,2	3	0,3	4	0,4
Питомий об'єм, см <sup>3</sup> /г	3,36	3,41	3,84	3,88	4,26	3,48	4,47	3,50	4,53
Кислотність, град	2,0								
Формостійкість Н/Д	0,43	0,46	0,60	0,48	0,62	0,45	0,62	0,47	0,62
Пористість, %	68,0	70,0	74,0	72,0	78,0	72,0	82,0	73,0	86,0
Стан поверхні	Гладенька								
Колір скоринки	Світло жовтий	Жовто-золотистий		Світло-коричневий	Світло жовтий	Світло-коричневий	Світло жовтий	Світло-коричневий	Світло жовтий
Колір м'якушки	Світлий з жовтим відтінком	Світлий з кремовим відтінком	Світлий	Світлий з кремовим відтінком	Світлий	Світлий з кремовим відтінком	Світлий	Світлий з кремовим відтінком	Світлий
Стан пористості	Розвинена з переважанням дрібних пор у структурі м'якушки, які мають середню товщину стінки	Розвинена з переважанням середніх за розміром пор у структурі, які мають більш тонку товщину стінки					Розвинена з переважанням великих за розміром пор у структурі м'якушки, які мали більш тонку товщину стінки	Розвинена з переважанням середніх за розміром пор у структурі, які мають більш товщину стінки	Розвинена з переважанням великих за розміром пор у структурі м'якушки, які мали більш тонку товщину стінки
Еластичність м'якушки	Еластична	Більш еластична, ніж у контролі							
Смак та аромат	Властивий хлібу з пшеничного борошна								
Комплексний показник якості	71,5	74,2	75,9	82,6	91,2	83,2	91,0	82,6	90,1

Дослідження фізико-хімічних показників виробів показало, що в разі використання сухої пшеничної клейковини зміна питомого об'єму виробів у бік збіль-

шення була в межах від 1,5 до 15,5, тоді як найбільший питомий об'єм був за дозування 2% до маси борошна. У разі використання ферментного препарату MСgluten Enhancer 22 спостерігалось суттєве збільшення питомого об'єму виробів порівняно з контролем, що знаходилося в межах 14,3...34,8%. Для подового виробу важливим показником якості є формостійкість. У разі використання сухої пшеничної клейковини відбувається незначне покращання формостійкості виробів порівняно з контрольним зразком. Відзначено більш позитивний вплив на формостійкість використання ферментного препарату MСgluten Enhancer 22, яка збільшилася на 39,5...44,2% порівняно з контролем. Також спостерігався аналогічний вплив сухої пшеничної клейковини та ферментного препарату MСgluten Enhancer 22 на пористість виробів.

За зовнішнім виглядом готові вироби (рис. 1) із сухою пшеничною клейковиною характеризувалися більш інтенсивним забарвленням скоринки. Так, якщо за дозування 1% до маси борошна сухої пшеничної клейковини скоринка набувала більш золотистого забарвлення, порівняно з контролем, то за більшого її дозування скоринка вже характеризувалася світло-коричневим забарвленням. До того ж у разі використання сухої пшеничної клейковини такі характеристики кольору були властиві не тільки скоринці, але й боковим стінкам формових виробів. У разі використання ферментного препарату MСgluten Enhancer 22 колір верхньої скоринки та бокових стінок формового хліба був світліший за контрольний зразок і зразки із сухою пшеничною клейковиною.



**Рис. 1. Фото виробів:** 1 — контроль (без добавок); з додаванням сухої пшеничної клейковини, % до маси борошна: 2 — 1%, 4 — 2%, 6 — 3%, 8 — 4%; з доданням ферментного препарату MСgluten Enhancer 22: 3 — 0,1%, 5 — 0,2%, 7 — 0,3%, 9 — 0,4 %

У разі використання сухої пшеничної клейковини або ферментного препарату MСgluten Enhancer 22 відзначаються зміни у формуванні структури пористості м'якушки, зокрема вона стає більш розпушеною, ніж у контролі. Якщо для контролю була характерна дрібна пористість із середньою товщиною стінки пор, то за використання сухої пшеничної клейковини формується вже більш тонкостінна пористість з більшими розмірами пор. За використання ферментного препарату MСgluten Enhancer 22 зі збільшенням його дозування м'якушка мала пористість з більшою кількістю великих пор за розміром і тонші стінки, що візуально впливало на сприйняття структури м'якушки цього виробу як більш розпушеного з невагомою м'якушкою. Ця закономірність спостерігалася як в подових виробках, так і в формових, але з більшою кількістю великих пор. Це зумовлено тим, що для формових виробів утримування тіста стінками форми сприяло інтенсивнішому збільшенню об'єму заготовки у вертикальному напрямі, що зумовлювало витягування пор уздовж висоти виробу (Бондаренко, Білик, Кочубей-Литвиненко, Півоварова, & Шинська, 2024).

На основі результатів пробного лабораторного випікання було розраховано комплексний показник якості та встановлено, що в разі використання пшеничного борошна вищого сорту з вмістом клейковини в межах  $24,0 \pm 1\%$  оптимальним є дозування сухої пшеничної клейковини в кількості 2% до маси борошна або ферментного препарату MCgluten Enhancer 22 в кількості 0,2% до маси борошна, що дозволяє сформувати у виробках високі органолептичні показники та фізико-хімічні, адже саме за цього дозування отримано найвищі значення комплексного показника якості.

Наступний етап досліджень був спрямований на визначення впливу сухої пшеничної клейковини та ферментного препарату MCgluten Enhancer 22 на технологічні процеси за встановленого оптимального дозування.

Під час лабораторного випікання, за рекомендаціями виробника, у зразок з сухою пшеничною клейковиною додатково вносили воду в кількості 3,6% до маси борошна. За результатами пробного лабораторного випікання (табл. 2) встановлено, що внесення ферментного препарату MCgluten Enhancer 22 призводить до подовження тривалості вистоювання, що зумовлено значним збільшенням пружності тіста. Варто зазначити, що внесення сухої пшеничної клейковини та ферментного препарату MCgluten Enhancer 22 в такому дозуванні не вплинуло на кислотність тіста.

*Таблиця 2. Показники технологічного процесу та якості виробів у разі використання сухої пшеничної клейковини, ферментного препарату MCgluten Enhancer 22 (n=3, p $\geq$ 0,95,  $\delta$ =3...5%)*

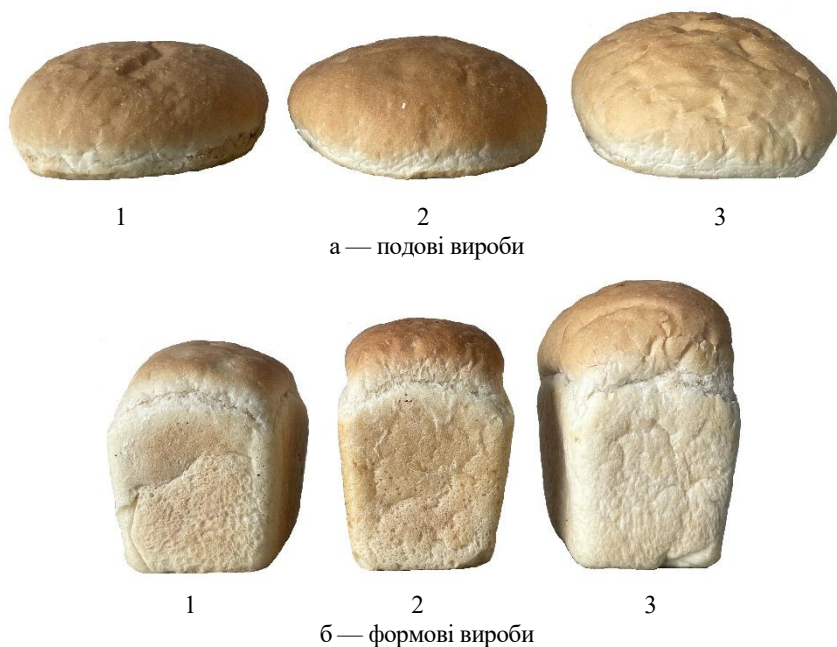
Показник	Досліджувані зразки		
	Контроль	Внесено, % до маси борошна	
		суха пшенична клейковина	ферментний препарат MCgluten Enhancer 22
		2	0,2
<i>Тісто</i>			
Масова частка вологи, %	43,5	44,0	43,5
Тривалість відлежування тіста, хв	20		
Тривалість вистоювання, хв	45	56	62
Кінцева кислотність, град	2,0	2,0	2,0
Виділено CO <sub>2</sub> за час відлежування та вистоювання, см <sup>3</sup> /100г	968	1052	1138
Розпливання кульки тіста за час відлежування та бродіння, мм	88	94	96
Питомий об'єм тіста, см <sup>3</sup> /100 г	210	226	258
Характеристика тіста	Достатньо пружне та еластичне	Достатньо пружне та еластичне	Досить пружне та еластичне
<i>Хліб</i>			
<i>Фізико-хімічні показники</i>			
Питомий об'єм, см <sup>3</sup> /г	2,32	2,38	2,75
Кислотність, град	2,0	2,0	2,0

Продовження таблиці 2

Формостійкість, Н/D	0,48	0,48	0,65
Пористість, %	76,0	82,0	88,0
Свіжість: співвідношення скоринки до м'якушки: 4 год після випікання 72 год після випікання	0,7 2,1	0,7 1,6	0,7 1,1
Стан поверхні	Гладенька		
Колір скоринки	Світло жовтий	Жовто-золотистий	Світло-жовтий
Колір м'якушки	Світлий з жовтим відтінком	Світлий з кремовим відтінком	Світлий
Стан пористості	Розвинена з переважанням дрібних пор у структурі м'якушки, які мають середню товщину стінки	Розвинена з переважанням середніх за розміром пор у структурі м'якушки, які мають більш тонку товщину стінки	Розвинена з переважанням великих за розміром пор у структурі м'якушки, які мали більш тонку товщину стінки
Еластичність м'якушки	Еластична		Більш еластична, ніж у контролі
Смак та аромат	Властивий хлібу з пшеничного борошна		

У разі використання сухої пшеничної клейковини або ферментного препарату MCgluten Enhancer 22 спостерігається інтенсифікація процесу бродіння у тісті. При використанні сухої пшеничної клейковини це явище зумовлене покращенням складу рідкої фази тіста, клейковина виступає додатковим джерелом живлення для дріжджів, збагачуючи тісто амінокислотами. Амінокислоти, у свою чергу, забезпечують подвійну функцію — є джерелом азоту та вуглецю для клітин дріжджів. Засвоєння вуглецю відбувається з кетокислотами, що утворюються в результаті відщеплення аміногрупи. Під час асиміляції амінокислот дріжджами *Saccharomyces cerevisiae* активізується синтез білкових сполук, зокрема ферментів, пригнічується активність наявних ферментів у клітинах, прискорюється процес брунькування дріжджових клітин, що зумовлює інтенсифікацію бродіння.

Використання ферментного препарату MCgluten Enhancer 22 значно підвищує виділення вуглекислого газу завдяки композиції ферментів, у склад якої входять ферменти амілолітичної дії, які інтенсифікують процес бродіння тіста завдяки своїй здатності розщеплювати крохмаль борошна на більш прості й доступні для дріжджів цукри, зокрема глюкозу та мальтозу. Ці прості вуглеводи швидко засвоюються дріжджами. Вивільнений вуглекислий газ утримується клейковинною сіткою тіста, сприяючи його підйому, скороченню тривалості бродіння та збільшенню об'єму готових виробів. Отримані результати підтверджуються показниками зростання питомого об'єму тіста, що виникає завдяки ферментним компонентам препарату, які сприяють розщепленню білкових зв'язків у клейковині, покращуючи їхню еластичність і здатність утримувати гази під час випікання. Це позитивно впливає на форму і структуру тіста, роблячи його більш гладким і стабільним, а також сприяє покращенню текстури.



**Рис. 2. Фото виробів:** 1 — контроль (без добавок); 2 — 2% сухої пшеничної клейковини до маси борошна; 3 — 0,2% ферментного препарату MCgluten Enhancer 22 до маси борошна

Дослідження фізико-хімічних показників виробів показало, що дозування 2% до маси борошна сухої пшеничної клейковини незначно впливає на зміну питомого об'єму виробів, в той час, як за дозування ферментного препарату MCgluten Enhancer 22 в кількості 0,2% до маси борошна сприяє збільшенню питомого об'єму на 18,5%.

Важливим показником якості подових виробів є формостійкість. Так, у разі дозування сухої пшеничної клейковини формостійкість залишалася на рівні контролю, а в разі використання ферментного препарату MCgluten Enhancer спостерігається покращання формостійкості виробів порівняно з контролем на 35,4%.

У разі використання сухої пшеничної клейковини або ферментного препарату MCgluten Enhancer 22 спостерігаються зміни у формуванні структури пористості м'якушки, зокрема вона стає більш розпушеною, ніж у контролі. М'якушка контролю характеризувалася дрібною пористістю із середньою товщиною стінки пор, у разі використання сухої пшеничної клейковини пористість характеризувалася переважанням середніх за розміром пор з більш тонкою товщиною стінки, а в разі використання ферментного препарату MCgluten Enhancer 22 спостерігалось переважання великих за розміром пор у структурі м'якушки, які мали більш тонші стінки.

Процес черствіння характеризується міграцією води від м'якушки до скоринки, що призводить до додаткового зниження вмісту вологи в м'якушці, в результаті чого відбувається втрата пластичності клейковинних білків. У результаті відбувається підвищення жорсткості клейковинної сітки, що також сприяє збільшенню твердості м'якушки та переходу її в підскоринковий шар під час зберігання

(Bosmans, Lagrain, Fierens, & Delcour, 2013). Дослідження зміни співвідношення скоринки до м'якушки через 72 год після випікання показало, що таке співвідношення у зразку із сухою пшеничною клейовиною на 23,8% менше порівняно з контролем; у разі використання ферментного препарату MCgluten Enhancer 22 цей показник менший на 47,6% порівняно з контролем і майже вдвічі сповільнює процес черствіння хліба, ніж за використання сухої пшеничної клейковини. Це підтверджує уповільнення процесу черствіння в разі використання і сухої пшеничної клейковини, і ферментного препарату MCgluten Enhancer 22 — повільнішої міграції вологи з м'якушки виробів у скоринку та утворення меншого підскоринкового шару.

За зовнішнім виглядом готові вироби (рис. 1 та 2) із сухою пшеничною клейовиною характеризувалися більш інтенсивним забарвленням скоринки виробів. Так, якщо за використання сухої пшеничної клейковини скоринка набувала більш золотистого забарвлення, порівняно з контролем, то за використання ферментного препарату MCgluten Enhancer 22 скоринка вже характеризувалася світло-жовтим забарвленням. До того ж за використання сухої пшеничної клейковини або ферментного препарату MCgluten Enhancer 22 такі характеристики кольору були властиві не тільки скоринці, але й боковим стінкам формових виробів. Імовірно, що ІСБ, як джерело амінокислот, сприяє інтенсифікації реакції меланоїдиноутворення, яка супроводжується утворенням не тільки барвних речовин, що надають відповідного кольору, але й ароматичних сполук. Також органолептичний аналіз показав зміни і в кольорі м'якушки за використання сухої пшеничної клейковини або ферментного препарату MCgluten Enhancer 22. Спостерігалось, що в разі використання сухої пшеничної клейковини м'якушка виробу зі світло-жовтої стає світло-кремовою, а в разі використання ферментного препарату MCgluten Enhancer 22 світлішає. Для підтвердження органолептичного аналізу здійснювалися дослідження забарвлення скоринки і м'якушки за допомогою цифрового колориметра. Результати досліджень наведено в табл. 3.

Таблиця 3. Характеристики зразків хлібобулочних виробів у кольорових моделях CIELab (n=3, p≥0,95, δ=3...5%)

Показник	Досліджувані зразки		
	Контроль	Внесено, % до маси борошна	
		суха пшенична клейковина	ферментний препарат MCgluten Enhancer 22
		2	0,2
Колірні характеристики:			
скоринка:			
$L_0^*$	60,33	57,67	64,37
$a_0^*$	12,61	6,98	12,09
$b_0^*$	30,26	21,12	27,03
$\Delta E_0^*$	—	11,06	5,19
$WI$	48,53	52,18	53,67
Chroma	32,78	22,24	29,61
$BI$	82,96	53,67	67,18
м'якушка:			
$L_0^*$	68,48	61,58	73,78

Продовження таблиці 3

$a_0^*$	0,37	-1,80	2,12
$b_0^*$	12,31	17,60	10,50
$\Delta E_0^*$	—	8,96	8,67
$WI$	66,15	57,2	74,42
Chroma	12,32	17,69	10,71
$BI$	19,76	30,94	16,4

Аналіз результатів досліджень показав, що контрольний зразок мав вище значення легкості  $L^*$  для скоринки — 60,33, якщо порівняти з хлібом із сухою пшеничною клейковиною — 57,67, що вказує на більшу легкість сприйняття, а отже, світліше забарвлення. Також м'якушка хліба із сухою пшеничною клейковиною має більше значення  $L^*$ , отже, м'якушка виробів стає темніша порівняно з контролем. Імовірно, що суха пшенична клейковина, як джерело амінокислот, сприяє інтенсифікації меланоїдиноутворення, що обумовлює формування приємного кремового відтінку м'якушки виробів.

У разі використання ферментного препарату MCgluten Enhancer 22 спостерігалось підвищення значення  $L^*$  як для скоринки, так і для м'якушки порівняно з контролем, оскільки ферменти, що входять до його складу, впливають на структуру білків клейковини та вуглеводи пшеничного борошна, сприяючи рівномірному розподілу вуглекислого газу під час випікання й покращуючи текстуру. Це призводить до утворення більш пористої і повітряної м'якушки, яка краще відбиває світло і більш світліша, ніж у контрольному зразку.

Дослідження показали, що значення психометричного тону  $a^*$  скоринки всіх виробів має червоний відтінок, значення  $a^*$  м'якушки для контрольного та з ферментним препаратом MCgluten Enhancer 22 знаходяться майже біля нуля і мають плюсове значення, що вказує на світлі пігменти, а у виробі із сухою пшеничною клейковиною це значення має від'ємне, тому з'являються жовті відтінки. Значення психометричної кольоровості  $b^*$  скоринки та м'якушки підтверджують отримані значення  $L^*$  та  $a^*$ .

У разі використання сухої пшеничної клейковини значення індексу потемніння  $BI$  м'якушки збільшувалося порівняно з контролем. Також значення індексу білизни  $WI$  теж збільшувалося за рахунок зменшення  $a^*$  та збільшення  $b^*$ , що підтверджено збільшенням розрахункового значення інтенсивності кольору Chroma, тобто потемнінням м'якушки виробів. У разі використання ферментного препарату MCgluten Enhancer 22 індекс потемніння  $BI$  м'якушки менший порівняно з контролем. Також значення індексу білизни  $WI$  теж знижувалося через зменшення  $a^*$  та  $b^*$ , що підтверджено розрахунковим значенням інтенсивності кольору.

Отримані результати впливу сухої пшеничної клейковини і ферментного препарату MCgluten Enhancer 22 на колір виробів підтвержені значенням відмінності кольору  $\Delta E_0^*$  ( $\Delta E_0^* > 3$ ), а отже, різниця кольорів сприймається людським оком, що в цілому добре узгоджується з візуальним спостереженням.

У результаті пробного лабораторного випікання було встановлено, що використання ферментного препарату MCgluten Enhancer 22 є більш доцільнішим, ніж використання сухої пшеничної клейковини. Технологічно доцільним є дозування ферментного препарату MCgluten Enhancer 22 в кількості 0,2% до маси борошна

у разі використання пшеничного борошна вищого сорту з вмістом клейковини в межах  $24,0 \pm 1\%$ , що дозволяє сформувати у виробх високі органолептичні та фізико-хімічні показники, адже саме за цього дозування отримано найбільші питомий об'єм, формостійкість виробів, пористість і світлішу м'якушку.

### Висновки

За результатами досліджень встановлено, що в разі використання пшеничного борошна вищого сорту з вмістом клейковини в межах  $24,0 \pm 1\%$  оптимальним є дозування сухої пшеничної клейковини в кількості 2% до маси борошна або ферментного препарату MCgluten Enhancer 22 в кількості 0,2% до маси борошна, що дозволяє сформувати у виробх високі органолептичні та фізико-хімічні показники, адже саме за цього дозування отримано найбільші значення комплексного показника якості.

Встановлено, що в разі використання сухої пшеничної клейковини або ферментного препарату MCgluten Enhancer 22 спостерігається інтенсифікація процесу бродіння у тісті. При використанні сухої пшеничної клейковини це явище зумовлене покращенням складу рідкої фази тіста, адже вона виступає додатковим джерелом живлення для дріжджів, збагачуючи тісто амінокислотами. У разі використання ферментного препарату MCgluten Enhancer 22 інтенсифікація процесу бродіння підтверджується зростанням питомого об'єму тіста, що виникає завдяки ферментним компонентам препарату, які сприяють розщепленню білкових зв'язків у клейковині, покращуючи її еластичність і здатність утримувати вуглекислий газ під час випікання.

Встановлено, що співвідношення скоринки до м'якушки через 72 год після випікання у зразку із сухою пшеничною клейковиною на 23,8% менше порівняно з контролем; у разі використання ферментного препарату MCgluten Enhancer 22 цей показник менше на 47,6% порівняно з контролем і майже вдвічі сповільнює процес черствіння, ніж при застосуванні сухої пшеничної клейковини.

Встановлено, що м'якушка хліба із сухою пшеничною клейковиною має більше значення  $L^*$ , отже, м'якушка виробів стає темнішою порівняно з контролем завдяки інтенсифікації меланоїдиноутворення, що обумовило формування приємного кремового відтінку м'якушки виробів. У разі використання ферментного препарату MCgluten Enhancer 22 спостерігається підвищення значення  $L^*$ , оскільки ферменти, що входять до його складу, впливають на структуру білків клейковини та вуглеводів пшеничного борошна, сприяючи рівномірному розподілу вуглекислого газу під час випікання й покращуючи текстуру. Це призводить до утворення більш пористої і повітряної м'якушки, яка краще відбиває світло та більш світла, ніж у контрольному хлібі.

Отже, у результаті пробного лабораторного випікання встановлено, що використання ферментного препарату MCgluten Enhancer 22 є більш доцільнішим за використання сухої пшеничної клейковини. Технологічно доцільним є дозування ферментного препарату MCgluten Enhancer 22 в кількості 0,2% до маси борошна в разі переробки пшеничного борошна вищого сорту з вмістом клейковини в межах  $24,0 \pm 1\%$ , що дозволяє сформувати у виробх високі органолептичні та фізико-хімічні показники, адже саме за цього дозування отримано найбільші питомий об'єм, формостійкість виробів, пористість і світлішу м'якушку.

## Подяка

Робота була виконана в рамках держбюджетної науково-дослідної роботи «Наукове обґрунтування та розроблення ресурсоефективних технологій харчової продукції цільового призначення як імператив продовольчої безпеки» 0123U102060.

## Література

Дробот, В. І. (2015). *Технохімічний контроль сировини та хлібобулочних і макаронних виробів*. Київ: Кондор-Видавництво.

Бондаренко, Ю. В., Білик, О. А., Кочубей-Литвиненко, О. В., Півоварова, В. В., Шинська А. С. (2024). Використання ізоляту сироваткових білків у виробництві булочних виробів. *Наукові праці НУХТ*, 30(6), 159—177. <https://doi.org/10.24263/22252924-2024-30-6-16>.

Жигунов, Д., Єнгібарян, В., & Мельник, І. (2025). Суха пшенична клейковина як компонент рецептури хлібобулочних виробів з високою гідратацією тіста. *Scientific Works*, 89(1), 165—173. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v89i1.3249>.

Карпик, Г., Свєнта, Н. (2024). Стабілізація споживчих характеристик хліба з пшеничного борошна зі зниженими хлібопекарськими властивостями. *Науковий вісник ЛНУ ветеринарної медицини та біотехнологій. Серія: Харчові технології*, 26(101), 41—47. <https://doi.org/10.32718/nvlvet-fl10107>.

Лебеденко, Т. Є., Пшенишнюк, Г. Ф., Соколова, Н. Ю. (2014). *Технологія хлібопекарського виробництва. Практикум: навч. пос.* Одеса: Освіта України.

Хомич, Г., Горобєс, А., Левченко, Ю., Висоцька, С., Корнієнко, Л. (2020). Борошно з м'якої пшениці в технологіях харчових продуктів. *Науковий вісник ЛНУ ветеринарної медицини та біотехнологій. Серія: Харчові технології*, 22(93), 3—8. <https://doi.org/10.32718/nvlvet-f9301>.

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>.

Bilyk, O., Stabnikov, V., Vasheka, O., Bondarenko, Y., Kochubei-Lytvynenko, O. (2022). Effect of complex baking improver on prolonging freshness of bakery products with reduced salt content. *Ukrainian Food Journal*, 11(4), 601—615. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2022-11-4-9>.

Bosmans, G. M., Lagrain, B., Fierens, E., Delcour, J. A. (2013). The impact of baking time and bread storage temperature on bread crumb properties. *Food Chemistry*, 141(4), 3301—3308. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.06.031>.

Cappelli A., Bettaccini L., Cini E. (2020). The kneading process: A systematic review of the effects on dough rheology and resulting bread characteristics, including improvement strategies. *Trends in Food Science & Technology*, 104, 91—101. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.08.008>.

Cavia-Saiz, M., Gerardi, G., Muñoz, P., García-Tojal J., Salazar G. (2025). New approach using alternative proteolytic enzymes to the conventional enzyme pronase for the isolation of bread melanoidins. *Food Chemistry*, 478, 143699. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.143699>.

Chernykh, I., Petrenko, O., & Kovalenko, S. (2024). Influence of vital wheat gluten addition on the organoleptic properties of high-hydration bread. *Ukrainian Food Journal*, 13(1), 45—56.

Chowdhury, A. H., Sarkar, F., Reem, C. S. A., Rahman, M., Mahamud, S. U., Rahman, Md. A., Ashrafudoulla, Md. (2024). Enzyme applications in baking: From dough development to shelf-life extension. *International Journal of Biological Macromolecules*, 282(4), 137020. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.137020>.

Dahiya, S., Bajaj, B. K., Kumar, A., Tiwari, S. K., Singh, B. (2020). A review on biotechnological potential of multifarious enzymes in bread making. *Process Biochemistry*, 99, 290—306. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2020.09.002>.

Day, L., Augustin, M. A., Batey, I. L., Wrigley, C. W. (2006). Wheat-gluten uses and industry needs. *Trends in Food Science & Technology*, 17(2), 82—90. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2005.10.003>.

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>.

Farbo, M. G., Fadda, C., Marceddu, S., Conte, P., Del Caro, A., Piga, A. (2020). Improving the quality of dough obtained with old durum wheat using hydrocolloids. *Food Hydrocolloids*, 101. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105467>.

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>.

Hermans, M., Janssen, A., & van der Meer, R. (2024). Partial replacement of wheat flour with vital wheat glu-ten: Effects on bread volume, texture, protein content, and sensory quality. *Journal of Cereal Science*.

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>.

Jiang, R., Lin, Z., Shi, H., Wang, Ya., Wang, Ya., Yang, Q. (2026). Chickpea sourdough as a functional ingredient in gluten-free bread: Impact on quality attributes. *Food Hydrocolloids*, 172(2), 112007. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2025.112007>.

Kokelaar, J. J., van Vliet, T., & Prins, A. (1996). Strain hardening properties and extensibility of flour and gluten doughs in relation to breadmaking performance. *Journal of Cereal Science*, 24(3), 199—214.

Lambert-Meretei, A., Szendrei, E., Nogula-Nagy, M., Fekete, A. (2010). Methods to evaluate the effects of bread improver additive on bread crumb texture properties. *Acta Alimentaria*, 39(2), 180—191. <https://doi.org/10.1556/aalim.39.2010.2.10>.

Mastromatteo, M., Danza, A., Lecce, L., Spinelli, S., Lampignano, V., Laverse, J., ..., & Del Nobile, M. A. (2014). Effect of durum wheat varieties on bread quality. *International Journal of Food Science and Technology*, 49(1), 72—81.

Munteanu, G. M., Voicu, G., Ferdeş, M., Ştefan, E. M., Constantin, G. A., & Tudor, P. (2019). Dynamics of fermentation process of bread dough prepared with different types of yeast. *Scientific Study & Research*, 20(4), 575—584. <http://surl.li/mbxym>.

Peressini, D., Braunstein, D., Page, J. H., Strybulevych, A., Lagazio, C., & Scanlon, M. G. (2017). Relation between ultrasonic properties, rheology and baking quality for bread doughs of widely differing formulation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(8), 2366—2374.

Ruan, Y., Zhang, R., Xu, Ya. (2022). Directed evolution of maltogenic amylase from *Bacillus licheniformis* R-53: Enhancing activity and thermostability improves bread quality and extends shelf life. *Food Chemistry*, 381, 32222. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132222>.

Sadeghi, A., Kardooni, Z., Ebrahimi, M., Assadpour E., Mahdi Jafari, S. (2025). The role of water alternatives in bread formulation and its quality; An emerging source of sustainable and cost-effective bakery improvers. *Future Foods*, 12, 100733. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2025.100733>.

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>.

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>.

Xiao, F., Zhang, X., Niu, M., Xiang, X., Chang, Yi., Zhao, Z., Xiong, L., Zhao, S., Rong, J., Tang C., Wu Yu. (2021). Gluten development and water distribution in bread dough influenced by bran components and glucose oxidase. *LWT*, 137. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110427>.

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 663.43:633.82

## PROSPECTS FOR THE USE OF NATIONAL AND FOREIGN HOP VARIETIES IN BREWING

R. Mukoid, Yu. Bulii, R. Kyrylenko

*National University of Food Technologies*

V. Sarana

*The National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*

---

**Key words:**

*Beer*  
*Malt*  
*Beer wort*  
*Boiling*  
*Fermentation*  
*Hops*  
*Bitterness*  
*Aroma*  
*Flavor*  
 *$\alpha$ - and  $\beta$ -acids*  
*essential oils*

---

**Article history:**

Received 11.09.2025  
Received in revised form  
25.09.2025  
Accepted 07.10.2025

---

**Corresponding author:**

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

**Citation:** Мукоїд Р. М., Булій Ю. В., Кириленко Р. Г., Сарана В. В. (2025). Перспективи використання вітчизняних і закордонних сортів хмелю у пивоварінні. *Наукові праці НУХТ*, 31(5), 186—195.  
DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-5-15

**ABSTRACT**

---

The development of the brewing industry in the conditions of market relations and foreign economic activity imposes tough competitive requirements on Ukrainian brewery enterprises. They can be fulfilled only through the introduction of modern technological solutions and the use of progressive equipment. Currently, the brewing industry of Ukraine is characterized by a large number of small craft breweries that create competition between small and medium-sized enterprises.

Today, Ukrainian beer producers face a number of serious challenges. One of the most acute is problem with the raw materials — the lack of domestic speciality malts, which are almost never produced in Ukraine, as well as the need to import diversified hops. Hops are the most expensive component of the brewing industry's raw material base.

The study of physicochemical and sensory properties of domestic and imported hops is a promising direction in brewing, especially given the growing popularity of beers made with the use of cold hop technology.

The following experimental hop varieties were selected for comparison of hop quality parameters and for the process of beer wort hopification: Ukrainian hops *Alta* (bitter) and *Spalt Select* (aromatic), and foreign hops *Herkules* (bitter) and *Hallertau Tradition* (aromatic). It was studied that domestic hop varieties did not differ from their foreign counterparts in terms of acid content, while the bitterness index of pilot beer wort samples differed by 1.4 IBU units. It was found that it is reasonable to use foreign hop varieties for the production of beer with more pronounced intense bitterness, and for obtaining a softer balanced flavour profile of beer it is advisable to use domestic varieties. Their analysis showed that they were of high quality and met the requirements of international standards. The use of domestic hops in brewing will increase the efficiency of hop production in Ukraine.

---

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-5-15

---

## ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ВІТЧИЗНЯНИХ І ЗАКОРДОННИХ СОРТІВ ХМЕЛЮ У ПИВОВАРІННІ

Р. М. Мукоїд, Ю. В. Булій, Р. Г. Кириленко

Національний університет харчових технологій

В. В. Сарана

Національний університет біоресурсів і природокористування України

*Розвиток пивоварної галузі в умовах ринкових відносин і зовнішньоекономічної діяльності ставить перед українськими пивоварними підприємствами жорсткі вимоги конкуренції. Виконати їх можливо лише завдяки впровадженню сучасних технологічних рішень і використанню прогресивного обладнання. Нині пивоварна галузь України характеризується значною кількістю малих крафтових виробництв, які створюють конкуренцію між малими і середніми підприємствами.*

*Сьогодні українські виробники пива стикаються з низкою серйозних викликів. Однією з найгостріших є сировинна проблема — нестача вітчизняних спеціальних солодів, які майже не виробляються в Україні, а також необхідність імпорту різнопрофільного хмелю. Саме хміль є найдорожчим компонентом сировинної бази пивоварної галузі.*

*Дослідження фізико-хімічних і органолептичних властивостей вітчизняного і закордонного хмелю є перспективним напрямом у пивоварінні, особливо з огляду на зростаючу популярність сортів пива, виготовлених із застосуванням технології холодного охмелення.*

*Для порівняння якісних показників хмелю та проведення процесу охмелення пивного суслу були обрані такі дослідні сорти хмелю: українського виробництва — Альта (гіркий) і Шпальт Селект (ароматичний), зарубіжного — Herkules (гіркий) і Hallertau Tradition (ароматичний). Досліджено, що вітчизняні сорти хмелю за вмістом  $\alpha$ -кислот не відрізняються від закордонних аналогів, а показник гіркоти дослідних проб пивного суслу відрізняється на 1,4 одиниці IBU. Встановлено, що закордонні сорти хмелю доцільно використовувати для виробництва пива з більш вираженою інтенсивною гіркотою, а для отримання більш м'якого, збалансованого смакового профілю пива доцільно використовувати вітчизняні сорти. Їх аналіз свідчить про високу якість і відповідність вимогам міжнародних стандартів. Використання вітчизняного хмелю у пивоварінні дасть змогу підвищити ефективність виробництва хмелю в Україні.*

**Ключові слова:** пиво, солод, пивне сусло, кип'ятіння, бродіння, хміль, гіркота, аромат, смак,  $\alpha$ - і  $\beta$ -кислоти, ефірні олії.

**Постановка проблеми.** Однією з ключових проблем сучасної пивоварної галузі є поступове витіснення вітчизняних виробників хмелю закордонною продукцією. Значна частина крафтових пивоварень віддає перевагу закордонним сортам хмелю, оскільки вони характеризуються більш широким спектром смакових і ароматичних властивостей, що надають пиву виразності та індивідуальності. Водночас у технології пивоваріння хміль є одним з основних і найдорожчих компонентів, який визначає повноту, гіркоту та аромат пива.

Понад 90% світового врожаю хмелю використовується у виробництві пива, тому стабільність пивоварної галузі безпосередньо впливає на стан хмелярства (Pryimachuk та ін., 2021). В Україні лише незначна частина хмелю має вітчизняне походження, тоді як більшість обсягів закордонного виробництва. Така ситуація зумовлена домінуванням на ринку іноземних компаній, що використовують власну сировину, а також наявністю низки технологічних, економічних і організаційних проблем у сфері вітчизняного хмелярства (Yablonska, & Malatskovska, 2014).

Попри наявність наукових досліджень, присвячених питанням розвитку хмелярства, аналізу стану ринку та підвищенню ефективності виробництва швидкі темпи розвитку сучасного пивоваріння актуалізують потребу у подальшому вивченні властивостей вітчизняних і закордонних сортів хмелю, а також визначенні їхнього впливу на якість готового пива.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Висвітленню стану світового та вітчизняного ринків хмелю, підвищенню економічної ефективності його функціонування, дослідженню сучасних проблем хмелевої галузі присвячені праці багатьох вітчизняних науковців. (Ляшенко, 2002; Проценко, Сітнікова, & Приймачук, 2015).

Ароматичні сорти мають приємний хмелевий аромат, низький вміст когумулону (до 20%) і високий вміст ароматичних компонентів (каріофілену, фернезону). Попри невисокий вміст  $\alpha$ -кислот (2,5...5,0%) вони є досить коштовними. Найпоширеніші закордонні ароматичні сорти: Herbrucker, Perle, Hallertauer Tradition, Spalter Select та ін. (Рудик, Проценко, & Свірчевська, 2013; Рудик, Проценко, & Пасічник, 2014).

Гіркі сорти характеризуються високим вмістом  $\alpha$ -кислот (10...18%) і когумулону (понад 25%). До них належать Hallertauer Magnum, Nugget, Taurus, Northern Brewer, Brewers Gold (Проценко та ін., 2017).

В Україні хміль поділяють на гіркий, ароматичний і тонкоароматичний. До гірких сортів належать Поліський, Альта, Промінь, Оболонський, до ароматичних — Заграва, Гайдамацький, Староволинський, до тонкоароматичних — Клон 18, Національний, Слов'янка, Злато Полісся (Проценко, 2017).

Уже на ранніх стадіях розвитку хмелю формуються  $\beta$ -кислоти з незначною гіркотою, які під час дозрівання частково перетворюються на більш гіркі  $\alpha$ -кислоти. Інтенсивність цього процесу залежить від погодних умов: спека і посуха гальмують, а прохолода та вологість сприяють утворенню  $\alpha$ -кислот.

Основними сполуками, що формують гіркоту пива, є  $\alpha$ -кислоти (гумулони). Однак когумулон надає неприємної різкої гіркоти, тому при селекції прагнуть зменшити його вміст (Проценко, Рудик, & Власенко, 2016). Під час кип'ятіння суслу  $\alpha$ -кислоти ізомеризуються в ізо- $\alpha$ -кислоти, які розчиняються і забезпечують гіркоту готового пива. Вони також підвищують стійкість піни і частково пригнічують мікрофлору, хоча їхня антимікробна дія обмежена. Нестійкі  $\alpha$ -кислоти під дією кисню, тепла та вологи розкладаються. За температури 18 °C за два місяці втрачається до 25%  $\alpha$ -кислот, тому хміль слід зберігати в холоді, сухості та без доступу повітря (Oladokun та ін., 2017).

Подальше розкладання  $\alpha$ - і  $\beta$ -кислот призводить до утворення твердих смол, що не мають цінності, та валеріанової кислоти, яка зумовлює запах старого хмелю. Водночас у твердих смолах міститься ксантогумол — сполука з потенційними антионкологічними властивостями, виявлена також у гранулах хмелю та пиві, хоча її вміст незначний.

Найважливішим показником якості та цінності хмелю є вміст  $\alpha$ -кислот, тому селекція спрямована на виведення сортів із високою гіркотою. Нині з'являються сорти, що містять 12...15%  $\alpha$ -кислот при вмісті когумулону менше 25%. Хміль також містить 0,5...1,2% ефірної олії, до складу якої входить понад 200 летких сполук, відповідальних за його характерний аромат, що формується під час дозрівання разом із лупуліном (Krofta та ін., 2022).

Ефірна олія хмелю — це прозора масляниста рідина з інтенсивним ароматом і без гіркоти. Вона добре розчиняється в ефірах, але майже нерозчинна у воді (1:20000). Її густина становить 0,88 г/см<sup>3</sup>. Олія летка вже при кімнатній температурі, внаслідок чого хміль втрачає аромат і клейкість. Компоненти ефірної олії поділяють на дві фракції: вуглеводневу (20—40%) та кисневмісну, більшу частину якої складають три основні сполуки — мірцен (монотерпеноїд), каріофілени, гумулені (сесквітерпеноїди) (Protsenko та ін., 2018). Мірцен надає пиву грубий, неблагородний відтінок, тому його надмірна кількість небажана. Ця сполука легко окислюється і полімеризується, утворюючи смолисті речовини з різким запахом старого хмелю. Мірцен нерозчинний у спиртах і вуглеводнях.

У технології хмелярства та пивоваріння враховують кореляційні залежності між вмістом у хмелі гумулону та когумулону ( $\alpha$ -кислоти) і, відповідно, гумулену та мірцену (ефірної олії). Саме гумулен, мірцен і каріофілен формують до 90% аромату вуглеводневої фракції, частка якої становить близько 31% від загального аромату хмелю. Попри те, що основні компоненти ефірної олії хмелю мають точку кипіння вище 100 °С, під час кип'ятіння сусла вони випаровуються разом із водною парою. За 90 хв кип'ятіння втрачається до 85% ефірної олії. Щоб зберегти частину аромату, частину хмелю додають наприкінці кип'ятіння, однак при цьому зменшується кількість ізомеризованих  $\alpha$ -кислот. Саме тому виводять ароматичні сорти хмелю з тонким ароматом і підвищеним вмістом гумулену та фарнезену (Klimczak, Cioch-Skoneczny, & Duda-Chodak, 2023).

У готовому пиві присутні продукти окиснення компонентів ефірної олії хмелю. Ці сполуки є важколеткими та водорозчинними, тому залишаються в суслі й лише частково сорбуються дріжджами. До них належать, зокрема, епоксиди каріофілену та гумулену — продукти окиснення сесквітерпенів.

Найпоширенішими хмелепродуктами є гранульований хміль, який дозволяє краще зберігати цінні компоненти. Для цього шишки розмелюють і пресують у гранули. Розрізняють три типи гранул — тип 90, тип 45 та ізомеризовані гранули. Останні отримують шляхом ізомеризації  $\alpha$ -кислот з додаванням оксиду магнію, що забезпечує вищий вихід  $\alpha$ -кислот, скорочення часу кип'ятіння та зменшення енерговитрат.

Одним із ключових етапів у виробництві пива є охмелення сусла — процес переходу хмельових речовин у сусло. Більшість цінних компонентів хмелю мають обмежену розчинність, а ефірна олія майже не розчиняється у водному середовищі. Під час кип'ятіння сусла з хмелем (1—2 год) відбуваються важливі фізико-хімічні перетворення, які визначають якість пива: у сусло переходять гіркі та ароматичні сполуки, а білки коагулюють. Процес здійснюють у суслотварильних апаратах, в яких забезпечують інтенсивне кипіння й отримують гаряче охмелене сусло — основу майбутнього пива (Lutz, & Forster, 2007; Rutnik, Ocvirk, & Košir, 2023).

Під час кип'ятіння суслу з хмелем відбуваються такі основні процеси (Роздобудько, & Хіврич, 2014):

- розщеплення та перетворення хмельових компонентів;
- коагуляція білків і дубильних речовин;
- випаровування надлишкової води і небажаних летких сполук;
- стерилізація суслу та руйнування ферментів;
- підвищення кольоровості й утворення редукуючих речовин;
- зміна вмісту диметилсульфіду (ДМС);
- ізомеризація гірких  $\alpha$ -кислот.

Гіркі речовини хмелю мають низьку розчинність і частково видаляються із суслу разом із білково-дубильними комплексами, тому їх використання невисоке. Під час кип'ятіння  $\alpha$ -кислоти гумулони ізомеризуються в ізо- $\alpha$ -кислоти — ізогумулон, ізокогумулон та ізоадгумулон, які формують основну гіркоту пива. Ізолупулон та його аналоги на ступінь гіркоти впливають слабше (De Clippeleer, Aerts, & Cooman, 2014). Ефективність використання гірких речовин залежить від складу кислот, дози хмелю, ступеня ізомеризації, тривалості та інтенсивності кип'ятіння, рН і втрат при фільтрації.

Окрім традиційного охмелення, застосовують сухе (пізнє) охмелення, коли хміль додають наприкінці кип'ятіння або після нього. Такий спосіб забезпечує більш стабільний і насичений аромат, оскільки зменшується випаровування ефірних олій. Виділяють три форми сухого охмелення (Кошова, Мукоїд, & Василів, 2018; Titus та ін., 2021; Oladokun та ін., 2017):

- під час первинного бродіння (малоефективне через втрату частини ароматичних речовин разом із  $\text{CO}_2$ );
- під час вторинного бродіння (оптимальний варіант для збереження аромату і чистоти процесу);
- у готове пиво, хоча надто тривалий контакт може спричинити появу трав'яних чи маслянистих нот.

Для сухого охмелення використовують ароматичні сорти хмелю з низьким вмістом  $\alpha$ -кислот (не більше 6%) і високим вмістом ефірних олій. Найчастіше застосовують сорти Chinook і Columbus (Lafontaine, & Shellhammer, 2018).

**Метою дослідження** є порівняльна оцінка вітчизняних і закордонних сортів хмелю за вмістом  $\alpha$ -кислот та показниками гіркоти, визначення їх технологічної придатності у пивоварінні та обґрунтування перспектив використання українських сортів для виробництва пива.

**Матеріали і методи.** Аналітичні, хімічні, фізико-хімічні з використанням приладів і методик досліджень якості пива згідно з ДСТУ 3888-2015.

Під час експериментальних досліджень використовували мініпивоварню Solodok-30, ваги OHAUS SPX2201, спектрофотометр ULAB 102UV, рефрактометр VAL7 ULAB, термометр електронний Checktemp C Hanna Ist.

**Викладення основних результатів дослідження.** Якість пива значною мірою залежить від якості основної сировини — води, солоду, хмелю та дріжджів. Пивне сусло виготовлялося в умовах міні-пивоварні Solodok за рецептурою: 94,0% солоду Munich I; 4,3% — Caramunich I, 1,7% — Biscuit Malt. Характеристика солоду, з якого виготовлялося сусло, наведена в табл. 1.

*Таблиця 1. Фізико-хімічні показники дослідного пивного сусла*

П/н №	Показник	Результат
1.	Кольорність, см <sup>3</sup> розчину йоду концентрацією 0,1 моль/дм <sup>3</sup> на 100 см <sup>3</sup> води	2,0
2.	Кислотність, см <sup>3</sup> розчину NaOH концентрацією 1 моль/дм <sup>3</sup> на 100 см <sup>3</sup> сусла	1,1
3.	Вміст сухих речовин, %	13,5
4.	Повнота оцукрення	Повне

Для охмелення сусла використовували вітчизняні сорти хмелю — Альта та Шпальт Селект, а також зарубіжні сорти – Herkules і Hallertauer Tradition. На першому етапі досліджень сусло кип'ятили окремо з кожним сортом для порівняння їхнього впливу на гіркоту пива.

На другому етапі застосовували комбінацію гіркою та ароматичною сортів хмелю. Кип'ятіння тривало 60 хв: спочатку в сусло додавали гіркий хміль (вітчизняний сорт Альта, закордонний сорт Herkules), а через 40 хв — ароматичні сорти (Шпальт Селект і Hallertau Tradition). Показники якості дослідних зразків хмелю наведені в табл. 2.

*Таблиця 2. Показники якості дослідних сортів хмелю*

П/н №	Назва показника	Сорт хмелю			
		гіркий		ароматичний	
		Альта	Herkules	Шпальт Селект	Hallertau Tradition
1.	Вміст $\alpha$ -кислот, %	11,8	12,0	5,3	6,0
2.	Вміст $\beta$ -кислот, %	4,8	4,7	3,2	4,5
3.	Когулулон у складі $\alpha$ -кислот, %	25	33,3	24,3	27,2
4.	Когулулон у складі $\beta$ -кислот, %	46,7	54,0	42,9	47,4
5.	Індекс окислення	0,38	0,37	0,41	0,43

Із табл. 2 можна зробити висновки, що гіркі сорти (Альта і Herkules) переважно підходять для додання гіркоти пиву завдяки високому вмісту  $\alpha$ -кислот і когулулону. Ароматичні сорти (Шпальт Селект, Hallertau Tradition) більше орієнтовані на ароматичний профіль, мають нижчий вміст  $\alpha$ -кислот і трохи вищий індекс окислення, що варто враховувати при використанні у виробництві. Сорт Herkules виділяється серед гірких сортів найвищими показниками за вмістом  $\alpha$ ,  $\beta$ -кислот та когулулону, що робить його особливо інтенсивним для гіркоти.

Наступним етапом дослідження був підбір кількості хмелю для додавання його в пивне сусло. Кількість хмелю підбиралася для охмелення 2,50 дм<sup>3</sup> сусла. В табл. 3 наведено кількість і варіанти задавання хмелю. Після завершення процесу кип'ятіння проводили дослідження динаміки гіркоти пивного сусла залежно від кількості внесеного хмелю. Для порівняння впливу різних сортів хмелю на процес охмелення здійснювали за однакових умов та кількості хмелю. Результати досліджень наведені на рис. 1.

Таблиця 3. Кількість хмелю, які використовувалися для охмелення пивного сусла

Номер зразка	Кількість хмелю, г	
	Альта/ Herkules (гіркі сорти)	Шпальт Селект / Hallertau Tradition (ароматичні сорти)
Зразок № 1	1,0	2,4
Зразок № 2	1,2	2,6
Зразок № 3	1,4	2,8
Зразок № 4	1,6	3,0

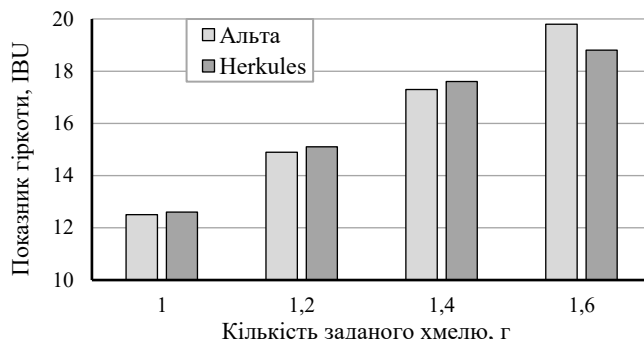


Рис. 1. Динаміка гіркоти пивного сусла при охмеленні гіркими сортами хмелю

Із рис. 1 видно, що в разі внесення невеликої дози (1 г) у сусло дослідних сортів гіркої хмелю Альта і Herkules різниця в гіркоті сусла не відчувалась. Починаючи з 1,2 г і вище, внесення хмелю сорту Herkules призводило до підвищення показника гіркоти порівняно із сортом Альта. Це пояснюється більшим вмістом у ньому  $\alpha$ -кислот (12,0% проти 11,8%). Однак при максимальній дозі (1,6 г) при внесенні хмелю сорту Альта в суслі досягався вищий рівень гіркоти (19,8 IBU порівняно з Herkules 18,8 IBU). Це може бути наслідком різниці у складі когумулонів або технологічних особливостей ізомеризації  $\alpha$ -кислот.

На наступному етапі досліджень здійснювали охмелення сусла ароматичними сортами хмелю різного походження — вітчизняного та закордонного виробництва. Результати досліджень наведено на рис. 2.

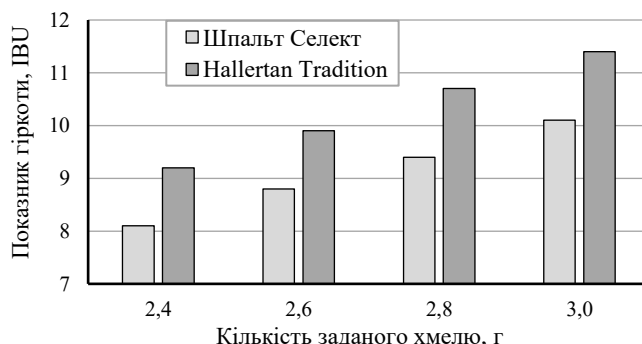


Рис. 2. Динаміка гіркоти пивного сусла при охмеленні ароматичними сортами хмелю

Із рис. 2 видно, що на всіх етапах дозування внесення в сусло хмелю сорту Hallertau Tradition дозволяло досягти вищого показника гіркоти порівняно зі Шпальт Селект. Наприклад, при дозі 2,4 г гіркота становила близько 9,2 IBU для сорту Hallertau Tradition і лише 8,1 IBU для сорту Шпальт Селект, а при 3,0 г — відповідно 11,4 проти 10,1 IBU. Це пояснюється вищим вмістом  $\alpha$ -кислот у хмелі сорту Hallertau Tradition (6,0%), ніж у Шпальт Селект (5,3%), що забезпечувало більш ефективну ізомеризацію гірких речовин під час кип'ятіння сусла. У разі збільшення дозування дослідних сортів хмелю спостерігалось майже лінійне зростання показника IBU, що свідчило про стабільне екстрагування  $\alpha$ -кислот у процесі кип'ятіння сусла.

На наступному етапі дослідження ефективності охмелення пивного сусла здійснювали шляхом поєднання ароматичних і гірких сортів хмелю вітчизняних та закордонних сортів хмелю, які представлено в табл. 5.

Досліджено, що при всіх рівнях дозування використання закордонних сортів гіркого і ароматичного сортів Herkules та Hallertauer Tradition дозволяло досягати вищих показників гіркоти порівняно з вітчизняними сортами Альта і Шпальт Селект.

*Таблиця 5. Порівняльна характеристика показників гіркоти пивного сусла у разі його охмелення вітчизняними і закордонними сортами хмелю*

П/н №	Вітчизняні сорти хмелю			Закордонні сорти хмелю		
	Альта (гіркий)	Шпальт Селект (ароматичний)	Показник гіркоти, IBU	Herkules (гіркий)	Hallertauer Tradition (ароматичний)	Показник гіркоти, IBU
1.	1,0	2,4	20,5	1,0	2,4	21,8
2.	1,2	2,6	23,6	1,2	2,6	25,0
3.	1,4	2,8	26,8	1,4	2,8	28,3
4.	1,6	3,0	29,9	1,6	3,0	31,6

Так, при найменшій дозі внесення хмелю (1,0+2,4 г) у разі використання вітчизняних сортів показник гіркоти пивного сусла становив 20,5 IBU, а в разі використання зарубіжних сортів — 21,8 IBU. При максимальній дозі (1,6+3,0 г) — 29,9 IBU та 31,6 IBU відповідно.

Вищі значення IBU сусла при використанні зарубіжних сортів Herkules і Hallertauer Tradition свідчать про більшу концентрацію та кращу ізомеризацію  $\alpha$ -кислот у суслі, що робить їх більш ефективними для надання пиву хмелевої гіркоти (Kimura, Tadashi, Hirofumi, & Masahiro, 2021). Тому закордонні сорти хмелю Herkules і Hallertauer Tradition демонструють вищу гіркоту порівняно з вітчизняними Альта і Шпальт Селект при однакових дозах і в однакових умовах. Це свідчить про їхню більшу технологічну ефективність і потенціал для виробництва пива з вираженою, інтенсивною гіркотою. Водночас вітчизняні сорти доцільно використовувати для отримання більш м'якого і збалансованого смакового профілю.

## **Висновки**

1. Встановлено, що вміст  $\alpha$ -кислот у вітчизняних сортах хмелю практично не відрізняється від закордонних аналогів. Зокрема, для гірких сортів цей показник

становить: Альта — 11,8%, Herkules — 12,0%, а для ароматичних — Шпальт Селект — 5,3% та Hallertau Tradition — 6,0%.

2. Досліджено, що в однакових умовах (кількість заданого хмелю і час кип'ятіння) динаміка гіркоти пивного сусла, отриманого шляхом його кип'ятіння з вітчизняними і зарубіжними сортами хмелю, була ідентичною, але в разі внесення у сусло хмелю в кількості 0,16 г на 2,50 дм<sup>3</sup> при використанні вітчизняного сорту Альта в суслі досягався вищий рівень гіркоти (19,8 IBU) порівняно із зарубіжним сортом Herkules (18,8 IBU).

3. Показник гіркоти дослідних проб пивного сусла, отриманих при охмеленні сумішшю вітчизняних сортів хмелю Альта і Шпальт Селект та зарубіжних Herkules і Hallertau Tradition, у середньому відрізняється на 1,4 одиниці IBU.

4. Дослідні закордонні сорти хмелю Herkules і Hallertauer Tradition доцільно використовувати для виробництва пива з більш вираженою інтенсивною гіркотою. Для отримання більш м'якого, збалансованого смакового профілю пива доцільно використовувати вітчизняні сорти Альта і Шпальт Селект.

5. Аналіз отриманих результатів свідчить про високу якість вітчизняних сортів хмелю та їх відповідність вимогам міжнародних стандартів. Використання вітчизняного хмелю у пивоварінні дасть змогу підвищити ефективність виробництва хмелю в Україні.

### Література

Кошова, В. М., Мукоїд, Р. М., Бондаренко, А. Д. (2018). Холодне охмелення пива. *Новітні технології. Збірник наукових праць*, 2(6), 115—121. <https://doi.org/10.31180/2524-0102/2018.2.06>.

Ляшенко, Н. И. (2002). *Биохимия хмеля и хмелепродуктов*. Житомир: Полісся.

Проценко, Л. В., Сітнікова, Т. Ю., Приймачук, Т. Ю. (2015). Формування науково-виробничого регіонального хмелярського кластера. *Вісник аграрної науки*, 6, 67—72. [https://agrovisnyk.com/pdf/ua\\_2015\\_06\\_14.pdf](https://agrovisnyk.com/pdf/ua_2015_06_14.pdf).

Рудик, Р. І., Проценко, Л. В., Пасічник І. О. (2014). Чи має перспективу український хміль? *Зерно і хліб*, 2, 67—70.

Проценко, Л. В., Рудик Р. І., Ляшенко, М. І., Штанько, І. П., Цибульський, В. О., Черненко, О. В., Гринюк, Т. П., Власенко, А. С. (2017). *Атлас українських сортів хмелю*. Інститут сільськогосподарства Полісся НААН: О. О. Євнюк.

Проценко, Л. В., Рудик, Р. І., Михайлов, Н. Г., Черненко, Е. В., Гринюк, Т. П., Власенко, А. С. (2016). Технологічна оцінка гранул хмелю українського і закордонного виробництва. *Агропромислове виробництво Полісся*, 8, 72—77.

Роздобудько, Б. В., Хіврич, Б. І. (2014). Технологічні і технічні аспекти утворення диметилсульфіду в пиві. *Наукові праці НУХТ*, 20(1), 181—187. <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/19429>.

Рудик, Р. І., Проценко, О. В., Свірчевська, О. В. (2013). Високопродуктивні сорти — основа інноваційного розвитку галузі хмелярства. *Вісник аграрної науки*, 4, 63—66. [https://agrovisnyk.com/oldpdf/visnyk\\_04\\_2013.pdf](https://agrovisnyk.com/oldpdf/visnyk_04_2013.pdf).

De Clippeleer, J., Aerts, G., & De Cooman, L. (2014). Beer's bitter compounds — A detailed review on iso- $\alpha$ -acids: Current knowledge of the mechanisms for their formation and degradation. *Brewing Science*, 67(11/12), 167—182. <https://brewingscience.de/index.php/brewingscience/article/view/377>.

Klimczak, K., Cioch-Skoneczny, M., Duda-Chodak, A. (2023). Effects of Dry-Hopping on Beer Chemistry and Sensory Properties — A Review. *Molecules*, 28(18):6648. <https://doi.org/10.3390/molecules28186648>.

- Kimura, M., Tadashi, I., Hirofumi, S., Masahiro, H. (2021). Theoretical study on isomerization of  $\alpha$ -acids: A DFT calculation. *Fod Chemistry*, 364(1), 130418. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130418>.
- Krofta, K., Fritschová, G., Mikyška, A., Belešová, K., Vojtěchová, D., Tichá, J. (2022). Alpha acids content in Czech hops from harvest 2021 — forecasts, reality and trends. *Kvasny Prumysl*, 68(1), 564—571. <https://doi.org/10.18832/kp2022.68.564>.
- Lafontaine, S. R., Shellhammer, T. H. (2018). Impact of static dry-hopping rate on the sensory and analytical profiles of beer. *J. Inst. Brew.*, 124, 434—442. <https://doi.org/10.1002/jib.517>.
- Lutz, A., Forster, A. (2007). Influences of the new high alpha hop variety Herkules on beer quality. *Proceedings of the 31st EBC Congress, Venice. Nuremberg: Fachverlag Hans Carl*, 145—152.
- Oladokun, O., James, S., Cowley, T., Smart, K., Hort, J., & Cook, D. (2017). Dry-Hopping: the Effects of Temperature and Hop Variety on the Bittering Profiles and Properties of Resultant Beers. *Brewing Science*, 70(11/12), 187—196. <https://doi.org/10.23763/BrSc17-18oladokun>.
- Protsenko, L., Rudyk, R., Hryniuk, T., Vlasenko, A., Protsenko, A., Litvynchuk, S., Ovadenko, O. (2018). Beer enrichment with biologically active hop compounds. *Ukrainian Food Journal*, 7(1), 65—78. <https://doi.org/10.15407/agrisp5.02.052>.
- Prymachuk, T. Iu., Ratoshniuk, T. M., Shtanko, T. A., Sitnikova, T. Iu., Protsenko, A. V. (2014). Cooperation of Humiculture and Brewing: World and Domestic Perspective. *Bulletin of the Agrarian Science of the Black Sea Region*, 2(78), 72 —79. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201804-10>.
- Rutnik, K., Ocvirk, M., & Košir, I. J. (2023). The Impact of Hop Freshness on Kettle-Hopped Beers. *Foods*, 12(23), 4353. <https://doi.org/10.3390/foods12234353>.
- Titus, B. M., Lemo, L. A., Beaver, J. W., Byrnes, N. K., Heymann, H., & Oberholster, A. (2021). Impact of Dry Hopping on Beer Flavor Stability. *Foods*, 10(6), 1264. <https://doi.org/10.3390/foods10061264>.
- Yablonska, N., Malatskovska, O. (2014). Modern tendencies and problems of development of the beer market of Ukraine. *Scientific Herald of the Odessa National Economic University*, 8(216), 220—228.

УДК 577.122.2

## USE OF CASEIN FRACTIONS TO CHARACTERIZE PROTEINASES OF LACTOCOCCI *L. LACTIS* SSP. *LACTIS*

V. Yukalo, O. Krupa, M. Solopa

*Ternopil Ivan Puluj National Technical University*

---

**Key words:**

*Lactococci*  
*Cell-envelope proteinases*  
*Proteinase type*  
*Casein substrates*

---

**Article history:**

Received 12.03.2025  
Received in revised form  
23.03.2025  
Accepted 13.10.2025

---

**Corresponding author:**

V. Yukalo  
**E-mail:**  
cmakota@ukr.net

**Citation:** Юкало В. Г., Крупа О. М., Солопа М. Р. (2025). Дослідження казеїнових фракцій для характеристики протеїназ лактококів *L. lactis* ssp. *lactis*. *Наукові праці НУХТ*, 31(5), 196—205.  
DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-5-16

**ABSTRACT**

---

The initial proteolysis of proteins, induced by cell-envelope-associated proteinases (CEPs) of lactococci, is crucial for their growth in milk. These proteinases are also responsible for influencing the sensory and rheological properties of dairy products, as well as for the formation of numerous flavor and bioactive peptides. In particular, proteolysis actively occurs in the production of fermented milk products (kefir, koumiss, cottage cheese, etc.) and very intensively — in the production of hard cheeses, during the aging of which there are biochemical changes in milk proteins. It is known that cell-envelope proteinases can be classified into two types (P I and P III), which differ in their specificity toward various casein fractions and, consequently, in their impact on sensory characteristics and peptide generation. Therefore, the aim of this study was to improve the method for determining the type of cell-envelope proteinases in proteinase-positive lactococcal strains using homogeneous casein substrates, isolated in a single stage under conditions that preserved their native structure.

Skimmed milk with an acidity of 18°T was obtained at PJSC "Ternopil Dairy Plant". Casein gel filtration was carried out on Sephadex G-150 using the chromatographic column of a "Reanal" liquid chromatography system. Micro-preparative and analytical electrophoresis of casein substrates and their proteolysis products were performed in polyacrylamide gel plates using a Stadler-type apparatus.

Based on the studied proteolytic properties, lactic acid production capacity, and NaCl resistance, three strains were selected for determining the type of their cell-envelope proteinases. The identification of proteinase types was conducted in a model system by incubating (3 hours, 30 °C) the biomass of each strain with each casein substrate. Unhydrolyzed casein substrates were isolated from the incubation mixture and analyzed by electrophoresis. As a result of proteolysis specificity, it was found that two strains possessed a P I-type cell-envelope proteinase, while one strain contained a P III-type enzyme.

---

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-5-16

---

## ДОСЛІДЖЕННЯ КАЗЕЇНОВИХ ФРАКЦІЙ ДЛЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОТЕЇНАЗ ЛАКТОКОКІВ *L. LACTIS SSP. LACTIS*

В. Г. Юкало, О. М. Крупа, М. Р. Солопа

*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя*

*Початковий протеоліз білків, спричинений приклітинними протеїназами лактококів, є визначальним для їх росту в молоці. Також ці протеїнази відповідають за вплив на органолептичні та реологічні властивості молочних продуктів й утворення численних смакових і біоактивних пептидів. Зокрема, протеоліз активно відбувається під час виробництва кисломолочних продуктів (кефір, кумис, сир кисломолочний тощо) і особливо інтенсивно — при виробництві твердих сирів, в основі визрівання яких є біохімічні зміни білків молока. Відомо, що приклітинні протеїнази можуть бути двох типів (РІ і РІІІ), які відрізняються між собою за специфічністю дії на різні казеїнові фракції і, відповідно, на формування органолептичних властивостей й утворення пептидів, тому метою дослідження є вдосконалення методу визначення типу приклітинних протеїназ у протеїназа-позитивних штамів лактококів з використанням гомогенних казеїнових субстратів, виділених одностадійно в умовах збереження їх структури.*

*Знежирене молоко кислотністю у 18° Т отримували на ПрАТ «Тернопільський молокозавод». Гель-фільтрацію казеїну проводили на сефадексі G-150 на колонії хроматографічної системи для рідинної хроматографії фірми «Reanal». Мікропрепаративний та аналітичний електрофорез казеїнових субстратів і продуктів їх протеолізу проводили у пластинках поліакриламідного гелю на апараті типу Стадієра.*

*На основі досліджених протеолітичних властивостей, здатності утворювати молочну кислоту і стійкості до NaCl було відібрано три штами для визначення типу їх приклітинних протеїназ. Визначення типу протеїназ проводили в модельній системі шляхом інкубування (3 год, 30 °C) біомаси кожного штаму з кожним казеїновим субстратом. Нерозцуплений казеїновий субстрат виділяли з інкубаційної суміші і досліджували за допомогою електрофорезу. У результаті за специфікою протеолізу було встановлено, що два штами мають приклітинну протеїназу РІ типу і один штаму — РІІІ типу.*

**Ключові слова:** *лактококи, приклітинні протеїнази, тип протеїнази, казеїнові субстрати.*

**Постановка проблеми.** Протеолітичні процеси відіграють важливу роль у формуванні органолептичних і реологічних властивостей молочних продуктів, а також в утворенні в них багатьох біоактивних пептидів (Zhang, Zhang, & Han, 2015; Yukalo, & Krupa, 2017; Юкало, 2021). Насамперед це стосується продуктів з великим ступенем протеолізу — твердих сичужних сирів (Solieri et al., 2022). Протеоліз у сичужних сирах спричиняється молокозгортальними препаратами, протеазами молока і протеолітичними системами лактобактерій. Останній вид протеолізу

є найбільш варіабельний і потребує постійного контролю. Специфічність протеолізу залежить від складу протеаз, а також від структури і властивостей субстрату. Проблема полягає в тому, щоб субстрат (білки молока) під час контролю специфічності дії протеаз лактобактерій мав нативну структуру. У науковій літературі описані методи виділення білків молока в нативних умовах (Yukalo, & Storozh, 2018; Yukalo, Datsyshyn, Krupa, & Storozh, 2024), тому їх використання для встановлення специфічності дії протеаз лактобактерій є актуальним.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** За сучасними уявленнями, протеолітична система лактобактерій — це складний комплекс протеолітичних ферментів різної локалізації, який здатний розщеплювати білки молока до амінокислот (Zhang, Zhang, & Han, 2015; Kieliszek, Pobiega, & Kot, 2021). Співвідношення і активність різних протеаз може сильно варіювати у межах одного виду або підвиду бактерій. Відносно стабільним цей показник є для певного штаму лактобактерій (Brown et al., 2017; Юкало, 2007). Ферменти протеолітичної системи можуть локалізуватися на поверхні клітини бактерії (приклітинні протеїнази), у мембрані та всередині клітини (Liu, & Siezen, 2010). Важливе значення для формування реологічних і органолептичних властивостей, а також утворення біоактивних пептидів мають приклітинні протеїнази, які скорочено позначають PrtP (Pericellular Protease) (Børsting et al., 2015). Характеристика досліджених приклітинних протеїназ у лактококів виду *Lactococcus lactis* наведена в табл. 1.

Таблиця 1. Властивості приклітинних протеїназ окремих штамів лактококів, адаптовано за (Yukalo, & Krupa, 2017)

Штами лактококів	Молекулярна маса*, кДа	Субстрат, який розщеплює протеїназа	pH оптимум
<i>L. lactis</i> ssp. <i>cremoris</i> WG2		κ-, β-каїзени	
<i>L. lactis</i> ssp. <i>cremoris</i> HP		κ-, β-каїзени	6,4
<i>L. lactis</i> ssp. <i>cremoris</i> SKII	187 <sup>n</sup>	α <sub>S1</sub> -, κ-, β-казеїни	
<i>L. lactis</i> ssp. <i>cremoris</i> AC1		α <sub>S1</sub> -, κ-, β-казеїни	
<i>L. lactis</i> ssp. <i>cremoris</i> AM1		α <sub>S1</sub> -, κ-, β-казеїни	
<i>L. lactis</i> ssp. <i>cremoris</i> H2	180 <sup>e</sup>	κ-, β-каїзени	6,0
<i>L. lactis</i> ssp. <i>cremoris</i> NCD0763		α <sub>S1</sub> -, κ-, β-казеїни	

Приклітинні протеїнази — це мономерні ферменти. За механізмом дії вони відносяться до серинових протеїназ, а за первинною структурою подібні до субтилізинів (Børsting et al., 2015; Broadbent, & Steele, 2013; Savijoki, Ingmer, & Varmanen, 2006). За відсутності іонів кальцію приклітинні протеїнази можуть від'єднуватися з клітин бактерій у навколишнє середовище. Також для них характерна широка субстратна специфічність (Bragason, Svendsen, & Hansen, 2020; Hansen, & Marcantili, 2020). Більшість продуктів їх протеолітичної дії на основні білки молока — це пептиди, що складаються з 4—8 амінокислотних залишків (Yukalo, & Krupa, 2017).

Важливим є те, що PrtP відрізняються за специфічністю дії на рівні казеїнових фракцій (Børsting et al., 2015). За цією ознакою розрізняють два типи PrtP — PrtP I та PrtP III або скорочено P I та P III відповідно (Juillard, Laan, & Kunji, 1995; Visser et al, 1994).

Виявлено, що Р I активно гідролізують  $\beta$ -казеїн і мало гідралізують  $\alpha_{S1}$ - і  $\alpha$ -казеїни. Р III однаково активно гідролізують усі ці фракції казеїну. Визначення типу протеїназ у лактобактерій є важливим у зв'язку з тим, що вони по-різному впливають на органолептичні та реологічні показники (Zhang, Zhang, & Han 2015), а також на утворення біоактивних пептидів (Nagpal, 2011; Algason, Miranda le Bar, & Monet, 2004).

Тип PrtP можна визначити модельним протеолізом за участі клітин лактобактерій, вирощених в умовах збереження складу їх PrtP (Юкало, 2007). Як субстрат при цьому використовували гомогенні фракції казеїнів або нативні міцели казеїну. У першому випадку при багатостадійному виділенні гомогенних казеїнових фракцій відбувається їх денатурація, що відображається на специфічності протеолізу. При використанні нативних міцел казеїну важко однозначно встановити специфічність PrtP у зв'язку з великою кількістю продуктів з подібними електрофоретичними і хроматографічними властивостями, тому перспективним для вирішення цього завдання може бути використання як субстратів казеїнових фракцій, виділених одностадійним методом у нативних умовах.

**Метою дослідження** є вдосконалення методу визначення типу приклітинних протеїназ у протеїназа-позитивних штамів лактококів з використанням гомогенних казеїнових субстратів, виділених одностадійно в умовах збереження їхньої структури.

**Матеріали і методи.** Для вирощування штамів лактококів і виділення казеїнових субстратів використовували знежирене молоко, кислотністю у  $18^{\circ}$  Т, яке отримували на ПрАТ «Тернопільський молокозавод». Загальний казеїн отримували ізоелектричним осадженням 1Н НСІ із знежиреного молока. Осад відділяли центрифугуванням впродовж 15 хв при 3000 об/хв на центрифугі ОПН-8.

Для досліджень використані штами I<sub>2</sub>, I<sub>3</sub>, I<sub>4</sub>, I<sub>5</sub>, I<sub>8</sub>, I<sub>11</sub>, I<sub>13</sub>, I<sub>19</sub>, I<sub>21</sub> підвиду *Lactococcus lactis* ssp. *lactis*, які були отримані з Інституту харчування Каунівського технологічного університету (KTU Food Institute).

Загальну протеолітичну активність, кислотоутворюючу активність, а також стійкість до NaCl штамів лактококів визначали як описано в (Юкало, 2007).

Отримання біомаси штамів в умовах збереження складу та активності приклітинних протеїназ проводили як описано в (Юкало, 2007).

Стійкість лактококів до NaCl визначали як відсоток приросту титрованої кислотності в культуральному середовищі з NaCl порівняно з контролем, який не містив NaCl.

Виділення  $\alpha$ -казеїнових субстратів проводили гель-фільтрацією на сефедексі G-150 фірми «Pharmacia» (Швеція) з використанням хроматографічної системи для рідинної хроматографії фірми «Reanal» (Угорщина).

Мікропрепаративний електрофорез для одностадійного виділення  $\alpha_{S1}$ - і  $\beta$ -казеїнів, а також аналітичний електрофорез для контролю гомогенності казеїнових субстратів і аналізу продуктів їх протеолізу проводили як описано в (Yukalo, Datsyshyn, Krupa, & Storozh, 2024).

Концентрацію білків у хроматографічних фракціях, взірцях для електрофорезу і препаратах казеїнових субстратів визначали спектрофотометрично при довжині хвилі  $\lambda=280$  нм з використанням відповідних коефіцієнтів поглинання (Fox, 2015).

Математично-статистичну обробку результатів проводили з використанням пакетів програм Microsoft Office Excel (2007).

**Результати і обговорення.** Відбір протеїназа-позитивних штамів лактококів було проведено за кількістю низькомолекулярних продуктів протеолізу в молочному нативному середовищі протягом 12 год культивування при 30 °С. Як правило, за цей час протеїназа-негативні штами для свого розвитку використовують амінокислоти і пептиди, які є в молоці, і їх концентрація стає нижчою, ніж у контрольному молочному середовищі без лактококів. У табл. 2 наведено дані концентрації низькомолекулярних продуктів протеолізу, які утворюються при інкубуванні штамів впродовж 12, 24 і 72 год при відніманні значень контролю.

За отриманими даними було виключено два штами (I<sub>3</sub> і I<sub>4</sub>), у яких відсутні приклітинні протеїнази і вони не здатні забезпечувати себе амінокислотами та пептидами через розщеплення білків молока.

Штам I<sub>5</sub> очевидно має слабку приклітинну протеїназу, що проявилось на пізніших етапах культивування (72 год). Для встановлення активності приклітинних протеїназ відібрані 7 штамів продовжували культивувати і визначали їх активність через 24 та 72 години. Ці дані дозволили умовно розділити за класифікацією Залашка на три групи: слабкі, середні і сильні протеоліти. Серед досліджуваних штамів виявилось два слабкі протеоліти (I<sub>2</sub> і I<sub>5</sub>), три середні (I<sub>8</sub>, I<sub>11</sub>, I<sub>13</sub>) і два сильні (I<sub>19</sub> і I<sub>21</sub>).

Таблиця 2. Залежність протеолітичної активності лактококів від часу культивування (M±m, n=5)\*

Штами <i>Lactococcus lactis</i> <i>ssp. lactis</i>	Протеолітична активність (мг% тирозину + триптофану) через			Наявність (+) або відсутність (-) приклітинної протеїнази
	12 год	24 год	72 год	
I <sub>2</sub>	0,21 ± 0,02	0,41 ± 0,02	1,1 ± 0,3	+
I <sub>3</sub>	-0,62 ± 0,04 <sup>1</sup>	—	—	—
I <sub>4</sub>	-0,27 ± 0,02 <sup>1</sup>	—	—	—
I <sub>5</sub>	-0,03 ± 0,008 <sup>1</sup>	-0,11 ± 0,01 <sup>1</sup>	0,36 ± 0,04	? <sup>2</sup>
I <sub>8</sub>	0,19 ± 0,02	0,45 ± 0,03	1,0 ± 0,2	+
I <sub>11</sub>	0,43 ± 0,03	0,72 ± 0,05	1,3 ± 0,2	+
I <sub>13</sub>	0,32 ± 0,03	0,68 ± 0,05	1,1 ± 0,2	+
I <sub>19</sub>	2,31 ± 0,3	4,1 ± 0,3	5,2 ± 0,4	+
I <sub>21</sub>	1,4 ± 0,2	2,2 ± 0,3	3,2 ± 0,3	+

**Примітка:** знак «—» перед значенням показує зменшення концентрації продуктів протеолізу по відношенню до контролю; знак питання означає сумнівність наявності приклітинної протеїнази у штамі; \*M — середнє значення вимірюваної величини, m — стандартна похибка вимірювання, n — повторюваність проведення вимірювань.

Для відбору штамів також необхідно враховувати їх здатність синтезувати молочну кислоту і стійкість до NaCl в середовищі. Слабкі кислотоутворювачі і штами, які не можуть розвиватися у присутності 4% NaCl, не включають до складу заквасок для виробництва ферментованих молочних продуктів і твердих сичужних сирів (Юкало, 2007). Результати дослідження кислотоутворення та стійкості до NaCl наведені в табл. 3.

Зважаючи на вказані властивості, а також тривалість кислотної коагуляції молока при культивуванні, було відібрано по одному штаму від сильних, середніх і слабких протеолітів для дослідження типу їхніх приклітинних протеїназ (Р I або Р III).

Таблиця 3. Активність утворення молочної кислоти і стійкість до NaCl протеїназа-позитивних штамів лактококів ( $M \pm m$ ,  $n=3$ )\*

Штами <i>Lactococcus lactis</i> ssp. <i>lactis</i>	Титрована кислотність, °Т, через		Тривалість кислотної коагуляції, год	Стійкість лактококів до NaCl (% приросту титрованої кислотності) через	
	6 год	24 год		6 год	24 год
l <sub>2</sub>	54 ± 2	90 ± 4	18 ± 2	51 ± 3	72 ± 4
l <sub>5</sub>	52 ± 3	66 ± 3	21 ± 2	45 ± 3	68 ± 3
l <sub>8</sub>	62 ± 2	74 ± 5	24 ± 3	50 ± 3	35 ± 2
l <sub>11</sub>	73 ± 3	99 ± 4	17 ± 2	54 ± 3	90 ± 5
l <sub>13</sub>	70 ± 3	82 ± 4	23 ± 2	52 ± 3	43 ± 3
l <sub>19</sub>	75 ± 4	106 ± 4	10 ± 1	65 ± 4	77 ± 4
l <sub>21</sub>	68 ± 3	94 ± 4	16 ± 2	69 ± 4	84 ± 4

**Примітка:** \*M — середнє значення вимірюваної величини; m — стандартна похибка вимірювання; n — повторюваність проведення вимірювань.

Тип протеїназ визначається за здатністю штаму розщеплювати основні казеїнові фракції —  $\alpha_{S1}$ -,  $\beta$ - і  $\kappa$ -казеїни (Bragason, Svendsen, & Hansen, 2020).

Очевидно, що така специфічність дії приклітинних протеїназ пов'язана із нативною структурою цих фракцій (Hansen, & Marcatili, 2020; Ji, Ma, & Agyei, 2021), тому для отримання казеїнових субстратів з максимально збереженою просторовою структурою були відібрані одностадійні методи їх отримання мікропрепаративним електрофорезом для виділення  $\alpha_{S1}$ - і  $\beta$ -казеїну та гель-фільтрація для виділення  $\kappa$ -казеїну. Результати отримання гомогенних  $\alpha_{S1}$ - і  $\beta$ -казеїнів мікропрепаративним електрофорезом показані на рис. 1.

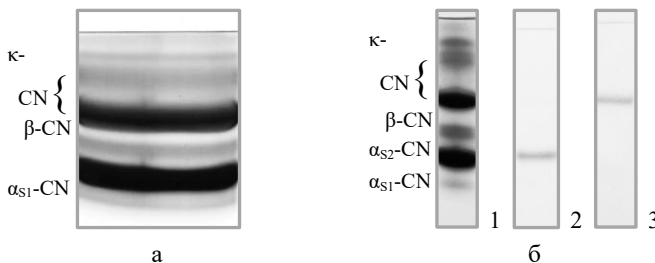
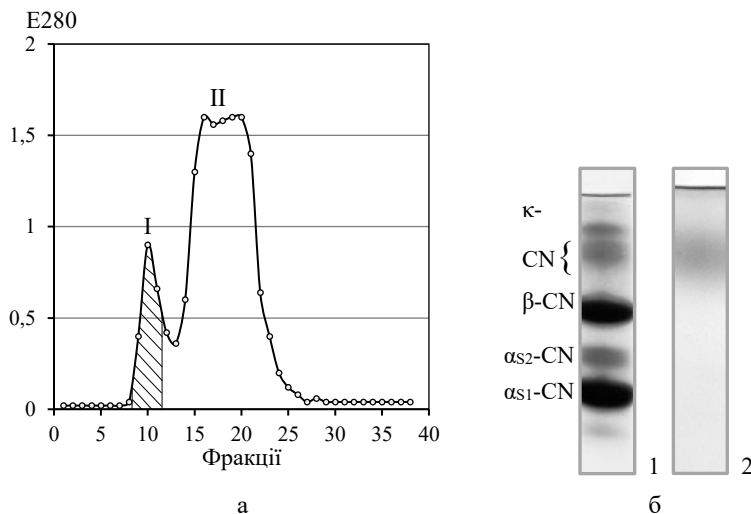


Рис. 1. Мікропрепаративний електрофорез загального казеїну (а); аналітичний електрофорез (б) загального казеїну (1) і виділених фракцій  $\alpha_{S1}$ -казеїну (2) і  $\beta$ -казеїну (3)

Цей метод дозволяє за одну стадію виділити електрофоретично чисті фракції  $\alpha_{S1}$ - і  $\beta$ -казеїнів (рис. 1, а). Гомогенність казеїнових фракцій підтверджується аналітичним електрофорезом (рис. 1, б). Виділення третьої казеїнової фракції —  $\kappa$ -казеїну ускладнюється у зв'язку з характерною для неї електрофоретичною мікро-

гетерогенністю через відмінності в кількості олігосахаридних груп, тому для виділення гомогенного  $\alpha$ -казеїну було вибрано другий одностадійний метод — гель-фільтрацію. Результати гель-фільтрації загального казеїну на сефадексі G-150 показані на рис. 2.



**Рис. 2.** Хроматограма гель-фільтрації загального казеїну (а), отримана на сефадексі G-150 з виділенням сектору  $\alpha$ -казеїнової фракції (пік I); електрофореграми (б) загального казеїну (1) і виділеного  $\alpha$ -казеїну гель-фільтрацією (2)

З огляду на отримані результати було виділено сектор хроматографічного піку I, який містить  $\alpha$ -казеїн переважно у вигляді тримерів (рис. 2, а). Важливо, що в цей сектор не попадає  $\alpha_{2}$ -казеїн, який може утворювати надмолекулярні структури завдяки утворенню дисульфідних зв'язків (Fox, 2015).

Результати аналітичного електрофорезу підтверджують гомогенність виділеного препарату  $\alpha$ -казеїну (рис. 2, б). Таким чином, отримані казеїнові субстрати були використані для модельних протеолізів приклітинними протеїназами лактококів.

Для встановлення типу приклітинних протеїназ використаний короткочасний протеоліз (3 год) кожного  $\alpha$ -казеїнового субстрату біомасою клітин кожного штаму лактококів. Такий протеоліз на рівні клітин відбувається в основному завдяки дії приклітинних протеїназ. Штами для протеолізу вирощували в спеціальному молочному нативному середовищі, яке дозволяло досягнути високої концентрації клітин, а також виділити їх без молочних білків. При цьому склад і активність приклітинних протеїназ не змінюється (Thomas, & Pritchard, 1987).

Протеоліз кожного казеїнового субстрату (1%) проводили при 30 °C концентрованою біомасою клітин кожного штаму лактококів впродовж 3 год (Юкало, 2007). Після завершення протеолізу клітини відцентрифугували. З отриманого супернатанту кількісно ізоелектрично осаджували нерозщеплені казеїнові фракції і розчиняли в електрофоретичному буфері для взірців. Результати аналітичного електрофорезу показано на рис. 3.

Як контроль було використано  $\alpha$ -казеїн у концентрації, що відповідала його концентрації в реакційній суміші. Замість більш дефіцитних  $\alpha_{S1}$ - і  $\beta$ -казеїнів як контроль був узятий загальний казеїн, концентрація якого у 2,5 раза вища, ніж концентрація кожного казеїну в реакційній суміші.

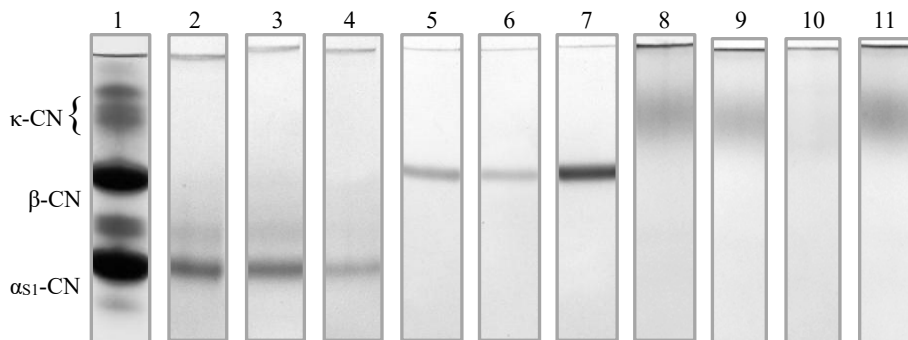


Рис. 3. Електрофореграми контрольних зразків загального казеїну (1) і  $\alpha$ -казеїну (11); електрофореграми  $\alpha_{S1}$ -казеїну після інкубації зі штамми I<sub>2</sub> (2), I<sub>11</sub> (3) та I<sub>19</sub> (4); електрофореграми  $\beta$ -казеїну після інкубації зі штамми I<sub>2</sub> (5), I<sub>11</sub> (6) та I<sub>19</sub> (7); електрофореграми  $\alpha$ -казеїну після інкубації зі штамми I<sub>2</sub> (8), I<sub>11</sub> (9) та I<sub>19</sub> (10)

Як видно на електрофореграмах, подібну специфічність до казеїнових фракцій проявляють приквіттинні протеїнази штамів I<sub>2</sub> і I<sub>11</sub>. Вони активно розщеплюють  $\beta$ -казеїн (рис. 3, 5—6) і малоактивні щодо  $\alpha_{S1}$ - і  $\alpha$ -казеїнів. Така специфічність характерна для приквіттинних протеїназ типу P I. Протеїназа штаму I<sub>19</sub> гідролізують усі казеїнові субстрати, але в значно більшій мірі  $\alpha_{S1}$ - і  $\alpha$ -казеїни. З великою ймовірністю можна стверджувати, що у штаму I<sub>19</sub> приквіттинна протеїназа належить до типу P III.

## Висновки

1. На основі характеристики загальної протеолітичної активності під час інкубації в молочному нативному середовищі впродовж 12, 24 і 72 год було відібрано 7 протеїназа-позитивних із 9 досліджуваних штамів *Lactococcus lactis* ssp. *lactis*. Зважаючи на здатність утворювати молочну кислоту, стійкість до хлориду натрію, для встановлення типу приквіттинної протеїнази було відібрано три штами, з яких один сильний протеоліт (I<sub>19</sub>), один — середній (I<sub>11</sub>) та один слабкий (I<sub>2</sub>).

2. Використання одностадійних методів очищення (гель-фільтрація з розділенням на сектори і мікропрепаративний електрофорез) дозволили отримати електрофоретично гомогенні казеїнові субстрати зі збереженням їх структури —  $\alpha$ -казеїн,  $\alpha_{S1}$ -казеїн і  $\beta$ -казеїн.

3. Модельні протеолізи на рівні клітин біомаси відібраних штамів і отриманих казеїнових субстратів (3 год, 30 °C) дозволили на основі аналітичного електрофорезу навіть без денситометрії встановити типи приквіттинних протеїназ. У двох штамів (I<sub>2</sub>, I<sub>11</sub>) — це протеїназа P I, в одного (I<sub>19</sub>) — P III.

## Література

Юкало, В. Г. (2021). *Біологічна активність протеїнів і пептидів молока*: монографія. Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя. <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/36801>.

Юкало, В. Г. (2007). Білки казеїнового комплексу коров'ячого молока та продукти їх протеолізу за дії ферментів молочнокислих бактерій: дис. ... д-ра біол. наук. Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль.

Børsting, M. W., Qvist, K. B., Brockmann, E., Vindeløv, J., Pedersen, T. L. & Vogensen, F. K. (2015). Classification of *Lactococcus lactis* cell envelope proteinase based on gene sequencing, peptides formed after hydrolysis of milk, and computer modeling. *Journal of Dairy Science*, 98(1), 68—77. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8517>.

Bragason, E., Svendsen, C. A., Guya, M. E., Berhe, T., & Hansen, E. B. (2020). Draft Genome Sequences of *Lactococcus lactis* Strains MS22314, MS22333, MS22336, and MS22337, Isolated from Fermented Camel Milk in Ethiopia. *Microbiol Resour Announcement*, 9(10), e00862—20. <https://doi.org/10.1128/mra.00862-20>.

Broadbent, J. R., Steele, J. L. (2013). Lactocepin: the cell envelope-associated Endopeptidase of lactococci. *Handbook of Proteolytic Enzym*, 3, 3188—3195. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382219-2.00703-1>.

Brown, L., Pingitore, E. V., Mozzi, F., Saavedra, L., Villegas, J. M., & Hebert, E. M. (2017). Lactic Acid Bacteria as Cell Factories for the Generation of Bioactive Peptides. *Protein and peptide letters*, 24(2), 146—155. <https://doi.org/10.2174/0929866524666161123111333>.

Fox, P. F., Uniacke-Lowe, T., McSweeney, P. L. H., & O'Mahony, J. A. (2015). Dairy chemistry and biochemistry (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14892-2>.

Hansen, E. B., & Marcatili, P. (2020). Modeled Structure of the Cell Envelope Proteinase of *Lactococcus lactis*. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 8, 613—986. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.613986>.

Ji, D., Ma, J., Xu, M., & Agyei, D. (2021). Cell-envelope proteinases from lactic acid bacteria: Biochemical features and biotechnological applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(1), 369-400. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12676>

Juillard, V., Laan, H., Kunji, E. R., Jeronimus-Stratingh, C. M., Bruins, A. P., & Konings, W. N. (1995). The extracellular PI-type proteinase of *Lactococcus lactis* hydrolyzes beta-casein into more than one hundred different oligopeptides. *Journal of bacteriology*, 177(12), 3472—3478. <https://doi.org/10.1128/jb.177.12.3472-3478.1995>.

Kieliszek, M., Pobjega, K., Piwowarek, K., & Kot, A. M. (2021). Characteristics of the proteolytic enzymes produced by lactic acid bacteria. *Molecules*, 26(7), 1858. <https://doi.org/10.3390/molecules26071858>.

Liu, M., Bayjanov, J. R., Renckens, B., Nauta, A., & Siezen, R. J. (2010). The proteolytic system of lactic acid bacteria revisited: A genomic comparison. *BMC Genom*, 11(36). <https://doi.org/10.1186/1471-2164-11-36>.

Nagpal, R., Behare, P., Rana, R., Kumar, A., Kumar, M., Arora, S., Morotta, F., Jain, S., & Yadav, H. (2011). Bioactive peptides derived from milk proteins and their health beneficial potentials: An update. *Food & Function*, 2(1), 18—27. <https://doi.org/10.1039/c0fo00100g>.

Savijoki, K., Ingmer, H., & Varmanen, P. (2006). Proteolytic systems of lactic acid bacteria. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 71(4), 394—406. <https://doi.org/10.1007/s00253-006-0427-1>.

Solieri, L., Sola, L., Vaccalluzzo, A., Randazzo, C. L., Martini, S., & Tagliazucchi, D. (2022). Characterization of Cell-Envelope Proteinases from Two *Lacticaseibacillus casei* Strains Isolated from Parmigiano Reggiano Cheese. *Biology*, 11(1), 139. <https://doi.org/10.3390/biology11010139>.

Thomas, T. D., & Pritchard, G. (1987). Proteolytic enzymes of dairy starter cultures. *FEMS Microbiology Reviews*, 46(3), 245—268. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.1987.tb02465>.

Visser, S., Slangen, C. J., Robben, A. J., van Dongen, W. D., Heerma, W., & Haverkamp, J. (1994). Action of a cell-envelope proteinase (CEP III-type) from *Lactococcus lactis* subsp. *cremoris* AM1 on bovine  $\kappa$ -casein. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 41(6), 644—651. <https://doi.org/10.1007/BF00167280>.

Yukalo, V. G., & Krupa, O. M. (2017). The proteolytic systems of lactic acid microorganisms: A review. *Ukrainian Food Journal*, 6(3), 417—432. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2017-6-3-3>.

Yukalo, V. G., & Storozh, L. A. (2018). Isolation of  $\kappa$ -CN-1P and  $\beta$ -CN-5P fractions from native casein micelles. *The Ukrainian Biochemical Journal*, 90(4), 74—79. <https://doi.org/10.15407/ubj.90.04.074>.

Yukalo, V., Datsyshyn, K., Krupa, O., & Storozh, L. (2025). Electrophoretic systems for the fractional composition analysis of proteins in milk of cows of different breeds. *Food Science & Technology*, 19(1), 36—44. <https://doi.org/10.15673/fst.v19i1.3138>.

Zhang, S., Zhang, L., & Han, X. (2015). Lactic acid bacteria proteinase and quality of fermented dairy products: A review. *Wei Sheng Wu Xue Bao*, 55(12), 1530—1536. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27101694/>.

УДК 664.87

## SCIENTIFIC APPROACHES TO THE OPTIMIZATION OF MUESLI FOOD CONCENTRATE COMPOSITION

L. Makhynko, V. Makhynko, A. Hryshchenko, V. Kovbasa

*National University of Food Technologies*

---

**Key words:**

*Muesli*  
*Food concentrates*  
*Extrusion*  
*Flaking*  
*Optimization*  
*Formulation development*

**Article history:**

Received 11.09.2025  
Received in revised form  
26.09.2025  
Accepted 14.10.2025

**Corresponding author:**

L. Makhynko

**E-mail:**

makhynkolv@gmail.com

**Citation:** Махінько Л. В., Махінько В. М., Грищенко А. М., Ковбаса В. М. (2025). Наукові підходи до оптимізації складу харчових концентратів типу мюслі. *Наукові праці НУХТ*, 31(5), 206—217. DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-5-17

---

**ABSTRACT**

A study was conducted to examine the physicochemical, structural-mechanical, and sensory characteristics of cereal components to substantiate the formulation of multigrain food concentrates of the muesli type. It was found that the key factor determining the quality and stability of the final product was the structural features of cereal flakes and extrudates. Products obtained by extrusion technology exhibited lower moisture content (5.5—5.9%), higher strength (3.0—6.2 N), and moderate solubility (9.5—11.3%), while samples produced by flaking with roasting showed higher moisture content (10.7—10.9%), lower strength (1.3—1.4 N), and higher solubility (15.0—16.7%). Samples made by simple flaking demonstrated the lowest swelling capacity (2.0—2.4 cm<sup>3</sup>/g) and water absorption (2.6—2.7 g/g), which is associated with less pronounced starch structure degradation during processing. The highest swelling ability was observed in cereal balls obtained by high-temperature extrusion (6.0—7.5 cm<sup>3</sup>/g). Comparison of physicochemical indicators showed that differences in technological properties caused heterogeneous behavior of components during preparation; therefore, to ensure a stable texture and uniform consistency of the final product, formulation alignment based on swelling and solubility parameters was required.

Based on experimental data, the composition of grain-fruit mixtures was optimized using the simplex linear programming method, taking into account ingredient cost and caloric value. The rational formulation obtained had an energy value of 339 kcal per 100 g and demonstrated high consumer properties, including pleasant taste, uniform consistency, and attractive appearance. The developed formulation model illustrates the effectiveness of combining experimental evaluation of raw material properties with mathematical optimization.

---

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-5-17

---

## НАУКОВІ ПІДХОДИ ДО ОПТИМІЗАЦІЇ СКЛАДУ ХАРЧОВИХ КОНЦЕНТРАТІВ ТИПУ МЮСЛІ

Л. В. Махинько, В. М. Махинько, А. М. Грищенко, В. М. Ковбаса  
Національний університет харчових технологій

Проведено дослідження фізико-хімічних, структурно-механічних і органолептичних характеристик зернових компонентів з метою обґрунтування складу мультизернових харчових концентратів типу мюслі. Встановлено, що основним чинником, який визначає якість і стабільність готового продукту, є особливості структури зернових пластівців і екструдатів. Показано, що продукти, виготовлені за екструзійною технологією, мають нижчу масову частку вологи (5,5—5,9%), вищу міцність (3,0—6,2 Н) і помірну розчинність (9,5—11,3%), тоді як зразки, отримані шляхом плющення з обсмаженням, характеризуються більшим вмістом вологи (10,7—10,9%), низькою міцністю (1,3—1,4 Н) та вищою розчинністю (15,0—16,7%). Для зразків, виготовлених методом плющення, визначено найнижчі показники набухання (2,0—2,4 см<sup>3</sup>/г) і водопоглинання (2,6—2,7 г/г), що пов'язано з менш вираженою деструкцією крохмальних структур під час оброблення. Найбільш виражену здатність до набухання продемонстрували зернові кульки, отримані методом високотемпературної екструзії (6,0—7,5 см<sup>3</sup>/г). Зіставлення фізико-хімічних показників показало, що різниця в технологічних властивостях зумовлює неоднорідність поведінки компонентів у процесі приготування, тому для забезпечення стабільної текстури й однорідної консистенції готової страви необхідне узгодження рецептури за показниками набухання і розчинності.

На основі експериментальних даних проведено оптимізацію складу зерно-фруктових сумішей методом лінійного програмування (симплекс-метод) з урахуванням вартості компонентів і калорійності. Визначено раціональну композицію, що має калорійність 339 ккал/100 г і високі споживчі характеристики: приємний смак, однорідну консистенцію, привабливий зовнішній вигляд. Розроблена модель рецептури демонструє ефективність поєднання експериментальних методів оцінювання властивостей сировини з математичною оптимізацією.

**Ключові слова:** мюслі, харчові концентрати, екструзія, плющення, оптимізація, розроблення рецептури.

**Постановка проблеми.** Продукти швидкого приготування займають вагому частку серед продукції харчової промисловості. Особливо відчутно зріс попит на харчові концентрати обідніх страв, сухі сніданки, мультизернові батончики, різноманітні снеки з початком повномасштабного вторгнення. Такі продукти мають максимальну енергетичну цінність в одиниці об'єму і ваги, здебільшого порційно розфасовані і мають високі смакові якості. Основною їх перевагою є тривалий термін зберігання, транспортабельність і короткий (не більше 10...15 хв) процес приготування (Macedo, Oliveira, & Santos, 2013; Zhou, 2025).

Нині активно ведуться роботи з розроблення нових видів мультизернових харчових концентратів зі збалансованим хімічним складом і подовженим терміном

зберігання. Одним із видів таких концентратів є мюслі. Традиційно мюслі випускають у вигляді сумішей, основою яких (близько 80%) є продукти перероблення зернових у вигляді пластівців, кульок, кілець тощо. Для виробництва цих компонентів використовують різні технології: високотемпературну екструзію, гідротермічне оброблення з подальшим плющенням та/або обсмажуванням, глазуруванням. Залежно від виду сировини та обраного способу її оброблення отримують зернові продукти, що можуть суттєво відрізнятися за органолептичними, фізико-хімічними, структурно-механічними властивостями. Відмінність властивостей різних компонентів сумішей мюслі призводить до різної поведінки їх у процесі приготування й, відповідно, погіршення органолептичних властивостей готової страви. Крім того, через різну текстуру, об'ємну масу, компоненти зернової основи підлягають самосортуванню в споживчій упаковці, що також створює незручності під час приготування (Curtain, & Grafenauer, 2019).

Дослідження щодо вивчення основних властивостей зернових компонентів, виготовлених за різною технологією, з метою підбору раціонального складу мюслі дасть змогу випускати конкурентоспроможні мультизернові харчові концентрати з високими показниками якості.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Напружений ритм життя впливає на раціон харчування сучасної людини. Збільшується попит на продукцію, що відповідає вимогам «швидкого харчування». Разом з тим споживачі все більше уваги звертають й на корисні властивості продукту (Liu, & Cai, 2024; Lin et al., 2025).

Одним із таких харчоконцентратів є мюслі — суміш зернових культур, оброблених за певною технологією та сушених фруктів, ягід, горіхів, насіння тощо. Як продукт здорового харчування, мюслі характеризуються такими споживчі властивостями: співвідношенням основних харчових речовин; високим рівнем вітамінів, макро- та мікроелементів, поліненасичених жирних кислот і вітаміну Е; багаті на харчові волокна; поєднуються з будь-якими рідинами — водою, молоком, кисломолочними продуктами, соками, чаєм, кавою. Також мюслі у своєму складі мають низький вміст солі та доданого цукру.

На українському ринку представлено мюслі як провідних іноземних виробників цього продукту (Nestle (Швейцарія), Н&J Brüggен, Dr.Oetker, Nahne (Німеччина), АХА (Данія)), так і вітчизняних компаній («Лантманнен-Акса» (м. Бориспіль, Київська обл.), «Золоте зерно» (м. Дніпро), ТОВ «Фірма ДІАМАНТ ЛТД, ТМ «Козуб» (м. Полтава), ТМ «Сто пудов» (м. Харків)). Ціна на них змінюється залежно від складу, маси фасування та підприємства-виробника. Мюслі традиційно випускають у вигляді сухих сумішей. Перспективною є технологія виробництва мюслі у вигляді батончиків, які мають м'яку консистенцію, не вимагають додаткової кулінарної або іншої обробки та упаковуються в індивідуальну упаковку (Кордзая, & Ковалів, 2019; Чорней, & Миколенко, 2021).

Основний сировинний компонент мюслі, що становить 80% їх складу, — зернові культури. Передусім це крупи, оброблені за певною технологією: плющення (отримують пластівці товщиною 0,25...0,40 мм); плющення з подальшим обсмажуванням та/або глазуруванням (отримують пластівці товщиною 0,4...0,6 мм); високотемпературної екструзії за високих швидкості і тиску в шнекових екструдерах (отримують вироби, вигляд яких визначається розмірами і формою отворів матриці) (Kaur, Singh, & Singh, 2023).

Низку рецептур мультизернових сумішей функціонального призначення з пластівців, виготовлених з біологічно активованого зерна пшениці, тритикале та голозерного вівса запропоновано фахівцями (Бажай-Жежерун, 2020). Технологія пластівців передбачає гідротермічне оброблення за температури 12—16 °C у три цикли: плющення зерна, підсушування, комбінування згідно з рецептурою.

Досліджено вплив кількості складників суміші пластівців на якісні показники готового продукту. Визначено основні фізико-технологічні показники зернових пластівців. Досліджено співвідношення основних енергогенних речовин у пластівцях на основі біоактивованого зерна.

Науковцями (Жигунов, Мардар, Волошенко, & Брославцева, 2015) проводилась робота щодо розроблення рецептур сумішей на основі вівсяних пластівців з додаванням шматочків сублимованих фруктів.

І. М. Калугіною та І. О. Якименко була запропонована корисна модель на композицію інгредієнтів для приготування граноли з додаванням цукатів фейхоа (патент України № 137182), тобто продукту з підвищеним вмістом біодоступного для вирішення проблеми дефіциту йоду і есенціальних нутрієнтів в харчових раціонах, а також підвищення ефективності їх засвоюваності.

Також ведуться дослідження (Bchir, Jean-François, Rabetafika, & Blecker, 2017) щодо оцінки впливу волокон груші, яблука і фініків на фізико-хімічні текстурні та сенсорні властивості зернових батончиків. Для визначення прийнятності споживача додавали побічні продукти яблучної клітковини (6, 10 і 14%). Внесення 10% супутнього продукту дає зернові батончики з найвищою прийнятністю.

Фахівцями запропоновано новий спосіб виготовлення сухого сніданку на основі пластівців зернових або овочевих культур, який відрізняється тим, що пластівці з'єднують з рідиною, перемішують до насичення, формують і сушать у вакуумно-конденсаційній установці при температурі 46—50 °C і тиску 0,1—0,2 атм. Як рідину використовують сироп або підсолений водний настій лікарських рослин (патент України № 63495).

Дослідження (Ottombrino et al., 2025) пов'язані з розробленням фруктово-зернових батончиків з додаванням *Arthrospira-platensis* (спіруліна), що є прикладом впровадження функціональних біоінгредієнтів у рецептуру. Харчовий склад батончика був розроблений таким чином, щоб отримати збагачені фруктові злакові батончики зі збільшеним вмістом білка до 10% з додаванням 2% спіруліни.

Включення висівок до екструдованих снєків на основі крохмалю дозволяє виробникам задовольнити дві потреби споживачів одночасно — більшу екологічність та вищу харчову цінність. У праці (Tyl, Bresciani, & Marti, 2021) зосередилася на вивченні впливу висівок на фізико-хімічні характеристики екструдованих снєків.

Досліджено застосування плоду шовковиці як антиоксидантного компонента у складі мюслі: встановлено високу антиоксидантну активність, поліпшення жирнокислотного складу, сповільнення швидкості накопичення продуктів окиснення (Kobus-Cisowska, Gramza-Michalowska, Kmiecik, Flaczyk, & Korczak, 2013).

Розроблено рецептуру батончика на основі мюслі з натуральним медом без білого цукру та синтетичних добавок (Laricheva, & Mikhailova, 2020).

Науковцями проводились спроби розробити готові до вживання сухі сніданки (Kumari, Singh, Singh, Bhatia, & Nain, 2019). Сніданок готували шляхом змішування, випікання й охолодження проса, амаранту, повітряної пшениці, насіння льону, насіння соняшнику, родзинок, меду, цукру, олії та води. Вміст поживних речовин на порцію розроблених сніданків становила 12,8% для білка, 13% — для жиру, 34,5% — для кальцію, 20,5% — для заліза від рекомендованої добової норми.

Таким чином, можна зробити висновок, що більшість досліджень, які проводяться, спрямовані на розроблення сумішей харчових концентратів мюслі, які б мали підвищену харчову цінність, функціональність, антиоксидантні властивості тощо. В той же час слід відзначити відсутність інформації щодо підбору складу композицій сумішей мюслі з урахуванням основних фізико-хімічних, структурно-механічних показників рецептурних компонентів, а також оптимізації за харчовою цінністю.

**Мета досліджень** полягає у вивченні основних фізико-хімічних і структурно-механічних властивостей зернових компонентів, виготовлених за різною технологією для розроблення рецептурних композицій мюслі, а також оптимізації їх складу за харчовою цінністю.

**Матеріали і методи.** Під час проведення лабораторних досліджень використовували пластівці пшеничні, пластівці кукурудзяні, кульки рисові, кульки кукурудзяні (ДСТУ 4634:2006), пластівці вівсяні (ГОСТ 21149-93), пластівці ячмінні (ТУ У 10.6-13929625-001:2023); сушені фрукти: банани, ананаси, кокоси (ДСТУ 8743:2017), яблука (ДСТУ ISO 7701:2019), родзинки (ДСТУ ISO 4125:2013).

Органолептичні, фізико-хімічні показники якості визначали за загальноприйнятими в галузі методиками.

Міцність визначали, використовуючи прилад ПБ-5058-004 (модифікований прилад Строганова, на рухомі опори якого додатково була встановлена металева негнучка пластина).

Дослідження проводили за такою методикою: зразок вміщують на пластину і після натискання кнопки «ПУСК» прилад в автономному режимі починає стискати зразок, при цьому навантаження може досягати 30 Н. Дослідник візуально визначає момент руйнування зразка і за допомогою пульта керування зупиняє процес, повертаючи прилад у вихідне положення. Таким чином визначається мінімальне навантаження, необхідне для руйнування досліджуваного зразка.

Здатність до набухання визначали методом вимірювання об'єму набухлого продукту після його змішування з водою. Для цього в склянку зважують з похибкою не більше  $\pm 0,01$  г наважку продукту масою 5,0 г, змішують з 70,0 см<sup>3</sup> дистильованої води. Суспензію без втрат переносять у мірний циліндр, доводять загальний об'єм до 100 см<sup>3</sup>, ретельно перемішують і залишають на 4 год. Потім вимірюють об'єм набухлого продукту на межі розділу осаду і надосадової рідини.

Здатність до набухання ( $H$ ) визначають за формулою:

$$H = V/m, \quad (1)$$

де  $V$  — об'єм набухлого продукту, см<sup>3</sup>;  $m$  — маса наважки продукту, г.

Розчинність і водопоглинальну здатність визначали за методом, запропонованим Т. Дж. Шохом для дослідження модифікованих крохмалів та їх похідних.

У відтаровані центрифужні пробірки вносять наважку продукту 1,0 г, доливають дистильованою водою до маси 30,0 г і перемішують вміст протягом 30 хв.

Потім центрифугують пробірки протягом 10 хв при частоті 6000 хв<sup>-1</sup>. Рідку фазу зливають у конічні колби місткістю 250 см<sup>3</sup>. Зважують відцентрифуговані пробірки і за різницею мас знаходять масу набухлого осаду.

У відтаровані скляні стакани з широким горлом відбирають по 10,0 г рідкої фази. Вміст випарюють на водяній бані (близько 2 год), а потім висушують сухий осад в термостаті за температури 60 °С протягом 1 год. Стакани зважують і ставлять на досушування ще на 15 хв. Якщо різниця зважувань не більше ±0,01 г, то сушіння припиняють.

Розчинність ( $P$ ) ( $y$  % до сухих речовин продукту) розраховують за формулою:

$$P = \frac{b \times 30}{a \times 10} \times 100, \quad (2)$$

де  $b$  — кількість сухого осаду після сушіння в термостаті, г; 30 — початкова кількість продукту, г;  $a$  — кількість сухих речовин продукту в початковій наважці, г; 10 — кількість центрифугату, взятого для випаровування, г.

Водопоглинальну здатність ( $B$ , г/г) розраховують за формулою:

$$B = W/a; W = r - a, \quad (3)$$

де  $W$  — вода, зв'язана осадом, г;  $r$  — маса залишку в центрифужній пробірці, г.

Оскільки частина сухої речовини продукту переходить у розчин, проведена кореляція:

$$a_{кор.} = [a - (100 - P)/100]; \quad (4)$$

$$W_{кор.} = r - a_{кор.} \quad (5)$$

Звідси кореляційний показник водопоглинальної здатності, г/г:

$$B_{кор.} = W_{кор.}/a_{кор.} \quad (6)$$

Оптимізацію складу сумішей проводили методом лінійного програмування (симплекс-метод) (Tripathi, & Kumar, 2023).

**Викладення основних результатів дослідження.** Перший етап досліджень було присвячено вивченню основних фізико-хімічних і структурно-механічних властивостей зернових компонентів, виготовлених за різною технологією: високотемпературною екструзією (рисові кульки, кукурудзяні пластівці, кукурудзяні кульки, пшеничні пластівці), плющенням з подальшим обсмажуванням (кукурудзяні, пшеничні пластівці), плющенням зернової (вівсяні, пшеничні, ячмінні пластівці) та фруктової (сушені кокос, ананас, яблука, родзинки) сировини.

У сумішах харчових концентратів масова частка вологи сировини є одним з вирішальних факторів якості продукту і тривалості його зберігання. Проведено вимірювання масової частки вологи сировинних компонентів для мюслі (табл. 1). Таким чином визначили, що масова частка вологи зернових компонентів відповідає вимогам відповідних стандартів. Продукти, одержані за екструзійною технологією, мали найменший вміст вологи порівняно з іншими компонентами, що пояснюється особливістю оброблення зернової сировини в екструдерах за високих температур і тиску. Найвищі показники масової частки вологи мали сушені фрукти, зокрема родзинки. Ці дані слід враховувати при проектуванні рецептур зерно-фруктових сумішей, оскільки це визначатиме характер змін, які відбуваються в процесі сумісного зберігання компонентів в упаковці.

Також одним з важливих показників, які обумовлюватимуть органолептичні показники якості готової страви, є міцність рецептурних компонентів (табл. 1).

Показник механічної міцності характеризує структуру продукту. Визначаючи міцність зразків, можна зробити висновки, які пластівці характеризуватимуться кращою розжовуваністю, а які гіршою. Результати визначення міцності зернових компонентів, виготовлених за різною технологією, дадуть змогу врахувати особливості структури різних компонентів при складанні рецептурної суміші.

*Таблиця 1. Масова частка вологи та міцність сировинних компонентів*

Назва компоненту, виготовленого:	Масова частка вологи, % ( $\pm 0,5$ )	Міцність, Н ( $\pm 0,5$ )
екструзійною технологією:		
рисові кульки	5,5	3,0
кукурудзяні пластівці	5,7	6,2
кукурудзяні кульки	5,8	3,4
пшеничні пластівці	5,9	6,0
плющенням з обсмаженням:		
кукурудзяні пластівці	10,7	1,3
пшеничні пластівці	10,9	1,4
плющенням:		
вівсяні пластівці	11,5	1,8
пшеничні пластівці «Екстра»	11,8	2,0
ячмінні пластівці «Екстра»	11,9	2,0
Сушені фрукти:		
кокоси	14,3	—
банани	15,2	—
яблука	18,9	—
родзинки	19,8	—

Відмінність властивостей різних компонентів сумішей м'ясли призводить до різної поведінки в процесі приготування. Важливо, щоб у процесі приготування страви всі компоненти набухали більш-менш з однаковою швидкістю, що забезпечить кращі органолептичні показники.

Як видно з табл. 1, найменшими показниками міцності характеризуються пластівці, виготовлені методом плющення з подальшим обсмаженням, а найбільшими — зернові продукти, виготовлені методом екструзії. Як відомо (Alam, Kaur, Khaira, & Gupta, 2016), у формуванні структури екструдатів значну роль відіграє крохмаль, перетворення якого в процесі екструзії визначатиме якість готового продукту. Це можна пояснити тим, що сировина в екструдері знаходиться у в'язко-плинному стані розплаву — при охолодженні стабілізується додатковими зв'язками, в тому числі ковалентними, що призводить до більшої пружності й меншої здатності до деформації перегрітою парою на виході з матриці екструдера. Отже, структура продукту буде більш міцна порівняно з технологією плющення.

Також було досліджено основні фізико-хімічні властивості зернових компонентів: ступінь набухання, розчинність, водопоглинальну здатність (табл. 2), показники, що демонструють можливість зв'язувати воду та розчинятися в ній, характеризують їх вуглеводний склад, а також споживчі властивості.

Продукти перероблення зернових культур (пластівці, кульки тощо) — це крохмалемістка сировина, що має здатність набухати у воді чи іншому середовищі й

утримувати значну кількість поглинутої води. Ця властивість оцінюється в основному за показником ступеня набухання у воді та розчинності.

*Таблиця 2. Основні фізико-хімічні показники якості зернових сировинних компонентів*

Назва компонента, виготовленого:	Ступінь набухання, <i>H</i> , см <sup>3</sup> /г, (±0,1)	Розчинність, %, (±0,5)	Водопоглинальна здатність, г/г, (±0,2)
екструзійною технологією:			
рисові кульки	6,0	11,3	6,5
кукурудзяні пластівці	3,0	9,5	3,2
кукурудзяні кульки	7,5	11,2	6,0
пшеничні пластівці	3,3	9,7	3,8
плющенням з обсмаженням:			
кукурудзяні пластівці	3,6	15,0	5,0
пшеничні пластівці	3,8	16,7	5,2
плющенням:			
вівсяні пластівці	2,4	10,2	2,6
пшеничні пластівці «Екстра»	2,0	10,3	2,7
ячмінні пластівці «Екстра»	2,2	10,0	2,7

Це зумовлює необхідність дослідження здатності до набухання (*H*) для зразків різних видів зернових компонентів і фруктів, що є важливим з практичної точки зору. Результатом набухання є збільшення об'єму зразків. Отримані дані ступеня набухання зернових сировинних компонентів, виготовлених за різними технологіями, наведено в табл. 2.

Важливу роль у цьому процесі відіграє такий компонент зернової сировини, як крохмаль. Причиною набухання є проникнення молекул води всередину зернових пластівців (кульок), зокрема в міжланцюговий простір клейстеризованого крохмалю. Як свідчать наведені дані, найкращу здатність до набухання мають зернові кульки, виготовлені за екструзійною технологією. Це можна пояснити більш інтенсивною дифузією молекул відновника, що спричиняє збільшення об'єму продукту. Серед пластівців більш вищий показник здатності до набухання мали ті, які виготовлені екструзією або плющенням з подальшим обсмажуванням. Зернові пластівці, отримані технологією плющення, характеризуються досить низькою здатністю набухати у воді. Очевидно, що така поведінка зернових компонентів обумовлена особливостями параметрів оброблення крохмалемісткої сировини.

Результати досліджень показників розчинності та водопоглинальної здатності сировинних компонентів також наведено в табл. 2.

Відомо, що розчинність продукту залежить від кількісного вмісту крохмалю у вихідній сировині (із збільшенням вмісту крохмалю зростає розчинність), наявності супутніх компонентів (білки, ліпіди послаблюють вплив параметрів оброблення на крохмаль і призводять до зменшення розчинності). При взаємодії продукту з відновниками процеси набухання і розчинення є взаємопов'язаними, і зростання розчинності може призводити до зменшення набухання продукту.

Результати визначень свідчать про те, що найбільшою розчинністю характеризуються зернові пластівці, отримані плющенням з обсмажуванням. Ймовірно, це

пов'язано з тим, що на стадії обсмажування в продукті утворюється додаткова кількість водорозчинних речовин. Найменший показник розчинності мали зернові пластівці, виготовлені за екструзійною технологією. Ця технологія передбачає дві стадії: екструзійне варіння крупи з подальшим її плющенням, що сприятиме утворенню більш щільної структури готового продукту і, відповідно, дещо меншої кількості водорозчинних речовин (Chen, 2025).

Крім способу оброблення зернової сировини, вагомим фактором, що впливатиме на показники розчинності та водопоглинання, на нашу думку, є характерні відмінності в будові зернівок різних культур. Дрібніші зерна крохмалю та більш жорстка білкова матриця в будові зернівки утворюють щільний зв'язок, що ускладнює вплив деструктуючих факторів оброблення, роблячи несуттєвою трансформацію полісахаридів крохмалю і, як наслідок, пластівці мають низьку розчинність. Це підтверджується дослідженнями вчених (Itagi, 2025; Sumczynski, Bubelová, Fišerová, & Orsavová, 2023).

На підставі наведених вище результатів можна стверджувати, що зернові продукти (пластівці, кульки), виготовлені за різними технологіями, мають відмінності в основних технологічних показниках. Це можна пояснити різним вмістом крохмалю в дослідних зразках, різною інтенсивністю перебігу процесів клейстеризації та деструкції крохмальної складової різної сировини, що зумовлено особливостями будови їх нативної форми. Це й призводить до різної їх поведінки, зокрема при взаємодії з водою. Одержані дані можуть слугувати основою при розробленні сумішей пластівців.

На підставі одержаних даних можна розробляти рекомендації щодо більш раціонального підбору складу полікомпонентних зернових сумішей за подібністю їх основних технологічних показників. Також ці дані можуть слугувати основою для рекомендацій способу приготування готових страв м'ясої з метою забезпечення високих органолептичних показників.

При складанні рецептурних композицій харчових концентратів м'ясої більшість виробників керується передусім органолептичними показниками чи вартістю, не враховуючи при цьому їх харчової цінності, тому на другому етапі роботи було вирішено оптимізувати склад фруктово-зернових сумішей з залученням інструментів математичного моделювання, зокрема методів лінійного програмування (симплекс-метод).

Проведено оптимізацію складу зернових сумішей за вартістю і калорійністю, використовуючи спеціальне програмне забезпечення. В результаті отримали наступний оптимальний вміст зернових пластівців і сушених фруктів у суміші з мінімальною ціною:

- пластівці вівсяні (плющення) — 30,0 г;
- пластівці ячмінні (плющення) — 26,0 г;
- пластівці пшеничні (плющення) — 5,0 г;
- пластівці кукурудзяні (плющення з обсмаж.) — 5,0 г;
- кульки кукурудзяні (екструзія) — 5,0 г;
- банани сушені — 18,0 г;
- родзинки — 6,0 г;
- яблука сушені — 5,0 г.

Калорійність даної композиції складає 339,0 ккал.

Було визначено органолептичні показники якості розробленої суміші (табл. 3).

**Таблиця 3. Органолептичні показники розробленої суміші**

Показник	Суміш п'яти видів зернових пластівців з додаванням		
	родзинки (6%)	яблука сушені (5%)	банани сушені (18%)
Смак	приємний, відповідний, виражений достатньо		приємний, але недостатньо виражений
Запах	приємний, відповідний добавці		
Розжовуваність	добра	добра	відчуються тверді частинки
Консистенція готової страви	однорідна кашоподібна з відчутними включеннями фруктів		
Зовнішній вигляд	привабливий, з жовтими та коричневими краплями		

Також було розраховано харчову цінність розробленої композиції суміші мюслі (табл. 4).

**Таблиця 4. Середній хімічний склад і харчова цінність суміші**

Компонент	Добова потреба	Вміст у 100 г суміші	Інтегральний скор 100 г суміші, %
Білки, г	52	8,51	16,37
Жири, г	53	3,67	6,92
Вуглеводи, г	304	67,93	22,35
Мінеральні речовини, мг			
Кальцій	1100	13,89	1,26
Фосфор	1200	372,53	31,04
Магній	350	111,19	31,77
Залізо	17	6,56	38,59
Цинк	12	4,43	36,92
Вітаміни, мг			
В <sub>1</sub>	1,3	0,34	34,15
В <sub>2</sub>	1,6	0,42	26,25
В-каротин	1,8	0,09	5,0
РР	16	2,84	17,75
С	70	4,92	7,03
Енергетична цінність, ккал	1900,0	338,79	17,83

Аналізуючи наведені дані, можна зробити висновок, що запропонована композиція має не лише високі органолептичні показники, але й досить збалансований хімічний склад. Вживання 100 г суміші покриває добову потребу дорослого населення I групи інтенсивності праці віком 30—39 років (жінки) у білках на 16,4%, жирах — 6,9%, вуглеводах — 22,4%, а також є джерелом фосфору, магнію, заліза, цинку та вітамінів В<sub>1</sub> і В<sub>2</sub>. Добова потреба в енергії покривається на 17,83%.

Отже, використання методів лінійного програмування (зокрема, симплекс методу) надає можливість розробляти рецептурні композиції сумішей харчових концентратів з високими органолептичними показниками, низькою вартістю та калорійністю. При цьому досягається легкість варіювання складу компонентів суміші та швидкість розрахунку необхідного їх співвідношення.

### Висновки

На основі узагальнення теоретичного і практичного матеріалу підтверджено зростаючу популярність сумішей мультизернових харчових концентратів зі збалансованим хімічним складом і подовженим терміном зберігання.

Розглянуто можливість розроблення рецептурних сумішей мультизлакових харчових концентратів з використанням різних видів зернових пластівців і сушених фруктів. Проведено певний ряд досліджень органолептичних, основних фізико-хімічних і технологічних властивостей обраних сировинних компонентів.

Зважаючи на отримані результати досліджень технологічних показників сировинних компонентів, було надано рекомендації щодо складання рецептурних сумішей мультизернових харчових концентратів.

Методами лінійного програмування (симплекс-метод) оптимізовано склад зерно-фруктових сумішей за показниками вартості та калорійності. Запропоновано рецептурну композиції із сировини, наявної на ринку, а також з додаванням різних видів сушених фруктів.

Розрахунок харчової цінності розробленої рецептурної композиції мюслі характеризується підвищеною харчовою цінністю, є хорошим джерелом мінералів і вітамінів.

### Література

- Бажай-Жежерун, С. А. (2020). Зернові пластівці функціонального призначення. *Food Additives. Healthy Man and Human Patient Diet: Proceedings of the IX International Scientific and Practical Internet Conference*, 156—157. Oktan-Print s. r. o.
- Жигунов, Д. О., Мардар, М. Р., Волошенко, О. С., & Брославцева, І. В. (2015). Розробка сумішей на основі зернових пластівців: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Харчові технології, хлібопродукти і комбікорми», 76—78.
- Кордзая, Н. Р., & Ковалів, І. О. (2019). Асортимент батончиків зернових на регіональному ринку. *Товари і ринки*, 1(29), 40—51.
- Чорней, К., & Миколенко, С. (2021). Перспективи вдосконалення рецептурного складу зернових батончиків та аналіз ринку. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях*, 2(8), 127—135.
- Alam, M. S., Kaur, J., Khaira, H., & Gupta, K. (2016). Extrusion and extruded products: Changes in quality attributes as affected by extrusion process parameters: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(3), 445—473. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.779568>.
- Bchir, B., Jean-François, T., Rabatafika, H. N., & Blecker, C. (2017). Effect of pear apple and date fibres incorporation on the physico-chemical, sensory, nutritional characteristics and the acceptability of cereal bars. *Food Science and Technology International*, 24(3), 198—208. <https://doi.org/10.1177/1082013217742752>.
- Chen, J. (2025). Effect of extrusion processing on the structural, functional and physicochemical properties of cereal products. *Journal of Cereal Science*, 110, 103879. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2025.103879>.
- Curtain, F., & Grafenauer, S. (2019). Comprehensive nutrition review of grain-based muesli bars in Australia: An audit of supermarket products. *Foods*, 8(9), 370. <https://doi.org/10.3390/foods8090370>.

- Itagi, H. B. (2025). Rice flakes muesli: A novel nutrient-dense gluten-free product. *Journal of Food Science and Technology*, 62(2), 185—192.
- Kaur, J., Singh, B., & Singh, A. (2023). Effect of extrusion processing on techno-functional properties, textural properties, antioxidant activities, *in vitro* nutrient digestibility and glycemic index of sorghum-chickpea-based extruded snacks. *Journal of Texture Studies*, 54, 21. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12760>.
- Kobus-Cisowska, J., Gramza-Michalowska, A., Kmiecik, D., Flaczyk, E., & Korczak, J. (2013). Mulberry fruit as an antioxidant component in muesli. *Agricultural Sciences*, 4(5B), 130—135. <https://doi.org/10.4236/as.2013.45B022>.
- Kumari, R., Singh, K., Singh, R., Bhatia, N., & Nain, M. S. (2019). Development of healthy ready-to-eat (RTE) breakfast cereal from popped pearl millet. *The Indian Journal of Agricultural Sciences*, 89(5). <https://doi.org/10.56093/ijas.v89i5.89681>.
- Laricheva, K., & Mikhailova, O. (2020). Development of scientifically-based recipe and technology for the production of natural honey-based muesli bar. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 613(1), 012067. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/613/1/012067>.
- Lin, Z., Zeng, M., Sui, Z., Wu, Y., Zhang, H., & Liu, T. (2025). Associations of breakfast cereal consumption with all-cause and cause-specific mortality: a large-scale prospective analysis. *Nutrition Journal*, 24(1). <https://doi.org/10.1186/s12937-025-01109-5>.
- Liu, Y., & Cai, Z. (2024). *Causal relationship of cereal intake and type with cardiovascular disease: Mendelian randomization study* [Preprint].
- Macedo, I. S. M., Oliveira, A. L., & Santos, L. M. (2013). Quality-by-design approach for packaging of granola and muesli products. *Food Packaging and Shelf Life*, 5(1), 45—52.
- Ottobrino, A., Cianciabella, M., Medoro, C., Picariello, A., Oliviero, A., De Sena, V., Predieri, S., & Rossi, M. (2025). Sensory analyses-driven formulation of fruit cereal bars enriched with *Arthrospira platensis* dried powder. *Food Science & Nutrition*, 13(4), e70154. <https://doi.org/10.1002/fsn3.70154>.
- Sumczynski, D., Bubelová, Z., Fišerová, M., & Orsavová, J. (2023). The effect of flake production and *in vitro* digestion on mineral availability in flakes and muesli. *LWT — Food Science and Technology*, 182, 114752. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114752>.
- Tripathi, S. K., & Kumar, R. (2023). A short literature on linear programming problem. *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*, 10(1), e4516. <https://doi.org/10.4108/ew.4516>.
- Tyl, C., Bresciani, A., & Marti, A. (2021). Recent progress on improving the quality of bran-enriched extruded snacks. *Foods*, 10(9), 2024. <https://doi.org/10.3390/foods10092024>.
- Zhou, Y. (2025). Storage stability of berry mueslis with special focus on phenolic compounds. *Journal of Food Composition and Analysis*, 126, 105656. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2025.105656>.

УДК 664.663.9

## THE ROLE OF SOURDOUGH STARTERS IN SHAPING THE QUALITY AND NUTRITIONAL VALUE OF BAKERY AND PASTA PRODUCTS

Ie. Godunko, Yu. Bondarenko, V. Yurchak

*National University of Food Technologies*

---

**Key words:**

*Starter culture  
Lactic acid bacteria  
Yeast  
Bakery products  
Pasta  
Fermentation  
Functional properties*

---

**Article history:**

Received 12.09.2025  
Received in revised form  
26.09.2025  
Accepted 13.10.2025

---

**Corresponding author:**

Yu. Bondarenko

**E-mail:**

[bjuly@ukr.net](mailto:bjuly@ukr.net)

**Citation:** Годунко Є. В., Бондаренко Ю. В., Юрчак В. Г. (2025). Роль заквасок у формуванні якості та харчової цінності хлібобулочних і макаронних виробів. *Наукові праці НУХТ*, 31(5), 218—235. DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-5-18

**ABSTRACT**

---

The role of sourdough as an effective biotechnological tool in modern bread baking, which provides comprehensive improvement of the technological, sensory, and nutritional properties of products was shown in the article. Various types of sourdough are analyzed — traditional (type I) and industrial (types II and III). It is shown that fermentation with sourdough contributes to the formation of a characteristic taste and aroma, increases the volume and porosity of the crumb, slows down staling, and ensures the microbiological stability of bread. Functional aspects are considered separately: fermentation improves the bioavailability of proteins and minerals, reduces the allergenicity and glycemic index of products, and promotes the formation of bioactive compounds with antioxidant and anti-inflammatory properties. The use of non-traditional sources of raw materials for sourdough starters — cereals, legumes, and pseudocereals, which increase nutritional value, improve dough structure, and form a unique sensory profile of products was also highlighted in the article. The importance of type II and III sourdough starters for industrial production was emphasized due to the stability of the microbiota and control of the technological process.

Particular attention was paid to the use of sourdough in the production of gluten-free bakery products. The use of specific strains of microorganisms improved the structure of the crumb, increased the volume and porosity of gluten-free dough, and formed a characteristic taste and aroma that are often lacking in products based on gluten-free raw materials. This contributes to improving the consumer properties of gluten-free products and expands the possibilities for creating functional products for people with celiac disease and gluten intolerance.

The data presented confirm that the use of sourdough ensures the production of high-quality, functional, and safe products that meet modern nutritional requirements and consumer preferences. The scientifically based prospects for the development of the use of sourdough in the manufacture of bakery and pasta products are outlined in the article.

---

DOI: 10.24263/2225-2924-2023-21-5-18

---

## РОЛЬ ЗАКВАСОК У ФОРМУВАННІ ЯКОСТІ ТА ХАРЧОВОЇ ЦІННОСТІ ХЛІБОБУЛОЧНИХ І МАКАРОННИХ ВИРОБІВ

Є. В. Годунко, Ю. В. Бондаренко, В. Г. Юрчак

Національний університет харчових технологій

У статті розглянуто роль закваски як дієвого біотехнологічного інструменту сучасного хлібопекарського виробництва, що забезпечує комплексне покращення технологічних, сенсорних і харчових властивостей виробів. Проаналізовано різні типи заквасок — традиційні (тип I) та промислові (типи II і III), зокрема їх мікробіологічний склад, вплив на процес ферментації тіста й відтворюваність технологічного процесу. Показано, що ферментація на заквасці сприяє формуванню характерного смаку й аромату, підвищенню об'єму і пористості м'якушки, уповільненню черствіння та забезпечує мікробіологічну стабільність хліба. Окремо розглянуто функціональні аспекти: ферментація покращує біодоступність білків і мінералів, зменшує алергенність і глікемічний індекс продуктів, сприяє утворенню біоактивних сполук з антиоксидантними та протизапальними властивостями.

У статті також висвітлено використання нетрадиційних джерел сировини для заквасок — круп'яних, бобових і псевдозернових культур, що підвищує харчову цінність, покращує структуру тіста та формує унікальний сенсорний профіль виробів. Підкреслено значення заквасок типів II і III для промислового виробництва завдяки стабільності мікробіоти та контролю технологічного процесу.

Особлива увага приділена застосуванню закваски у виробництві безглютенових хлібобулочних виробів. Використання специфічних штамів мікроорганізмів дозволяє поліпшити структуру м'якушки, підвищити об'єм і пористість безглютенового тіста, а також сформувати характерний смак та аромат, які часто відсутні у продуктах на основі безглютенової сировини. Це сприяє підвищенню споживчих властивостей безглютенових виробів і розширює можливості створення функціональних продуктів для людей з ціліацією та непереносимістю глютену.

Наведені дані підтверджують, що застосування закваски забезпечує виробництво високоякісних, функціональних і безпечних продуктів, що відповідають сучасним вимогам харчування та споживчих переваг. Стаття окреслює науково обґрунтовані перспективи розвитку застосування заквасок у виготовленні хлібобулочних і макаронних виробів, включно з безглютеновими, для створення продуктів підвищеної харчової цінності та фізіологічної функціональності.

**Ключові слова:** закваска, молочнокислі бактерії, дріжджі, хлібобулочні вироби, макаронні вироби, ферментація, функціональні властивості.

**Постановка проблеми.** Під впливом урбанізації, технологічного прогресу та змін способу життя харчові звички сучасної людини зазнали суттєвої трансформації. У її щоденному раціоні переважають промислово оброблені харчові продукти, які, зазвичай, характеризуються надмірною калорійністю та недостатнім вмістом життєво необхідних нутрієнтів. Такі тенденції харчування розглядаються як

один із факторів зростання поширеності неінфекційних хронічних захворювань і метаболічних порушень (Mendonca, 2023; Vermeulen, Park, Khoury, & Béné, 2020). Зважаючи на це, у харчовій промисловості посилюється інтерес до застосування біотехнологічних процесів, спрямованих на підвищення функціональної та харчової цінності оброблених харчових продуктів. До таких процесів належить мікробна біотрансформація компонентів харчових продуктів, у ході якої мікроорганізми модифікують хімічний склад сировини, покращуючи її поживні, сенсорні та фізіологічні властивості (Balarabe, 2017; Dhiman, Kaur, Thakur, Singh, & Tripathi, 2025).

Найдавнішим біотехнологічним процесом із застосуванням мікроорганізмів (молочнокислих бактерій і дріжджів) у виробництві харчових продуктів, зокрема хлібобулочних, вважається ферментація на заквасках. В останні роки традиційне виробництво хліба з використанням закваски здобуває нову популярність у зв'язку зі зростаючим попитом споживачів на більш натуральні, смачні та корисні продукти (Islam, & Islam, 2024).

Застосування заквасок у виробництві макаронних виробів розглядається як інноваційний підхід, що дозволяє підвищити їхні функціональні властивості, а також сприяє ефективній переробці виробничих відходів, досягненню цілей сталого розвитку (Montemurro, Coda, & Rizzello, 2019).

З огляду на це актуальним є здійснення аналізу сучасних наукових досліджень, спрямованих на поглиблення розуміння взаємозв'язку між ферментацією на заквасці та змінами хімічного складу, підвищення засвоюваності, харчової цінності, а також формуванням смако-ароматичних властивостей як традиційних хлібобулочних і макаронних виробів, так і спеціального призначення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** До початку ХХ ст. у виробництві хлібобулочних виробів закваска була природним розпушувачем тіста, який забезпечував формування об'єму хліба та розвиток пористої структури його м'якучки. Такі закваски отримували внаслідок процесів спонтанного бродіння суміші борошна та води, зумовлених діяльністю природного мікробного консорціуму, що міститься у сировині та надходить із навколишнього середовища (Calvert et al., 2021).

Бродіння суміші борошна та води розпочинається з розвитку автохтонних, неспецифічних для закваски, бактерій і диких дріжджів. На наступному етапі активізується ріст молочнокислих бактерій, переважно представників родів *Lactobacillus*, *Leuconostoc*, *Pediococcus* та *Weissella* (Zheng et al., 2020). Їхня метаболічна діяльність зумовлює інтенсивне підкислення середовища, що пригнічує розвиток сторонньої мікрофлори. У подальшому формується й стабілізується мікробіоценоз, характерний для зрілих заквасок. Основну частку мікрофлори становлять специфічні види молочнокислих бактерій — *Lactobacillus brevis*, *L. fermentum*, *L. paralimentarius*, *L. plantarum*, *L. sanfranciscensis*, *Pediococcus pentosaceus* та кислотостійкі дріжджі — *Candida milleri*, *Kazachstania humilis*, *Saccharomyces exiguus* (Wang et al., 2021; Arora et al., 2021).

Стабільна структура мікробіоти у заквасці формується внаслідок тривалої та безперервної колонізації, попри початкову складність складу мікроорганізмів, які беруть участь у ферментації. Зазвичай, це відбувається внаслідок від 5 до 10 циклів поновлення (інокуляції), коли в заквасці встановлюється збалансований і

стійкий симбіоз дріжджів і молочнокислих бактерій (співвідношення між якими може варіювати від 10:1 до 100:1) (De Vuyst et al., 2023).

Відбувається природний мікробіологічний відбір — виживають лише ті види мікроорганізмів, які найкраще адаптовані до конкретних умов поживного середовища (вологість, температура, кислотність, наявні субстрати) (Minervini, Celano, Lattanzi, De Angelis, & Gobbetti, 2016; Chiva et al., 2020).

У результаті симбіозу молочнокислих бактерій і дріжджів у заквасці накопичуються вуглекислий газ та органічні кислоти, завдяки яким вона виконує функції біологічного розпушувача та підкислювача тістового напівфабрикату. Інші метаболіти, що виробляються молочнокислими бактеріями та дріжджами, надають хлібу специфічного аромату й смакового профілю, покращуючи таким чином його сенсорні властивості (Gobbetti et al., 2019; De Vero, Iosca, Gullo, & Pulvirenti, 2021; Gabriele, Arouna, Arvay, Longo, & Pucci, 2023).

Така закваска є безперервно поновлюваним напівфабрикатом, виробничий об'єм якого підтримується шляхом інокулювання нової суміші борошна і води частиною зрілої закваски — процесом, відомим як зворотне поновлення (Van Kerrebroeck, Maes, & De Vuyst, 2017).

Оскільки спонтанна закваска формується з мікробіоти, природно присутньої у сировині та навколишньому середовищі, у ній встановлюється локальне мікробне різноманіття, яке безпосередньо впливає на смакові та ароматичні характеристики хліба, надаючи йому індивідуальності, складності смаку й аромату та формуючи його автентичність (Carbonetto et al., 2020; Bigey et al., 2021; Ripari, & Berardi, 2016).

З появою наприкінці XIX ст. промислового виробництва хлібопекарських дріжджів їхнє застосування у хлібопеченні стало масовим. Це значно спростило технологічний процес, і вже до середини XX ст. дріжджі майже повністю витіснили закваску з промислового виробництва. Використання закваски як природного розпушувача збереглося переважно у ремісничому (крафтовому) хлібопеченні, а також у технологіях житнього хліба, де підкислення тіста є необхідним для інактивації амілаз (Cappelle, Guylaine, & Gänzle, 2023; Gänzle, & Zheng, 2019).

Промислове обладнання для великомасштабного виробництва житньої закваски вперше було встановлено на території країн колишнього Радянського Союзу і стало поширеним в інших частинах Центральної, Північної та Східної Європи у другій половині XX ст. (Gänzle, Qiao, & Bechtner, 2023).

Протягом останніх 150 років хлібопекарська галузь зазнала справжньої технологічної революції. Невеликі ремісничі пекарні поступилися місцем високотехнологічним виробництвам, орієнтованим на ефективність і масштабність. Промислове моновиробництво замінило пекарні з широким асортиментом, адже хліб можна було виготовляти швидше та з меншими витратами. Продуктивність стала основним критерієм успіху, що сприяло розробленню нових технологічних рішень для задоволення зростаючих ринкових потреб (Decock, & Cappelle, 2005).

Одним із наслідків цієї еволюції стало зменшення уваги до формування смаку й аромату хліба, що традиційно забезпечувалися тривалими процесами ферментації. Проте, починаючи з 1990-х років, розпочалася систематична дослідницька діяльність, спрямована на переосмислення ролі заквасок у хлібопекарському виробництві. Спершу увага дослідників була зосереджена на технологічних ефектах

ферментації, зокрема її впливи на смак, аромат, реологічні властивості тіста й термін зберігання виробів (уповільнення черствіння, запобігання мікробіальному псуванню) (Aroga et al., 2021). Однак у сучасних дослідженнях закваску розглядають не лише як біотехнологічний агент для розпушення та підкислення тіста, а й як функціональний інгредієнт, що сприяє підвищенню харчової та фізіологічної цінності хлібобулочних виробів. Традиційно для приготування заквасок використовують пшеничне або житнє борошно. Проте зі зростанням попиту на функціональні та безглютенкові продукти постає потреба розширення сировинної бази шляхом залучення нетрадиційних джерел ферментації. З огляду на зростаючу тенденцію щодо поширення використання заквасок деякі нещодавні дослідження були спрямовані на їх використання також у виготовленні макаронних виробів.

**Метою дослідження** є узагальнення даних щодо ролі заквасок у формуванні якості та харчової цінності виробів, а також оцінка ефективності застосування заквасок з нетрадиційної сировини для створення хлібобулочних виробів спеціального призначення та вдосконалення технології макаронних виробів.

**Матеріали і методи.** Оглядове дослідження проведено з метою ознайомлення із сучасними підходами щодо отримання та застосування заквасок у технологіях хлібобулочних і макаронних виробів на підставі систематизації та порівняльного аналізу інформації наукових публікацій, що розміщені в міжнародних база даних, включаючи Scopus, Science direct, PubMed, ISI (Web of Science) і знайдених пошуковими системами для дослідників та науковців Google Scholar, Research Gate.

**Результати дослідження.** Ферментація на заквасці є однією з найстаріших харчових біотехнологій, яка була вивчена та нещодавно перевідкрита завдяки своєму впливу на сенсорні, структурні, поживні властивості й термін придатності хлібобулочних виробів на заквасці.

Технологічний вплив закваски на смак, текстуру, термін зберігання та харчову цінність хліба залежить від біоконверсії компонентів борошна як на стадії приготування закваски, так і на стадії приготування тіста. При цьому ефект від застосування закваски полягає в поєднанні мікробного метаболізму з активністю ферментів борошна. Метаболізм мікробіоти закваски й активність ферментів злаків взаємозалежні. Тривалий час ферментації закваски дозволяє ендогенним ферментам зробити суттєвий внесок у біохімічні перетворення на стадії замішування тіста (Gänzle, 2014; Gobbetti et al., 2016).

Хліб на заквасці має складний і багатий смаковий профіль, що формується під час мікробної ферментації. Основними джерелами ароматичних і смакових сполук є метаболічна активність молочнокислих бактерій (переважно *Lactobacillus*) і дріжджів, а також ферментативні процеси, реакції Маяра та окиснення ліпідів.

Під час бродіння суміші борошна й води активуються ендогенні ферменти, які запускають складні біохімічні процеси. Амілолітичні ферменти розщеплюють крохмаль на мальтозу та мальтодекстрини, а протеази — білки на олігопептиди та вільні амінокислоти, одночасно послаблюючи глютену мережу. Оптимальні умови для цих реакцій створюються внаслідок підкислення середовища молочнокислими бактеріями, які ферментують цукри до молочної й оцтової кислот. Молочнокислі бактерії також здійснюють вторинний протеоліз: їхні пептидази гідро-

лізують олігопептиди, сприяючи накопиченню амінокислот у заквасці. Ці сполуки збагачують середовище поживними речовинами та служать попередниками ароматичних компонентів, що формують характерний смак і аромат хліба (De Vuyst, Comasio, & Kerrebroeck, 2023).

Під час бродіння закваски утворюються нелеткі органічні кислоти (молочна, оцтова, фенілмолочна, фенілоцтова), що формують кислий присмак, і леткі сполуки (альдегіди, спирти, кетони, ефіри, сполуки сірки), які забезпечують ароматичне різноманіття хліба. Тип мікроорганізмів, температура та рН ферментації істотно впливають на якісний і кількісний склад цих сполук. Різні штами лактобактерій і дріжджів створюють різні ароматичні профілі: одні — переважно спиртові та молочнокислі ноти, інші — оцтовокислі, ефірні чи горіхові відтінки. Загалом, поєднання лактобактерій і дріжджів забезпечує найскладніший ароматичний профіль та підвищує сенсорну привабливість хліба, зокрема його смак і аромат. Тому ферментація на заквасці є важливим чинником формування унікального аромату, смаку й автентичного характеру хлібобулочних виробів (Cizeikiene, Juodeikiene, Paskevicius, & Bartkiene, 2013; Mantzourani et al., 2019; Rizzello, Nionelli, Coda, Di Cagno, & Gobbetti, 2010; Samapundo, Devlieghere, Vroman, & Eeckhout, 2017).

Бродіння на заквасці істотно впливає на реологічні властивості тіста та текстуру хліба. Вплив проявляється на двох напрямках — у самій заквасці та в тісті після її внесення. Під дією органічних кислот, що утворюються під час ферментації, відбувається частковий протеоліз глютенів білків. Це сприяє формуванню м'якушки з більшими та рівномірнішими альвеолами, кращою здатністю утримувати газ і твердішою скоринкою. Крім того, молочнокислі бактерії роду *Lactobacillus* (*Lactobacillus sanfranciscensis*, *Lactobacillus plantarum* та *Lactobacillus brevis*) продукують органічні кислоти, екзополісахариди та інші метаболіти, що впливають на текстуру м'якушки, покращуючи її еластичність. Екзополісахариди покращують в'язкопружні властивості тіста, сприяють збільшенню об'єму хліба та сповільнюють його черствіння під час зберігання (Nutter, Saiz, & Iurlina, 2019; Park, Jung, & Jeon, 2006; Siepmann, Sousa de Almeida, Waszczynskyj, & Spier, 2019; Zhao et al., 2020).

Молочнокислі бактерії, що беруть участь у ферментації заквасок, утворюють біоактивні сполуки з антимікробною дією — коротколанцюгові жирні кислоти, органічні кислоти, пептиди, діацетил і перекис водню. Ці речовини ефективно пригнічують розвиток патогенних бактерій і пліснявих грибів, що сприяє підвищенню мікробіологічної стабільності хліба. Ефективність залежить від виду лактобактерій: штами *Lactobacillus acidophilus*, *L. casei*, *L. plantarum*, *L. amylovorus* та *L. rossiae* проявили найвищу антимікробну активність і здатність сповільнювати розвиток пліснявих грибів. Крім того, закваски, що продукують екзополісахариди, поряд зі зниженням швидкості втрати вологи, уповільнюють ретроградацію крохмалю, що сприяє довшому збереженню свіжості виробами. Використання заквасок у технології хліба забезпечує природне подовження терміну зберігання та свіжості виробів, дозволяючи відмовитися від синтетичних консервантів і поліпшувачів (Arrijoja-Bretón, Mani-López, Palou, & López-Malo, 2020; Coda et al., 2008; Luz, Saladino, Luciano, Mañes, & Meca, 2017; Sakandar et al., 2019; Shehata, Badr, Sohaimy, Asker, & Awad, 2019).

Останнім часом наукові дослідження також зосередилися на функціональних властивостях ферментації закваски.

Ферментація на заквасці знижує глікемічний індекс (ГІ) хліба, уповільнюючи засвоєння крохмалю через утворення органічних кислот, насамперед молочної та оцтової. ГІ пшеничного хліба на заквасці становить близько 54, що відносить його до продуктів із низьким глікемічним індексом, на відміну від дріжджового, для якого ГІ 71. Завдяки цьому спостерігається зниження постпрандіальної глюкозної та інсулінемічної реакції і посилюється відчуття ситості після споживання. Ферментація сприяє зниженню глікемічного індексу хліба завдяки розщепленню складних вуглеводів, модифікуючи їхню структуру та уповільнюючи ферментативне розщеплення вуглеводів в організмі і накопиченню органічних кислот, які уповільнюють всмоктування глюкози. Це сприяє поступовому засвоєнню глюкози, що має важливе значення в раціональному харчуванні та профілактиці метаболічних порушень, зокрема діабету 2-го типу. Хлібобулочні виробни, виготовлені із застосуванням заквасок з нетрадиційної сировини, можуть бути більш придатними для раціону осіб із діабетом і тих, хто контролює вуглеводний обмін. Дослідження підтверджують, що молочнокислі бактерії, залучені до ферментації закваски, продукують біоактивні пептиди з антиоксидантною дією. Ферментація підвищує біодоступність мінеральних речовин завдяки зниженню вмісту фітатів, які зв'язують кальцій, залізо, цинк та інші мікроелементи. Під дією молочнокислих бактерій зменшується рН, що активує ендемічну фітазу злаків і сприяє розщепленню фітинової кислоти, збільшуючи таким чином біодоступність мінералів, амінокислот і білків. Завдяки активності ферментів і пептидаз лактобактерій відбувається глибший протеоліз, що підвищує засвоюваність білків і зменшує алергенність злакових білків. Деякі дослідження показують до 16% підвищення засвоюваності білка у хлібі на заквасці порівняно з хлібом на дріжджах. У деяких випадках тривала ферментація дозволяє повністю гідролізувати глютен, роблячи продукт безпечним для людей із целиакією. Заквасочна мікрофлора гідролізує харчові волокна та може утворювати екзополісахариди з пребіотичними властивостями, які сприяють розвитку корисної кишкової мікробіоти. Ферментація на заквасці є ефективним біологічним способом зниження вмісту акриламідів — потенційного канцерогену, що утворюється під час випікання. Вона виявила ефективність у зменшенні його кількості в пшеничному, житньому та цільнозерновому хлібі. Таким чином, хліб на заквасці є не лише більш поживним, а й фізіологічно кориснішим і безпечнішим продуктом порівняно з хлібом, виготовленим на дріжджах (Ameur et al., 2019; Katina, Poutanen, & Gobbetti, 2023; Ma et al., 2021; Nionelli, & Rizzello, 2016; Poutanen, Flander, & Katina, 2009; Wang, & Wang, 2024; Zhou, 2018).

Упродовж останніх десятиліть хліб на заквасці знову набув популярності серед споживачів. Його виготовлення нині активно здійснюється не лише у ремісничих пекарнях, а й на промислових підприємствах різного масштабу. У країнах Європи частка хліба, виробленого із застосуванням заквасок, становить від 30 до 50% загального обсягу продукції (Gobbetti et al., 2016).

Для промислового виробництва хлібобулочних виробів застосування заквасок спонтанного бродіння має певні обмеження. Зокрема, такі закваски характеризу-

ються повільнішою та менш передбачуваною динамікою ферментації, яка значною мірою залежить від умов навколишнього середовища (температури, вологості, складу сировини). Крім того, у процесі їхнього ведення існує підвищений ризик контамінації небажаними мікроорганізмами, що може негативно впливати на якість і стабільність кінцевого продукту (Agora et al., 2021).

На протипагу цьому, інокульовані закваски, отримані шляхом внесення специфічно підібраних штамів дріжджів і молочнокислих бактерій, забезпечують вищий рівень контролю над процесом ферментації. Такий підхід дозволяє досягати швидшого та більш відтворюваного бродіння, зменшує ризик мікробіологічного забруднення та підвищує технологічну безпечність і стабільність процесу. Завдяки цьому інокульовані закваски є особливо ефективними для промислових умов, де необхідно підтримувати сталі параметри процесу й контрольований час ферментації (Lima et al., 2023).

Водночас слід зазначити, що інокульовані закваски, зазвичай, мають менш складний сенсорний профіль порівняно зі спонтанними, що зумовлено нижчим мікробним різноманіттям. Крім того, залежність від комерційних культур підвищує вартість виробництва та обмежує вплив локальної мікробіоти, що може знижувати адаптивність таких заквасок до регіональних умов і потенційно зменшувати унікальність смакових характеристик хліба (Calvert et al., 2021).

Сьогодні науково прийнята класифікація закваски поділяє її на типи залежно від інокулянту й технології отримання.

Закваска типу I відноситься до традиційної закваски, яка потребує постійного розмноження шляхом регулярного освіження свіжим борошном та водою. Закваска цього типу — це суміш борошна та води, що піддається інкубації за температури від 20 до 30 °C, інокульована попередньо ферментованою закваскою для підтримки високої метаболічної активності мікроорганізмів (зворотнім поновленням). Зазвичай, рН такої закваски у діапазоні від 3,8 до 4,5. Така закваска характеризується як розпушувач. За її використання у тісто не вносять дріжджі *S. cerevisiae*. Закваску типу I можна класифікувати як тип Ia, що містить чисті культури мікроорганізмів різного походження; тип Ib, що оновлюється щодня та ферментується спонтанно, та тип Ic, що походить з тропічних країн з вищою температурою ферментації. (De Vuyst, Comasio, & Van Kerrebroeck, 2023; Lima et al., 2023).

Процес отримання та ведення закваски цього типу вимагає як часу, так і кваліфікованого поводження, що створює проблеми для стандартизації виробництва й економічної ефективності (Simplicio de Medeiros et al., 2025).

Закваски типу I, зазвичай, виготовляються та зберігаються в ремісничих пекарнях. Сьогодні практика ремісничого хлібопечення часто включає жорсткий та ефективний контроль умов ферментації (температура зберігання та навколишнього середовища, тривалість періоду ферментації між оновленнями, співвідношення між стиглою закваскою та поживною сумішшю для її оновлення та кількість оновлення) і, таким чином, мікробіоти закваски, тож переважна більшість пекарень мають закваски, що характеризуються наявністю специфічної для закваски мікробіоти, стабільне підтримання якої потребують добре контрольованих умов виробництва. Найчастіше до закваски типу I відносять закваски, отримані внаслідок спонтанного бродіння. Виробництво хліба на спонтанній заквасці має культурне

та географічне значення, відображаючи регіональну ідентичність (Fekri et al., 2025; Tomić et al., 2023).

Попри розвиток промислових технологій, багато європейських пекарень, особливо тих, що спеціалізуються на житньому хлібі, і досі використовують традиційно ферментовані закваски, які залишаються метаболічно активними протягом десятиліть. Це забезпечується шляхом регулярного оновлення заквасок — додавання свіжого борошна та води через певні проміжки часу, що підтримує сталість мікробного консорціуму. Ремісничє хлібопечення на таких заквасках формує різноманітний асортимент традиційного хліба, притаманного певним країнам і регіонам. Так, численні пшеничні хлібобулочні вироби є характерними для Середземноморського регіону, затоки Сан-Франциско та Південної Америки, тоді як житні, ячмінні хлібобулочні вироби переважають у Німеччині, Центральній і Східній Європі та Скандинавії (Brandt, 2019; De Vuyst, & Neysens, 2005). Особливо вагому роль у збереженні традицій натуральної ферментації відіграють Італія та Франція, де історично склалася багата культура виготовлення хліба на заквасці, що поєднує ремісничі техніки та глибоке розуміння мікробіологічних процесів. Ряд традиційних заквасок I типу внаслідок унікальності своєї мікробіоти, сформованої багаторічною практикою їх ведення, на сьогодні є юридично захищеними з точки зору їх походження, вихідної сировини та географічної приналежності. Типовими прикладами є така закваска, як Сан-Франциско та різні італійські закваски, наприклад, Pane di Altamura, та Pane di Matera. (Brandt, 2019; De Vuyst, & Neysens, 2005).

Цілеспрямоване використання специфічних штамів мікроорганізмів забезпечує керовану ферментацію, що надає кінцевому продукту бажаних сенсорних, технологічних, функціональних і поживних властивостей. Прикладами таких контрольованих систем є закваски типів II, III та IV. Закваски типу II характеризуються високою концентрацією активних мікроорганізмів без зворотного поновлення, тип III — це висушена форма закваски типу II, а тип IV поєднує риси заквасок I та II типів (Pérez-Alvarado et al., 2022).

Закваска типу II передбачає промислову інокуляцію адаптованих культур як підкислювачів тіста. Закваска типу II отримується в результаті тривалої одноетапної ферментації, яку здійснюють специфічні штами кислотостійких молочнокислих бактерій, такі як *Lactobacillus amylovorus*, *Levilactobacillus brevis*, *Limosilactobacillus fermentum*, *Lactiplantibacillus plantarum*, *Limosilactobacillus reuteri* та *Lactobacillus rossiae*. У деяких випадках до складу також можуть входити дріжджі. В таких заквасках співвідношення молочнокислих бактерій і дріжджів становить 100:1 для отримання специфічних характеристик випечених виробів і пригнічення росту небажаної мікробіоти. Ферментація проводиться за відносно високих температур — понад 30 °C (30—37 °C), що сприяє швидкому підкисленню середовища та формуванню бажаних органолептичних властивостей. Такі закваски виконують функцію підкислювача та носія ароматичних речовин, проте не забезпечують достатнього газоутворення, тому для розпушування тіста в разі використання заквасок типу II додають дріжджі *Saccharomyces cerevisiae*. Промислове застосування цього типу пояснюється спрощенням технологічного процесу — усувається потреба в багатоетапному приготуванні, характерному для заквасок типу I. Закваски типу II можуть зберігатися в холодильних умовах та мають  $\text{pH} \leq 3,5$ .

Ці закваски доступні в рідкому або пастоподібному стані (Pérez-Alvarado et al., 2022; Brandt, 2019; De Vuyst, Comasio, & Van Kerrebroeck, 2023; Lima et al., 2023).

Закваска типу III є зневодненою формою закваски типу II, отриманою шляхом розпилювального або сублимаційного сушіння. Це готові до використання закваски не є метаболічно активними, що відрізняє їх від заквасок типу II. У процесі сушіння мікроорганізми переходять у стан анабіозу, а перед використанням потребують реактивації через ресуспендування водою. Такий тип заквасок особливо поширений у великомасштабному виробництві, де його застосовують у вигляді сухих преміксів завдяки зручності зберігання, транспортування й дозування. Водночас кількість життєздатних клітин у готовому продукті істотно залежить від умов сушіння, температури та часу процесу. У таких заквасках переважають стійкі до висушування види молочнокислих бактерій, зокрема *Pediococcus pentosaceus*, *Lactiplantibacillus plantarum* та *Levilactobacillus brevis*. Порівняно зі свіжими заквасками, закваска типу III є зручнішою у використанні, має триваліший термін зберігання, кращу мікробіологічну стабільність і нижчу схильність до контамінації, що робить її поширеним типом заквасок для сучасного промислового застосування (De Vuyst, Comasio, & Van Kerrebroeck, 2023; Lima et al., 2023).

У виготовленні заквасок типу II та III застосовують чітко підібрані чисті культури молочнокислих бактерій і дріжджів, які комерційно доступні у вигляді заморожених та ліофілізованих монокультур або ліофілізованих змішаних культур.

Закваска типу IV являє собою комбінований варіант, отриманий шляхом поєднання властивостей заквасок типу I та II. Її можна розглядати як лабораторну модель, яка об'єднує біологічне різноманіття спонтанних культур типу I з керованістю процесу ферментації, притаманною типу II.

Для забезпечення стабільного й відтворюваного процесу ферментації сучасна хлібопекарська промисловість орієнтується на ідентифікацію, оптимізацію та стандартизацію заквасок типів II і III, які є найбільш придатними для автоматизованих ліній виробництва (Pérez-Alvarado et al., 2022). Водночас закваска типу I, хоча й вважається менш стабільною, трудомісткою у виробництві, залишається об'єктом активних наукових досліджень, оскільки відзначається високим мікробним різноманіттям і слугує моделлю для вивчення мікробіому ферментованих продуктів (De Vuyst et al., 2023). На сьогодні існує велика колекція оригінальних та автентичних за мікробіологічним складом хлібопекарських заквасок типу I, які зберігаються у спеціально створених бібліотеках заквасок. До прикладу деякі з таких заквасок зберігаються в бібліотеці заквасок Puratos.

Сьогодні у всьому світі технологія закваски широко використовується і вважається найкращим способом виготовлення хліба та інших хлібобулочних виробів з унікальними смаками й тривалим терміном зберігання.

Попит на великомасштабне виробництво закваски зростає через зростання інтересу споживачів до здорових, натуральних продуктів. У 2020 році світовий ринок закваски оцінювався в 2,19 мільярда доларів США, з очікуваним річним темпом зростання 8% до 2030 року. Великі хлібопекарські компанії інтегрували продукти на заквасці у свої портфелі, щоб задовольнити споживчий попит (Lima et al., 2023).

Традиційно при виготовленні хліба використовують закваски з пшеничного чи житнього борошна. Водночас з ростом попиту на функціональні та безглютеніві

продукти виникає необхідність розширити сировинну базу і залучати нетрадиційні джерела ферментації. До нетипових компонентів заквасок дедалі частіше належать борошно вівсяне, гречане, рисове, пшоняне та борошно бобових культур. Зернобобові багаті на білок, харчові волокна, вітаміни та мінеральні речовини, що дозволяє збагачувати хлібобулочні вироби цінними нутрієнтами.

Використання заквасок на основі нетрадиційних культур є перспективним напрямом розвитку хлібопекарських технологій, який забезпечує низку функціональних і технологічних переваг (Cheliabiieva, & Sosedova, 2018; Conte, 2018).

Закваски з круп'яних, бобових і псевдозернових культур сприяють покращенню структури тіста, оскільки активна ферментаційна діяльність мікроорганізмів знижує рН середовища й активізує протеолітичні ферменти. Це зумовлює часткове розщеплення білкових фібрил, оптимізує формування клейковинного каркасу, підвищує еластичність тіста та забезпечує рівномірну пористу структуру й більший об'єм готових виробів, порівняно з використанням цієї сировини у неферментованому стані (Boukid, Zannini, Carini, & Vittadini, 2019; Perri et al., 2020; Rizzello, Calasso, Campanella, De Angelis, & Gobbetti, 2014).

У процесі ферментації в заквасках з нетрадиційних культур інтенсифікуються біохімічні реакції, що призводить до накопичення біологічно активних сполук, зокрема поліфенолів і флавоноїдів. Завдяки антиоксидантним властивостям ці сполуки уповільнюють окисні процеси, покращують стабільність ліпідів і подовжують термін зберігання хлібобулочних виробів (Boukid, Zannini, Carini, & Vittadini, 2019; Rizzello, Calasso, Campanella, De Angelis, & Gobbetti, 2014; Coda, Cagno, Gobbetti, & Rizzello, 2014).

Закваски, отримані з пророщених зернових і бобових культур, характеризуються підвищеною активністю амілаз, протеаз і фітаз, що сприяє утворенню біоактивних пептидів з антиоксидантною та протизапальною дією (Pal et al., 2016; Oghbaei, & Prakash, 2016).

Ферментація також забезпечує зниження вмісту антипоживних сполук, що містяться в цій сировині, таких як фітати, таніни, інгібітори протеаз і лектини, завдяки зниженню рН середовища й активації ендогенних ферментів, які каталізують їх розщеплення (Coda, Cagno, Gobbetti, & Rizzello, 2014). Так, під час ферментації борошна з нуту та сочевиці вміст фітинової кислоти зменшується, що підвищує біодоступність мікроелементів, зокрема заліза та цинку (Pal et al., 2016).

Однією з основних переваг заквасок з бобових культур є підвищення білкової цінності хлібобулочних виробів, що особливо актуально в умовах зростання попиту на продукти здорового харчування. Так, додавання 30% ферментованого борошна бобів фаба до рецептури пшеничного хліба збільшує вміст білка з 11,6% до 16,5% та підвищує його засвоюваність на 9%, що пов'язано зі зниженням концентрації антипоживних компонентів (Coda, Varis, Verni, Rizzello, & Katina, 2017).

Бобові культури, такі як горох, нут, сочевиця, соя та квасоля, є цінним джерелом високоякісного білка, клітковини, мінеральних речовин і біоактивних сполук, а тому їх використання у складі заквасок дає змогу створювати функціональні хлібобулочні вироби підвищеної поживної цінності (Boukid, Zannini, Carini, & Vittadini, 2019; Rizzello, Calasso, Campanella, De Angelis, & Gobbetti, 2014). Зокрема,

сочевиця вирізняється високим вмістом білка, поліфенолів і природних антиоксидантів, що робить її перспективною сировиною для виробництва заквасок.

Інтеграція заквасок з бобових культур у хлібопекарське виробництво сприяє адаптації нетрадиційних видів сировини, покращенню ферментативних процесів у тісті та формуванню вираженого ароматичного профілю виробів. Використання молочнокислих бактерій, таких як *Lactobacillus plantarum*, *Lactococcus lactis* і *Levilactobacillus brevis*, у ферментації борошна з амаранту, гречки, кіноа чи нуту сприяє накопиченню  $\gamma$ -аміномасляної кислоти, що має антигіпертензивні та нейропротекторні властивості, а також покращує антиоксидантну активність і структурно-механічні характеристики тіста (Curiel et al., 2015). Бактерії *L. plantarum* та *L. brevis* також знижують рівень олігоцукридів типу рафінози, завдяки чому хліб стає більш легкозасвоюваним. Закваски на основі бобових культур загалом підвищують вміст біоактивних сполук, оптимізують ферментативні процеси, покращують текстуру й органолептичні властивості виробів, водночас знижуючи рівень фітинової кислоти та інгібіторів трипсину, що забезпечує кращу біодоступність поживних речовин (Boukid, Zannini, Carini, & Vittadini, 2019; Rizzello, Calasso, Campanella, De Angelis, & Gobbetti, 2014).

Випікання безглютенового хліба залишається складним технологічним завданням, оскільки відсутність глютену призводить до порушення структури тіста та погіршення текстури виробів (Conte, 2018). Закваски з нетрадиційних безглютенових культур дозволяють компенсувати відсутність клейковини за рахунок мікробіологічних і біохімічних механізмів.

Для приготування безглютенового тіста використовують закваски, виготовлені на основі рисового, кукурудзяного, гречаного, соргового або амарантового борошна, в яких домінують молочнокислі бактерії (*Lactobacillus*, *Lactiplantibacillus*, *Leuconostoc*) та дикі дріжджі. Такі закваски покращують в'язкість, пластичність і вологоутримувальну здатність тіста, знижують потребу в гідроколоїдах (ксантановій чи гуаровій камеді) (Hernández-Figueroa, Mani-López, Palou, & López-Malo, 2023).

Доведено, що використання рисово-нutowої закваски покращує об'єм, пористість та еластичність м'якушки безглютенового хліба, а також уповільнює черствіння (Keramari, 2024). Ферментація сприяє кращій клейстеризації крохмалю, утворенню тонкої рівномірно забарвленої скоринки, зменшенню бобового присмаку та формуванню нейтральнішого, «пшеничного» смаку. Деякі штами, зокрема *Lactobacillus fermentum* та *Pediococcus pentosaceus*, здатні частково гідролізувати глютен, що знижує його алергенність і розширює потенційне коло споживачів (Hernández-Figueroa, Mani-López, Palou, & López-Malo, 2023). Крім того, екзополісахариди, синтезовані молочнокислими бактеріями, виконують роль своєрідного «структурного клею», покращуючи газоутримувальну здатність тіста й об'єм хліба (Ramos, 2021).

Ферментація зернової сировини супроводжується акумуляцією білкових компонентів, амінокислот, пептидів і вітамінів групи B, а також частковим гідролізом крохмалю та клітковини, що підвищує біодоступність поживних речовин. Безглютеновий хліб на заквасці має нижчий глікемічний індекс, що є перевагою для осіб із цукровим діабетом або тих, хто контролює рівень глюкози в крові.

Таким чином, ферментація зернових і бобових культур є ефективним біотехнологічним методом покращення поживних, структурних і сенсорних характеристик хлібобулочних виробів.

Зростаючий попит споживачів на продукти зі збалансованим харчовим профілем і функціональними властивостями стимулює дослідження інновацій у виробництві макаронних виробів. Традиційний процес виробництва макаронних виробів не включає етап ферментації. Однак нещодавно було запропоновано включати в рецептуру макаронних виробів інгредієнти (борошно бобових культур), ферментовані молочнокислими бактеріями, спрямовані на покращення харчових і функціональних властивостей цього продукту та збагачення комерційних пропозицій продуктами з новими сенсорними профілями. Використання закваски для збагачення макаронних виробів досліджувалося з кількох аспектів, включаючи збагачення вітаміном В, зниження засвоюваності крохмалю та вміст глютену. Ферментація сприяла покращенню не лише харчового профілю, але й технологічних характеристик збагачених макаронних виробів. Ферментація псевдозлаків і борошна з бобових за допомогою молочнокислих бактерій призвела до загального підвищення харчової цінності шляхом збільшення вмісту корисних для здоров'я сполук та зменшення антипоживних речовин. При використанні для виготовлення макаронних виробів ферментоване борошно, отримане шляхом спонтанного бродіння або з використанням відібраних штабів молочнокислих бактерій, висушують, подрібнюють та включають у рецептуру макаронних виробів від 10% до 100%. Традиційне макаронне борошно та нетрадиційні види борошна, що піддавалися ферментативній обробці, також рекомендовано використовувати в рецептурі сирих макаронних виробів (листи для лазаньї) як природний консервант, що запобігає їх мікробіологічному псуванню. Ферментація молочнокислими бактеріями в макаронному виробництві є інструментом для перероблення відходів макаронного виробництва. Деформовані макаронні вироби та їх крихта, що утворюється внаслідок технологічних операцій, подрібнюються, змішуються з водою та ферментуються молочнокислими бактеріями. Отримана закваска висушується, подрібнюється та використовується у виготовленні макаронних виробів як функціональний інгредієнт (Montemurro, Coda, & Rizzello, 2019; Torres, Frias, Granito, Guerra, & Vidal-Valverde, 2007; Torres, Frias, Granito, & Vidal-Valverde, 2007; Capozzi et al., 2012).

### **Висновки**

Ферментація на заквасці є однією з найдавніших і водночас актуальних біотехнологій у хлібопекарській галузі, адже забезпечує комплексне покращення технологічних, сенсорних і харчових властивостей виробів. Використання заквасок сприяє формуванню багатого смаково-ароматичного профілю, підвищенню об'єму та пористості м'якушки, подовженню терміну зберігання й підвищенню мікробіологічної стабільності хліба. У макаронному виробництві процеси ферментації розглядаються як інноваційний підхід покращення харчової та функціональної цінності виробів. Зростаючий попит на натуральні й безглютенові продукти, що є виробами спеціального призначення, стимулює використання нетра-

диційних джерел сировини для заквасок, включно з круп'яними, бобовими та псевдозерновими культурами, що дозволяє збільшити харчову цінність, покращити структуру тіста й сформувати унікальний сенсорний профіль виробів.

Ферментація на заквасці також підвищує біодоступність білків і мінералів, знижує глікемічний індекс, зменшує алергенність і сприяє утворенню біоактивних сполук з антиоксидантними та протизапальними властивостями, що робить хліб і макаронні вироби більш функціональними й корисними для здоров'я.

Утім для успішного впровадження таких рішень у промислове виробництво необхідно врахувати низку викликів, зокрема забезпечення стабільності процесів бродіння, адаптацію технологічного обладнання й економічне обґрунтування нових рецептур. Поступовий розвиток цього напрямку вже триває: з'являються комерційно доступні закваски на основі нетрадиційної сировини, проводяться дослідження з розроблення рецептур з їх використанням тощо. Перспективними напрямками подальших досліджень у цій сфері є оптимізація процесів ферментації, вдосконалення методів керованого бродіння, а також впровадження інноваційних біотехнологій, спрямованих на стабілізацію заквасок і підвищення їх ефективності в умовах промислового виробництва. Подальший розвиток натуральних ферментативних технологій дозволить отримати продукти з «чистою етикеткою» з покращеними функціональними властивостями, що відповідатимуть запитам споживачів щодо здорового й збалансованого харчування.

Отже, закваска є важливим інструментом сучасної хлібопекарської та макаронної промисловості, що поєднує культурні традиції й науково обґрунтовані біотехнологічні підходи, забезпечуючи виробництво продуктів з підвищеною харчовою цінністю, функціональністю та привабливими сенсорними властивостями.

## **Література**

- Ameur, H., Tlais, A. Z. A., Paganoni, C., Cozzi, S., Suman, M., Di Cagno, R., Gobbetti, M., & Polo, A. (2024). Tailor-made fermentation of sourdough reduces the acrylamide content in rye crispbread and improves its sensory and nutritional characteristics. *International Journal of Food Microbiology*, 410, 110513. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2023.110513>.
- Arora, K., Ameur, H., Polo, A., Di Cagno, R., Rizzello, C., & Gobbetti, M. (2021). Thirty years of knowledge on sourdough fermentation: A systematic review. *Trends in Food Science & Technology*, 108, 71—83. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.12.008>.
- Arrijoa-Bretón, D., Mani-López, E., Palou, E., & López-Malo, A. (2020). Antimicrobial activity and storage stability of cell-free supernatants from lactic acid bacteria and their applications with fresh beef. *Food Control*, 115, 107286. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107286>.
- Bigey, F., Segond, D., Friedrich, A., Guezenc, S., Bourgeois, A., Huyghe, L., Agier, N., Nidelet, T., & Sicard, D. (2021). Evidence for two main domestication trajectories in *Saccharomyces cerevisiae* linked to distinct bread-making processes. *Current Biology*, 31(4), 722—732.e5. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2020.11.016>.
- Boukid, F., Zannini, E., Carini, E., & Vittadini, E. (2019). Pulses for bread fortification: A necessity or a choice? *Trends in Food Science & Technology*, 88, 416—428. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.04.007>.
- Brandt, M. J. (2019). Industrial production of sourdoughs for the baking branch — An overview. *International Journal of Food Microbiology*, 302, 3—7. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.09.008>.
- Cappelle, S., Guylaine, L., & Gänzle, M. (2023). History and social aspects of sourdough. In: Gobbetti, M., & Gänzle, M. (eds.). *Handbook on sourdough biotechnology*. Springer. Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-23084-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-031-23084-4_1).

Carbonetto, B., Nidelet, T., Guezenec, S., Perez, M., Segond, D., & Sicard, D. (2020). Interactions between *Kazachstania humilis* yeast species and lactic acid bacteria in sourdough. *Microorganisms*, 8(2), 240. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8020240>.

Calvert, M. D., Madden, A. A., Nichols, L. M., Haddad, N. M., Lahne, J., Dunn, R. R., & McKenney, E. A. (2021). A review of sourdough starters: Ecology, practices, and sensory quality with applications for baking and recommendations for future research. *PeerJ*, 9, e11389. <https://doi.org/10.7717/peerj.11389>.

Capozzi, V., Russo, P., Fragasso, M., De Vita, P., Fiocco, D., & Spano, G. (2012). Biotechnology and pasta-making: Lactic acid bacteria as a new driver of innovation. *Frontiers in Microbiology*, 3, 94. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00094>.

Chiva, R., Celador-Lera, L., Uña, J. A., Jiménez-López, A., Espinosa-Alcantud, M., Mateos-Horganero, E., Vega, S., Santos, M. Á., Velázquez, E., & Tamame, M. (2020). Yeast biodiversity in fermented doughs and raw cereal matrices and the study of technological traits of selected strains isolated in Spain. *Microorganisms*, 9(1), 47. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9010047>.

Cheliabiiyeva, V., & Sosedova, E. (2018). Використання заквасок спонтанного бродіння та борошна бобових культур у виробництві хліба. *Technical Sciences and Technologies*, 3(13), 251—257. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-3\(13\)-251-257](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-3(13)-251-257).

Cizeikiene, D., Juodeikiene, G., Paskevicius, A., & Bartkiene, E. (2013). Antimicrobial activity of lactic acid bacteria against pathogenic and spoilage microorganisms isolated from food and their control in wheat bread. *Food Control*, 31, 539—545. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.10.021>.

Coda, R., Rizzello, C. G., Nigro, F., De Angelis, M., Arnault, P., & Gobbetti, M. (2008). Long-term fungal inhibitory activity of water-soluble extracts of *Phaseolus vulgaris* cv. Pinto and sourdough lactic acid bacteria during bread storage. *Applied and Environmental Microbiology*, 74, 7391—7398. <https://doi.org/10.1128/AEM.01163-08>.

Coda, R., Cagno, R. D., Gobbetti, M., & Rizzello, C. G. (2014). Sourdough lactic acid bacteria: Exploration of non-wheat cereal-based fermentation. *Food Microbiology*, 37, 51—58. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2013.06.018>.

Coda, R., Varis, J., Verni, M., Rizzello, C. G., & Katina, K. (2017). Improvement of the protein quality of wheat bread through faba bean sourdough addition. *LWT — Food Science and Technology*, 82, 296—302. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.04.062>.

Conte, P. (2018). Technological and nutritional challenges, and novelty in gluten-free breadmaking: A review. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 69(1), 5—21. <https://doi.org/10.31883/pjfn-2019-0005>.

Curiel, J. A., Coda, R., Centomani, I., Summo, C., Gobbetti, M., & Rizzello, C. G. (2015). Exploitation of the nutritional and functional characteristics of traditional Italian legumes: The potential of sourdough fermentation. *International Journal of Food Microbiology*, 196, 51—61. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2014.11.032>.

Decock, P., & Cappelle, S. (2005). Bread technology and sourdough technology. *Trends in Food Science & Technology*, 16(1—3), 113—120. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2004.04.012>.

De Vero, L., Iosca, G., Gullo, M., & Pulvirenti, A. (2021). Functional and healthy features of conventional and non-conventional sourdoughs. *Applied Sciences*, 11, 3694. <https://doi.org/10.3390/app11083694>.

De Vuyst, L., Comasio, A., & Van Kerrebroeck, S. (2023). Sourdough production: Fermentation strategies, microbial ecology, and use of non-flour ingredients. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(15), 2447—2479. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1976100>.

De Vuyst, L., & Neysens, P. (2005). The sourdough microflora: Biodiversity and metabolic interactions. *Trends in Food Science & Technology*, 16(1—3), 43—56. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2004.02.012>.

Dhiman, S., Kaur, S., Thakur, B., Singh, P., & Tripathi, M. (2025). Nutritional enhancement of plant-based fermented foods: Microbial innovations for a sustainable future. *Fermentation*, 11(6), 346. <https://doi.org/10.3390/fermentation11060346>.

- Hernández-Figueroa, R. H., Mani-López, E., Palou, E., & López-Malo, A. (2023). Sourdoughs as natural enhancers of bread quality and shelf life: A review. *Fermentation*, 10(1), 7. <https://doi.org/10.3390/fermentation10010007>.
- Fekri, A., Abedinzadeh, S., Torbati, M., Azadmard-Damirchi, S., & Savage, G. P. (2024). Considering sourdough from a biochemical, organoleptic, and nutritional perspective. *Journal of Food Composition and Analysis*, 125, 105853. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2023.105853>.
- Gabriele, M., Arouna, N., Arvay, J., Longo, V., & Pucci, L. (2023). Sourdough fermentation improves the antioxidant, antihypertensive, and anti-inflammatory properties of *Triticum dicoccum*. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(7), 6283. <https://doi.org/10.3390/ijms24076283>.
- Gänzle, M. G. (2014). Enzymatic and bacterial conversions during sourdough fermentation. *Food Microbiology*. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2014.01.004>.
- Gänzle, M. G., & Zheng, J. (2019). Lifestyles of sourdough lactobacilli — Do they matter for microbial ecology and bread quality? *International Journal of Food Microbiology*, 302, 15—23. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.08.019>.
- Gänzle, M. G., Qiao, N., & Bechtner, J. (2023). The quest for the perfect loaf of sourdough bread continues: Novel developments for selection of sourdough starter cultures. *International Journal of Food Microbiology*, 407, 110421. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2023.110421>.
- Gobbetti, M., De Angelis, M., Di Cagno, R., Calasso, M., Archetti, G., & Rizzello, C. G. (2019). Novel insights on the functional/nutritional features of the sourdough fermentation. *International Journal of Food Microbiology*, 302, 103—113. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.05.018>.
- Gobbetti, M., De Angelis, M., Di Cagno, R., Calasso, M., Archetti, G., & Rizzello, C. G. (2016). Drivers for the establishment and composition of sourdough lactic acid bacteria. *International Journal of Food Microbiology*. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.02.023>.
- Islam, M. A., & Islam, S. (2024). Sourdough bread quality: Facts and factors. *Foods*, 13(13), 2132. <https://doi.org/10.3390/foods13132132>.
- Katina, K., Poutanen, K., & Gobbetti, M. (2023). Nutritional Aspects of Cereal Fermentation with Lactic Acid Bacteria and Yeast. In *Handbook on Sourdough Biotechnology*, Second Edition (pp. 303—324). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-23084-4\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-031-23084-4_10).
- Keramari, S., Nouska, C., Hatzikamari, M., Biliaderis, C. G., & Lazaridou, A. (2024). Impact of sourdough from a commercial starter culture on quality characteristics and shelf life of gluten-free rice breads supplemented with chickpea flour. *Foods*, 13(14), 2300. <https://doi.org/10.3390/foods13142300>.
- Lima, T. T. M., Hosken, B. D. O., De Dea Lindner, J., Menezes, L. A. A., Pirozi, M. R., & Martin, J. G. P. (2023). How to deliver sourdough with appropriate characteristics for the bakery industry? The answer may be provided by microbiota. *Food Bioscience*, 56, 103072. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103072>.
- Luz, C., Saladino, F., Luciano, F. B., Mañes, J., & Meca, G. (2017). In vitro antifungal activity of bioactive peptides produced by *Lactobacillus plantarum* against *Aspergillus parasiticus* and *Penicillium expansum*. *LWT — Food Science and Technology*, 81, 128—135. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.04.024>.
- Ma, S., Wang, Z., Guo, X. et al. (2021). Sourdough improves the quality of whole-wheat flour products: Mechanisms and challenges — A review. *Food Chemistry*, 360, 130038. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130038>.
- Mantzourani, I., Plessas, S., Odatzidou, M., Alexopoulos, A., Galanis, A., Bezirtzoglou, E., & Bekatorou, A. (2019). Effect of a novel *Lactobacillus paracasei* starter on sourdough bread quality. *Food Chemistry*, 271, 259—265. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.08.059>.
- Maryam, B. (2017). The role of biotechnology in food production and processing. *Engineering and Applied Sciences*, 2(6), 113—117. <https://doi.org/10.11648/j.eas.20170206.14>.
- Mendonça, V. (2023). Modern food habits and its impact on human health. *International Journal of Innovative Research in Engineering and Management*, 10(4), 182—185. <https://doi.org/10.55524/ijirem.2023.10.4.24>.
- Medeiros, A. R. S., de Rodrigues, N. P. A., Couto, M. V. S., Barbosa, G. V. P., Rodrigues, T. Z., Gonçalves, I. C. D., Campana, E. H., Braga, A. L. M., Lima, M. S., Alcântara, M. A., Cordeiro, A. M. T. M., & Garcia, E. F. (2025). Autochthonous strains of *Lactiplantibacillus plantarum* and *Levilactobacillus*

*brevis* with technological and bioactive potential as starter cultures for sourdough production. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 41, 101221. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2025.101221>.

Minervini, F., Celano, G., Lattanzi, A., De Angelis, M., & Gobbetti, M. (2016). Added ingredients affect the microbiota and biochemical characteristics of durum wheat type-I sourdough. *Food Microbiology*, 60, 112—123. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2016.05.016>.

Montemurro, M., Coda, R., & Rizzello, C. G. (2019). Recent advances in the use of sourdough biotechnology in pasta making. *Foods*, 8(4), 129. <https://doi.org/10.3390/foods8040129>.

Nionelli, L., & Rizzello, C. G. (2016). Sourdough-based biotechnologies for the production of gluten-free foods. *Foods*, 5(4), 65. <https://doi.org/10.3390/foods5040065>.

Nutter, J., Saiz, A. I., & Iurlina, M. O. (2019). Microstructural and conformational changes of gluten proteins in wheat-rye sourdough. *Journal of Cereal Science*, 87, 91—97. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.02.005>.

Oghbaei, M., & Prakash, J. (2016). Effect of primary processing of cereals and legumes on its nutritional quality: A comprehensive review. *Cogent Food & Agriculture*, 2(1), 1—15. <https://doi.org/10.1080/23311932.2015.1136015>.

Pal, R. S., Bhartiya, A., Yadav, P., Kant, L., Mishra, K. K., Aditya, J. P., & Pattanayak, A. (2016). Effect of dehulling, germination and cooking on nutrients, anti-nutrients, fatty acid composition and antioxidant properties in lentil (*Lens culinaris*). *Journal of Food Science and Technology*, 54(4), 909—920. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2351-4>.

Park, Y.-H., Jung, L.-H., & Jeon, E.-R. (2006). Quality characteristics of bread using sour dough. *Preventive Nutrition and Food Science*, 11, 323—327. <https://doi.org/10.3746/pnf.2006.11.4.323>.

Pérez-Alvarado, O., Zepeda-Hernández, A., García-Amezquita, L. E., Requena, T., Vinderola, G., & García-Cayuela, T. (2022). Role of lactic acid bacteria and yeasts in sourdough fermentation during breadmaking: Evaluation of postbiotic-like components and health benefits. *Frontiers in Microbiology*, 13, 969460. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.969460>.

Perri, G., Calabrese, F. M., Rizzello, C. G., De Angelis, M., Gobbetti, M., & Calasso, M. (2020). Sprouting process affects the lactic acid bacteria and yeasts of cereal, pseudocereal and legume flours. *LWT*, 126, 109314. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109314>.

Plessas, S., Bekatorou, A., Gallanagh, J., Nigam, P., Koutinas, A. A., & Psarianos, C. (2008). Evolution of aroma volatiles during storage of sourdough breads made by mixed cultures of *Kluyveromyces marxianus* and *Lactobacillus delbrueckii* ssp. *bulgaricus* or *Lactobacillus helveticus*. *Food Chemistry*, 107(2), 883—889. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.09.010>.

Poutanen, K., Flander, L., & Katina, K. (2009). Sourdough and cereal fermentation in a nutritional perspective. *Food Microbiology*, 26(7), 693—699. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2009.07.011>.

Ramos, L., Alonso-Hernando, A., Martínez-Castro, M., Morán-Pérez, J. A., Cabrero-Lobato, P., Pascual-Maté, A., Téllez-Jiménez, E., & Mujico, J. R. (2021). Sourdough Biotechnology Applied to Gluten-Free Baked Goods: Rescuing the Tradition. *Foods*, 10(7), 1498. <https://doi.org/10.3390/foods10071498>.

Ripari, V., & Berardi, E. (2016). Evolution of sourdough microbiota in spontaneous sourdoughs started with different plant materials. *International Journal of Food Microbiology*, 232, 35—44. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.05.025>

Rizzello, C. G., Nionelli, L., Coda, R., Di Cagno, R., & Gobbetti, M. (2010). Use of sourdough fermented wheat germ for enhancing the nutritional, texture and sensory characteristics of the white bread. *European Food Research and Technology*, 230, 645—654. <https://doi.org/10.1007/s00217-010-1344-x>.

Rizzello, C. G., Calasso, M., Campanella, D., De Angelis, M., & Gobbetti, M. (2014). Use of sourdough fermentation and mixture of wheat, chickpea, lentil and bean flours for enhancing the nutritional, texture and sensory characteristics of white bread. *International Journal of Food Microbiology*, 180, 78—87. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2014.04.005>.

Sakandar, H. A., Hussain, R., Kubow, S., Sadiq, F. A., Huang, W., & Imran, M. (2019). Sourdough bread: A contemporary cereal fermented product. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43, e13883. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13883>.

Samapundo, S., Devlieghere, F., Vroman, A., & Eeckhout, M. (2017). Antifungal activity of fermentates and their potential to replace propionate in bread. *LWT — Food Science and Technology*, 76, 101—107. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.10.003>.

Shehata, M. G., Badr, A. N., El Sohaimy, S. A., Asker, D., & Awad, T. S. (2019). Characterization of antifungal metabolites produced by novel lactic acid bacterium and their potential application as food biopreservatives. *Annals of Agricultural Sciences*, 64, 71—78. <https://doi.org/10.1016/j.aos.2019.07.003>.

Siepmann, F. B., Sousa de Almeida, B., Waszczynskyj, N., & Spier, M. R. (2019). Influence of temperature and of starter culture on biochemical characteristics and the aromatic compounds evolution on type II sourdough and wheat bread. *LWT — Food Science and Technology*, 108, 199—206. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.03.064>.

Tomić, J., Dapčević-Hadnađev, T., Škrobot, D., Maravić, N., Popović, N., Stevanović, D., & Hadnađev, M. (2023). Spontaneously fermented ancient wheat sourdoughs in breadmaking: Impact of flour quality on sourdough and bread physico-chemical properties. *LWT*, 175, 114482. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114482>.

Torres, A., Frias, J., Granito, M., Guerra, M., & Vidal-Valverde, C. (2007). Chemical, biological and sensory evaluation of pasta products supplemented with agalactoside-free lupin flours. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 87(1), 74—81. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2694>.

Torres, A., Frias, J., Granito, M., & Vidal-Valverde, C. (2007). Germinated *Cajanus cajan* seeds as ingredients in pasta products: Chemical, biological and sensory evaluation. *Food Chemistry*, 101(1), 202—211. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.01.020>.

Van Kerrebroeck, S., Maes, D., & De Vuyst, L. (2017). Sourdoughs as a function of their species diversity and process conditions: A meta-analysis. *Trends in Food Science & Technology*, 68, 152—159. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.08.016>.

Vermeulen, S. J., Park, T., Khoury, C. K., & Béné, C. (2020). Changing diets and the transformation of the global food system. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1478(1), 3—17. <https://doi.org/10.1111/nyas.14446>.

Wang, Y., Wu, J., Lv, M., Shao, Z., Hungwe, M., Wang, J., Bai, X., Xie, J., Wang, Y., & Geng, W. (2021). Metabolism characteristics of lactic acid bacteria and the expanding applications in food industry. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, 612285. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.612285>.

Wang, Z., & Wang, L. (2024). Impact of sourdough fermentation on nutrient transformations in cereal-based foods: Mechanisms, practical applications, and health implications. *Grain & Oil Science and Technology*, 7(2), 124—132. <https://doi.org/10.1016/j.gaost.2024.03.001>.

Zhao, Y., Zhang, J., Wei, Y., Ai, L., Ying, D., & Xiao, X. (2020). Improvement of bread quality by adding wheat germ fermented with *Lactobacillus plantarum* Dy-1. *Journal of Food Quality*, 2020, 9348951. <https://doi.org/10.1155/2020/9348951>.

Zheng, J., Wittouck, S., Salvetti, E., Franz, C. M. A. P., Harris, H. M. B., Mattarelli, P., O'Toole, P. W., Pot, B., Vandamme, P., Walter, J., Watanabe, K., Wuyts, S., Felis, G. E., Gänzle, M. G., & Lebeer, S. (2020). A taxonomic note on the genus *Lactobacillus*: Description of 23 novel genera, emended description of the genus *Lactobacillus* Beijerinck 1901, and union of *Lactobacillaceae* and *Leuconostocaceae*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 70(4), 2782—2858. <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.004107>.

Zhou, S. Y., Gilliland, M., Wu, X. et al. (2018). FODMAP diet modulates visceral nociception by lipopolysaccharide-mediated intestinal inflammation and barrier dysfunction. *The Journal of Clinical Investigation*, 128(1), 267—280. <https://doi.org/10.1172/JCI92390>.

УДК 628.1-66.08

## STRUCTURAL FEATURES AND PROPERTIES OF POLYMER MEMBRANES BASED ON POLYVINYL ALCOHOL AND Ag/ZnO NANOPARTICLES

V. Demchenko<sup>1</sup>, D. Kunytskyi<sup>1</sup>, A. Marynin<sup>2</sup>, N. Rybalchenko<sup>3</sup>, P. Zaremba<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*E. O. Paton Institute of Electric Welding, NAS of Ukraine*

<sup>2</sup>*National University of Food Technologies*

<sup>3</sup>*D. K. Zabolotny Institute of Microbiology and Virology, NAS of Ukraine*

---

### Key words:

*Polyvinyl alcohol  
Membrane  
Structure  
Properties*

---

### Article history:

Received 09.09.2025  
Received in revised form  
25.09.2025  
Accepted 07.10.2025

---

### Corresponding author:

A. Marynin  
**E-mail:**  
andrii\_marynin@ukr.net

**Citation:** Демченко В. Л., Куницький Д. В., Маринін А. І., Рибальченко Н. П., Заремба П. Ю. (2025). Особливості структури та властивості полімерних мембран на основі полівінілового спирту і наночастинок Ag/ZnO. *Наукові праці НУХТ*, 31(5), 236—246. DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-5-19

---

### ABSTRACT

The main environmental problem today is water pollution due to the operation of industry, agriculture, intensive urbanization and other factors. The development of effective materials for water purification is extremely important for maintaining the ecological balance. Membranes based on synthetic and natural polymers can be effective and cost-effective in water purification compared to traditional methods. They can have a high surface area and excellent sorption properties. Also, they can be biodegradable and biocompatible, which makes them safe for the environment and health.

Polyvinyl alcohol (PVA) is used to create membranes that are widely used for water purification, in particular, in reverse osmosis and ultrafiltration processes. Such membranes effectively remove various contaminants, such as organic substances, salts and bacteria, ensuring the obtaining of high-quality water. Such materials are also promising for the treatment of wound surfaces.

The possibility of creating polymer membranes based on polyvinyl alcohol, polyethylene glycol (PEG) and hybrid Ag/ZnO particles, promising for water purification and wound surface treatment, has been demonstrated and substantiated. The features of the structural organization of polymer matrices based on PVA and PEG have been analyzed, the degree of crystallinity and the size of crystallites have been determined, and the formation of hybrid Ag/ZnO particles in the polymer matrix has been confirmed. Comprehensive studies of the bactericidal and antiviral activity of the created samples have been conducted. The cytotoxicity of the materials has been studied.

The best bactericidal activity against microorganisms *S. aureus* and *E. coli* and the lowest toxicity were demonstrated by the samples PVA-PEG-Ag and PVA-PEG-Ag/ZnO. The synergistic effect on antiviral activity was shown by the hydrogel material PVA-PEG-1% wt. Ag/ZnO. The obtained sample had a better virucidal effect against the herpes simplex virus compared to the samples PVA-PEG-1% wt. Ag or ZnO.

---

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-5-19

## ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТІ ПОЛІМЕРНИХ МЕМБРАН НА ОСНОВІ ПОЛІВІНІЛОВОГО СПИРТУ І НАНОЧАСТИНОК Ag/ZnO

В. Л. Демченко<sup>1</sup>, Д. В. Куницький<sup>1</sup>, А. І. Маринін<sup>2</sup>, Н. П. Рибальченко<sup>3</sup>,  
П. Ю. Заремба<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України

<sup>2</sup>Національний університет харчових технологій

<sup>3</sup>Інститут мікробіології і вірусології ім. Д. К. Заболотного НАН України

Основною екологічною проблемою сьогодення є забруднення води внаслідок функціонування промисловості, сільського господарства, інтенсивної урбанізації та інших факторів. Розробка ефективних матеріалів для очищення води вкрай важлива для збереження екологічного балансу. Мембрани на основі синтетичних і природних полімерів можуть бути ефективними й економічно вигідними в очищенні води порівняно з традиційними методами, біорозкладними та біокомпатибельними, що робить їх безпечними для довкілля та здоров'я. Крім того, вони можуть мати високу площу поверхні і відмінні сорбційні властивості.

Полівініловий спирт (ПВС) використовується для створення мембран, які широко застосовуються для очищення води, зокрема, у процесах зворотного осмосу та ультрафільтрації. Такі мембрани ефективно видаляють різні забруднювачі (органічні речовини, солі та бактерії), забезпечуючи отримання води високої якості. Також такі матеріали перспективні для лікування ранових поверхонь.

Показана й обґрунтована можливість створення полімерних мембран на основі полівінілового спирту, поліетиленгліколю (ПЕГ) і гібридних частинок Ag/ZnO, перспективних для очищення води та лікування ранових поверхонь. Проаналізовано особливості структурної організації полімерних матриць на основі ПВС та ПЕГ, визначено ступінь кристалічності та розмір кристалітів, підтверджено утворення гібридних частинок Ag/ZnO в полімерній матриці. Проведені комплексні дослідження бактерицидної та противірусної активності створених зразків. Досліджено цитотоксичність матеріалів. Найкращу бактерицидну активність щодо мікроорганізмів *S. aureus* та *E. coli* і найменшу токсичність продемонстрували зразки ПВС-ПЕГ-Ag та ПВС-ПЕГ-Ag/ZnO. Синергетичний ефект щодо противірусної дії показав гідрогелевий матеріал ПВС-ПЕГ-1% мас. Ag/ZnO. Отриманий зразок проявив кращий віруліцидний ефект відносно вірусу простого герпесу порівняно зі зразками ПВС-ПЕГ-1% мас. Ag чи ZnO.

**Ключові слова:** полівініловий спирт, мембрана, структура, властивості.

**Постановка проблеми.** Сьогодні весь світ стикається з серйозною проблемою забруднення води різними шкідливими речовинами (Zahoor, & Mushtaq, 2023). Дослідники та вчені намагаються подолати цю проблему шляхом пошуку нових матеріалів з поліпшеними адсорбційними властивостями (Chelu, Musuc, Popa, & Moreno, 2023). Особливу увагу дослідників привертають полісахариди завдяки їх-

ній доступності в природі, відновлюваності, стійкості та вражаючій продуктивності порівняно з іншими матеріалами, що використовуються для очищення води (Crini, & Badot, 2008). Однак полісахариди характеризуються низькою механічною міцністю (Khorasani, Joorabloo, Adeli, Mansoori-Moghadam, & Moghaddam, 2018), і їхня придатність для створення мембран є обмеженою. Перспективним полімером для створення зшитих мембран, які можуть використовуватись для очищення води та лікування ранових поверхонь, є полівініловий спирт (ПВС), який має гарні фізико-механічні характеристики. Наразі ПВС є одним із найпоширеніших і найпридатніших синтетичних полімерів для створення полімерних гідрогелевих мембран (Vatanpour, Teber, Mehrabi, & Koyuncu, 2023). Він характеризується високою плівкоутворювальною здатністю, сумісністю із синтетичними та природними полімерами, неканцерогенністю, біосумісністю (DeMerlis, & Schoneker, 2002), легко зшивається різними способами (Waresindo et al., 2023).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Поширеною екологічною проблемою є забруднення водойм залишками шкідливих речовин і супутніх сполук, таких як важкі метали (свинець, ртуть, миш'як, кадмій, нікель), органічними сполуками (фосфати, феноли, пестициди), нафтопродуктами та бактеріальними контамінаціями (Zahoor, & Mushtaq, 2023; Ahmaruzzaman et al., 2024). Вирішення проблеми потребує пошуку нових ефективних засобів для очищення водних ресурсів. Більшість досліджень зосереджені на створенні мембран на основі полісахаридів (Suntornsuk, Pochanavanich, & Suntornsuk, 2002; Ham-Pichavant, Sebe, Pardon, & Coma, 2005) та полімерів синтетичного походження (Коновалова, Побігай, Бурбан, & Лапінський, 2024), які часто можуть бути токсичними.

Гідрогелеві мембрани на основі полівінілового спирту є біосумісними та нетоксичними; вони мають високу концентрацію реакційних –ОН груп (Mitani, Ozaki, & Sato, 2021), що дає змогу зв'язувати іони важких металів; ПВС легко зшивається під дією різних чинників, що також дозволяє створювати мембрани для покриття ранових поверхонь (Jiang et al., 2019). Уведення наночастинок різних металів до складу гідрогелевих мембран на основі ПВС надає їм бактерицидних і противірусних властивостей (Mondal, Chakraborty, Manna, & Mandal, 2024).

**Мета дослідження** полягає в аналізі особливостей структурної організації (визначення ступеня кристалічності, розміру кристалітів) полімерних мембран на основі полівінілового спирту і поліетиленгліколю, а також вивченні процесів формування гібридних наночастинок Ag/ZnO у полімерній матриці ПВС-ПЕГ та антимікробної, противірусної та цитотоксичної дії створених матеріалів.

**Матеріали і методи.** Для формування зразків використовували такі реагенти: полівініловий спирт марки 17-99, поліетиленгліколь марки ПЕГ-6000 (як пластифікатор), аскорбінову кислоту, нітрат срібла. Полівініловий спирт розчиняли у воді за температури 95 °С, а поліетиленгліколь за температури 20 °С шляхом перемішування протягом 30 хв. Потім розчин ПЕГ додавали до розчину ПВС у співвідношенні 1:8 мас. % і перемішували 30 хв за температури 95 °С. Окремо розчиняли нітрат срібла, ацетат цинку та суміш солей  $Ag^+/Zn^{2+}$  і додавали до суміші ПВС-ПЕГ за температури 80 °С, перемішуючи протягом 20 хв. На наступному етапі при інтенсивному перемішуванні до розчинів ПВС-ПЕГ- $AgNO_3$ , ПВС-ПЕГ- $Zn(OOCCN_3)_2$

та ПВС-ПЕГ- $\text{AgNO}_3/\text{Zn}(\text{OOCCH}_3)_2$  додавали розчини аскорбінової кислоти у співвідношенні  $[\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6] : [\text{Me}^{(2+)}(\text{Me}^+/\text{Me}^{2+})] = 2$ . Розчини перемішували протягом 3 год за температури  $80^\circ\text{C}$ . Сформовані таким чином гелі зберігали при температурі  $4^\circ\text{C}$  протягом 4 днів. Охолоджені гелі були опромінені за допомогою швидких електронів.

Структуру зразків досліджували методом ширококутової рентгенівської дифракції на дифрактометрі XRD-7000 (Shimadzu, Японія), рентгенооптичну схему якого виконували, пропускаючи первинний пучок крізь зразок за допомогою  $\text{CuK}_\alpha$  випромінювання ( $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$ ) і графітового монохроматора при температурі  $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ .

Для вивчення антимікробної активності зразків як тест-культур використовували референтні штами умовно-патогенних мікроорганізмів: грампозитивні *Staphylococcus aureus* ATCC 25923, грамнегативні — *Escherichia coli* ATCC 25922 (Bauer, Kirby, Sherris, & Turck, 1966; Brouillard, Terriff, Tofan, & Garrison, 2006).

У дослідженнях з віруліцидної дії використовували вірус грипу типу А (ВГА), H1N1, штам A/FM/1/47 та вірус простого герпесу 1 типу (ВПГ-1).

Для визначення цитотоксичності використовували культури клітин Vero (ECACC N 84113001), отримані з клітинного банку Інституту експериментальної патології, онкології і радіобіології НАН України (Київ, Україна) та клітини MDCK (ECACC N84121903) з Інституту епідеміології та інфекційних хвороб ім. Л. В. Громашевського НАН України (Київ, Україна).

Методика дослідження віруліцидної та цитотоксичної дії зразків детально описані в працях (Naumenko, Zahorodnia, Pop, & Rizun, 2013; Rybalchenko та ін., 2023).

**Викладення основних результатів дослідження.** При дослідженні структури полімерних матеріалів, на основі яких формували мембрани, було встановлено, що плівковий матеріал — полівініловий спирт, характеризується аморфно-кристалічною структурою. На це вказують дифракційні максимуми при кутах  $2\theta_m \sim 11,2^\circ, 19,5^\circ, 23,0^\circ, 40,8^\circ$  з індексами Міллера (100), (101), (200), (201) (рис. 1).

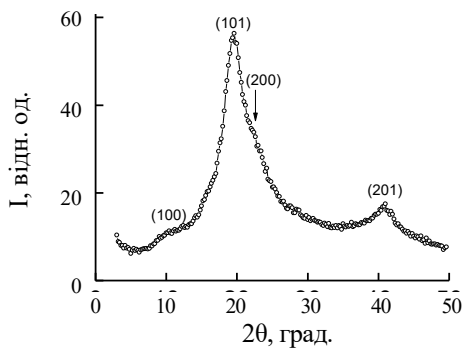


Рис. 1. Ширококутова рентгенівська дифрактограма плівкового зразка — полівінілового спирту

Проведена оцінка відносного рівня кристалічності ( $X_{кр}$ ) полівінілового спирту за методом Метьюза (Demchenko, & Shtompel, 2014):

$$X_{кр} = Q_{кр}(Q_{кр} + Q_{ам})^{-1} \cdot 100, \quad (1)$$

де  $Q_{кр}$  — площа дифракційних максимумів, які характеризують кристалічну

структуру полімеру;  $Q_{кр} + Q_{ам}$  — площа всієї дифрактограми в інтервалі кутів розсіювання ( $2\theta_1 \div 2\theta_2$ ) в якому має вияв аморфно-кристалічна структура полімеру, показала, що він становить близько 46%.

У свою чергу, оцінка ефективного розміру кристалітів  $L$  полівінілового спирту, проведена за методом Шеррера (Demchenko, Shtompel, & Riabov, 2015):

$$L = K\lambda(\beta\cos\theta_m)^{-1}, \quad (2)$$

де  $K$  — стала, пов'язана з формою кристалітів (при невідомій їх формі  $K = 0,9$ ), а  $\beta$  — кутова напівширина (ширина на половині висоти) синглетного дифракційного максимуму дискретного типу, показала, що середнє значення  $L \approx 33,5$  нм (для розрахунків використовували дифракційні максимуми при  $2\theta_m = 19,5$  і  $40,8^\circ$ ).

При вивченні особливостей структури поліетиленгліколю (ПЕГ-6000), за допомогою якого проводили модифікацію ПВС для надання йому еластичності, було встановлено, що цей полімер також характеризується напівкристалічною структурою (рис. 2). Ступінь його кристалічності становить 88%.

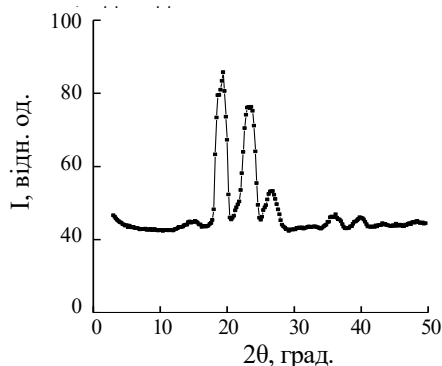


Рис. 2. Ширококутова рентгенівська дифрактограма поліетиленгліколю (ПЕГ-6000)

Було встановлено, що додавання поліетиленгліколю до складу ПВС не впливає на структуру останнього. На це вказує ідентичність кутового положення та інтенсивностей дифракційних максимумів, а також ступеня кристалічності зразків ПВС та ПВС-ПЕГ-6000 (рис. 3). Ступінь кристалічності ПВС та його суміші з ПЕГ-6000 становить 46% та 47% відповідно.

При дослідженні структури вихідних зразків і підданих опроміненню швидкими електронами було встановлено, що опромінення зразка ПВС-ПЕГ-6000 швидкими електронами з утворення гідрогелевих зшитих мембран приводить до збільшення його ступеня кристалічності з 47% до 53%.

Методом ширококутового розсіювання рентгенівських променів було встановлено, що при відновленні іонів срібла в полімерній матриці ПВС-ПЕГ за допомогою аскорбінової кислоти при мольному співвідношенні  $[C_6H_8O_6] : [Ag^+] = 2$  з подальшим зшиванням зразків електронним променем формуються частинки металічного срібла.

На це вказують два дифракційні максимуми при  $2\theta_m \sim 38,0^\circ$  і  $44,2^\circ$ , які відповідають кристалографічним площинам гранецентрованої кубічної ґратки срібла, характеризуються індексами (111) і (200) відповідно і підтверджують наявність металічного срібла в полімерній системі (рис. 4, крива 1). При відновленні іонів

$Zn^{2+}$  в полімерній матриці ПВС-ПЕГ за допомогою аскорбінової кислоти з подальшим зшиванням зразків за допомогою електронного променя утворюються частинки ZnO (рис. 4, крива 2).

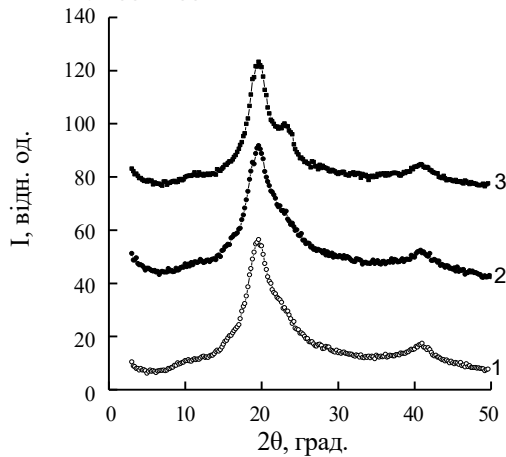


Рис. 3. Ширококутові рентгенівські дифрактограми плівкових зразків: ПВС (1), ПВС-ПЕГ-6000 (2) та зшитого зразка ПВС-ПЕГ-6000 електронним променем (3)

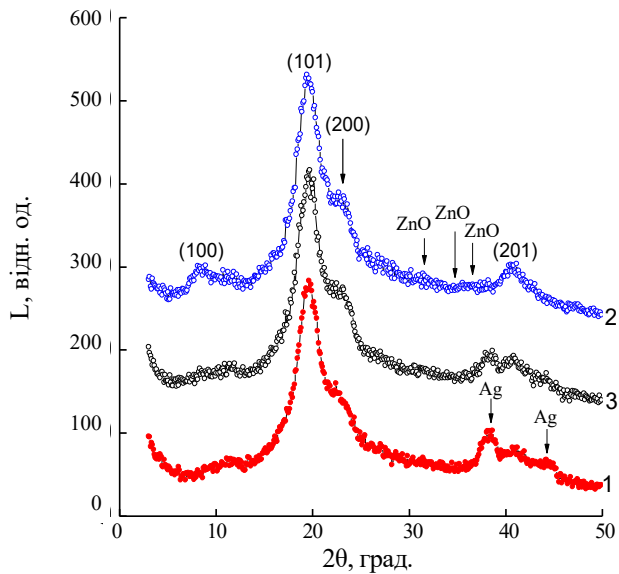


Рис. 4. Ширококутові рентгенівські дифрактограми гідрогелевих зразків: ПВС-ПЕГ-6000-1% мас. Ag (1), ПВС-ПЕГ-6000-1% мас. ZnO (2) та ПВС-ПЕГ-6000-1% мас. Ag/ZnO (3)

Аналіз структури зразків з гібридними частинками Ag/ZnO показав, що при відновленні суміші солей  $Ag^+/Zn^{2+}$  за допомогою аскорбінової кислоти на дифрактограми присутні максимуми, які відповідають за структуру як металічного срібла, так і оксиду цинку (рис. 4, крива 3).

Результати дослідження зон інгібування росту мікроорганізмів (рис. 5, 6) демонструють виражену антимікробну активність гідрогелевих зразків, модифікованих наночастинками Ag та ZnO, проте з різною ефективністю залежно від типу бактерій. На рис. 5, а представлено активність зразків проти грампозитивної бактерії *Staphylococcus aureus*. Усі три варіанти зразків показали наявність чітких зон затримки росту: зразок із 1,0 мас. % Ag (рис. 5, а) — 20,3 мм, зразок із 1 мас. % ZnO (рис. 5, б) — 20,17 мм, зразок із комбінацією Ag/ZnO (рис. 5, в) — 16,95 мм.



Рис. 5. Антимікробна активність гідрогелевих матеріалів на основі ПВС-ПЕГ, наповнених: 1% мас. Ag (а), 1% мас. ZnO (б), 1% мас. Ag/ZnO (в) щодо мікроорганізму *S. aureus*

На рис. 6 представлено ефективність тих самих зразків проти грамнегативної бактерії *Escherichia coli*. У цьому випадку спостерігалися суттєві відмінності: зразок із 1% мас. Ag (рис. 6, а) — 19,20 мм, зразок із 1% мас. ZnO (рис. 6, б) — 0 мм (відсутність зони інгібування), зразок із 1% мас. Ag/ZnO (рис. 6, в) — 14,70 мм. Це свідчить про те, що наночастинки ZnO практично неефективні проти грамнегативних бактерій у цій концентрації, тоді як частинки срібла та гібридні частинки Ag/ZnO забезпечують помітний антибактеріальний ефект. Грамнегативна клітинна стінка є додатковим бар'єром для проникнення іонів  $Zn^{2+}$ , що, ймовірно, знижує ефективність матеріалу з частинками ZnO.

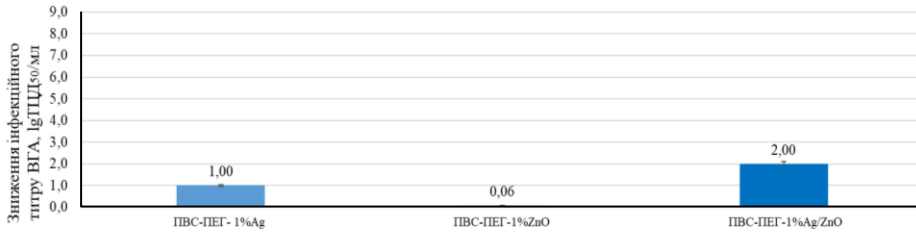


Рис. 6. Антимікробна активність гідрогелевих матеріалів на основі: ПВС-ПЕГ, наповнених 1% мас. Ag (а), 1% мас. ZnO (б), 1% мас. Ag/ZnO (в) щодо мікроорганізму *E. coli*

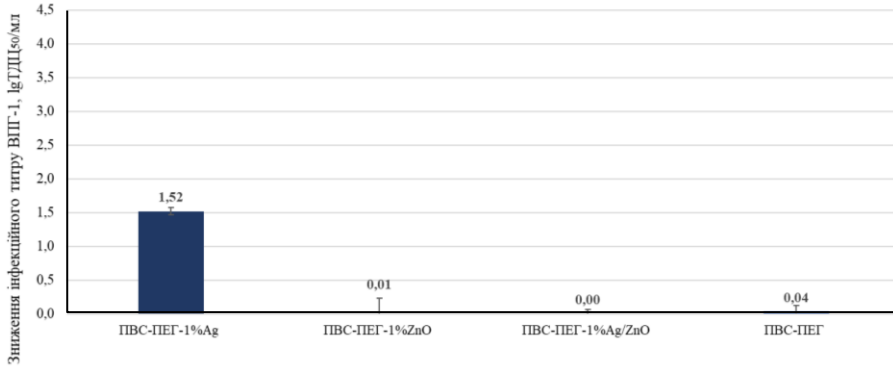
Серед досліджуваних зразків найкращий віруліцидний ефект відносно ВГА (рис. 7, а) продемонстрував гідрогелевий матеріал ПВС-ПЕГ-1,0% мас. Ag/ZnO. Він знижує інфекційний титр вірусу грипу на  $2,00 \pm 0,10 \log_{10}$  ТЦД<sub>50</sub>/мл. Зразок

ПВС-ПЕГ-1% мас. Ag проявляв відносно слабкий віруліцидний ефект у  $1,00 \pm 0,05 \log_{10}$  ТЦД<sub>50</sub>/мл зниження титру. Для зразка ПВС-ПЕГ-1% мас. ZnO значення зниження титру вірусу були близькі до 0.

Зразки ПВС-ПЕГ, ПВС-ПЕГ-1% мас. ZnO та ПВС-ПЕГ-1% мас. Ag/ZnO не проявляють віруліцидного ефекту відносно ВПГ-1 (титр вірусу був у межах контрольного значення) (рис. 7, б). Гідрогелевий матеріал ПВС-ПЕГ-1% мас. Ag має помірну активність проти вірусу герпесу (зниження титру вірусу  $\approx 1,5 \log_{10}$  ТЦД<sub>50</sub>/мл).



а



б

Рис. 7. Віруліцидний вплив зразків групи 6 на: ВГА (а) та ВПГ-1 (б)

Зразки ПВС-ПЕГ-1% мас. Ag та ПВС-ПЕГ зменшують життєдіяльність клітин MDCK (рис. 8, а) не більше, ніж на 8%. ПВС-ПЕГ-1% мас. Ag/ZnO проявляє значний вплив на клітини лише у нерозведеному стані (44,9% живих клітин), його розраховане значення  $CC_{50}$  становить  $1,19 \pm 0,06$  у розведенні.

Зразок ПВС-ПЕГ-1% мас. ZnO знижує метаболічну активність клітин на 8,5—71%. Розрахований індекс  $CC_{50}$  для даного зразка дорівнює  $3,23 \pm 0,16$  у розведенні.

При дослідженні токсичної дії зразків у культурі клітин Vero виявлено подібні закономірності, що й у культурі MDCK. Слід зауважити, що зразок ПВС-ПЕГ не проявляв жодного негативного впливу на функціональну активність клітин Vero ( $\sim 100\%$ ) (рис. 8, б), подібну картину виявлено і для зразка ПВС-ПЕГ-1% мас. Ag.

Натомість зразок ПВС-ПЕГ-1% мас. ZnO (не розведений та у розведенні 1:5) значно знижував частку живих клітин порівняно з контролем (на 74—98%), лише у розведенні 1:25 показники життєздатності клітин були в нормі (94—100%) (рис. 8, б). Його показник  $CC_{50}$  становить  $11,80 \pm 2,12$  у розведенні. Зразок ПВС-ПЕГ-1%

мас. Ag/ZnO показав значну цитотоксичну дію лише у нерозведеному стані (мітохондріальна активність клітин не перевищувала 4%), після розведення цього зразка у 5 разів мітохондріальна активність клітин Vero підвищувалася до 87—100%. Показник  $CC_{50}$  вказаного зразка становив  $2,40 \pm 0,14$  у розведенні.

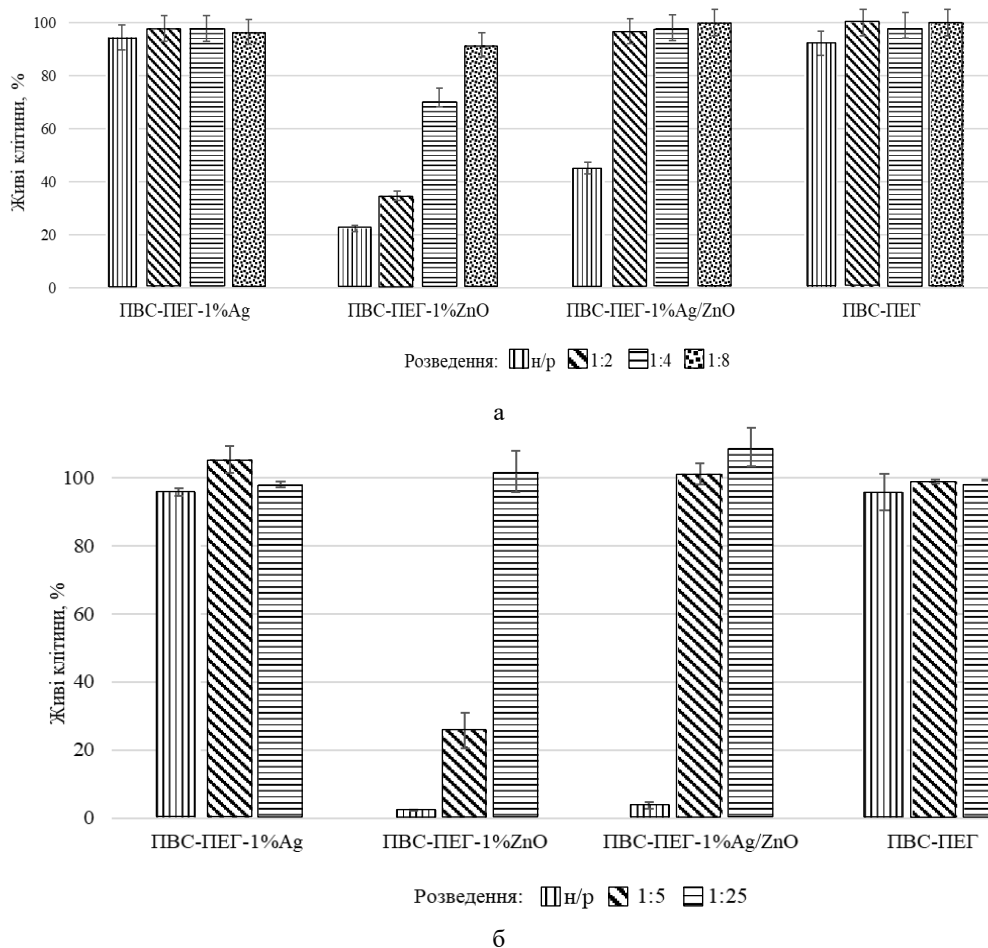


Рис. 8. Токсичний вплив зразків групи б на культури клітин: MDCK (а) та Vero (б)

## Висновки

Отже, проведені дослідження показали, що вихідні полімерні матриці, на основі яких формували гідрогелеві мембрани, характеризуються аморфно-кристалічною структурою. Було встановлено, що опромінення зразка PVC-ПЕГ-6000 швидкими електронами з утворенням гідрогелевих зшитих мембран приводить до збільшення його ступеня кристалічності з 47% до 53%. Методом ширококутового розсіювання рентгенівських променів було підтверджено утворення наночастинок Ag, ZnO та Ag/ZnO у зшитій полімерній матриці PVC-ПЕГ-6000. Найкращу бак-

терицидну активність щодо мікроорганізмів *S. aureus* та *E. coli* та найменшу токсичність продемонстрували зразки ПВС-ПЕГ, наповнені Ag та Ag/ZnO. Синергетичний ефект показав гідрогелевий матеріал ПВС-ПЕГ-1% мас. Ag/ZnO. Тобто зразок проявив кращий віруліцидний ефект відносно ВГА порівняно зі зразками ПВС-ПЕГ-1% мас. Ag чи ZnO.

Роботу виконано за фінансової підтримки гранту Національного фонду досліджень України (Розробка біополімерних нанокompозитних матеріалів для стимуляції регенерації живих тканин та загоєння ран. Ідентифікатор заявки 2023.05/0009).

## **Література**

Zahoor, I., & Mushtaq, A. (2023). Water pollution from agricultural activities: A critical global review. *International Journal of Chemical and Biochemical Sciences*, 23, 164—176.

Коновалова, В. В., Побігай, Г. А., Бурбан А. Ф., Лапінський, А. В. (2024). Очищення води від нітритів методом посиленої ультрафільтрації. *Journal of Chemistry and Technologies*, 32, 681—693. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v32i3.299283>.

Bauer, A. W., Kirby, W. M., Sherris, J. C., Turck M. (1996). Antibiotic susceptibility testing by a standardized single disk method. *American Journal of Clinical Pathology*, 45, 493—496. [https://doi.org/10.1093/ajcp/45.4\\_ts.493](https://doi.org/10.1093/ajcp/45.4_ts.493).

Brouillard, J. E., Terriff, C. M., Tofan, A., Garrison, M. W. (2006). Antibiotic selection and resistance issues with fluoroquinolones and doxycycline against bioterrorism agents. *The Journal of Human Pharmacology and Drug Therapy*, 26, 3—14. <https://doi.org/10.1592/phco.2006.26.1.3>.

Chelu, M., Musuc, A. M., Popa, M., Calderon Moreno, J. M. (2023). Chitosan Hydrogels for Water Purification Applications. *Gels*, 9, 664. <https://doi.org/10.3390/gels9080664>.

Crini, G., Badot, P.-M. (2008). Application of chitosan, a natural aminopolysaccharide, for dye removal from aqueous solutions by adsorption processes using batch studies: A review of recent literature. *Prog. Polym. Sci.*, 33, 399—447. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2007.11.001>.

Khorasani, M. T., Joorabloo, A., Adeli, H., Mansoori-Moghadam, Z., & Moghaddam, A. (2019). Design and optimization of process parameters of polyvinyl (alcohol)/chitosan/nano zinc oxide hydrogels as wound healing materials. *Carbohydrate Polymers*, 207, 542—554. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.12.021>.

Vatanpour, V., Teber, O. O., Mehrabi, M., & Koyuncu, I. (2023). Polyvinyl alcohol-based separation membranes: A comprehensive review on fabrication techniques, applications and future prospective. *Materials Today Chemistry*, 28, 101381. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2023.101381>.

DeMerlis, C. C., & Schoneker, D. R. (2003). Review of the oral toxicity of polyvinyl alcohol (PVA). *Food and Chemical Toxicology*, 41(3), 319—326. [https://doi.org/10.1016/s0278-6915\(02\)00258-2](https://doi.org/10.1016/s0278-6915(02)00258-2).

Waresindo, W. X., Luthfianti, H. R., Priyanto, A., Hapidin, D. A., Edikresnha, D., Aimon, A. H., Suciati, T., & Khairurrijal, K. (2023). Freeze-thaw hydrogel fabrication method: Basic principles, synthesis parameters, properties, and biomedical applications. *Materials Research Express*. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/acb98e>.

Demchenko, V. L., Shtompel, V. I. (2014). Structuring, Morphology, and Thermomechanical Properties of Nanocomposites Formed from Ternary Polyelectrolyte-Metal Complexes Based on Pectin, Polyethyleneimine, and CuSO<sub>4</sub>. *Polymer Science*, 56(6), 927—934. <https://doi.org/10.1134/S1560090414060049>.

Demchenko, V. L., Shtompel, V. I., Riabov, S. V. (2015). DC Field Effect on the Structuring and Thermomechanical and Electric Properties of Nanocomposites Formed from Pectin-Cu<sup>2+</sup>-Polyethyleneimine Ternary Polyelectrolyte-Metal Complexes. *Polymer Science*, 57(5), 635—643. <https://doi.org/10.1134/S0965545X15050065>.

Ham-Pichavant, F., Sebe, G., Pardon, P., Coma, V. (2005). Fat resistance properties of chitosan-based paper packaging for food applications. *Carbohydr. Polym.*, 61, 259—265. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2005.01.020>.

Naumenko, K., Zahorodnia, S., Pop, C. V., Rizun, N. (2013). Antiviral activity of silver nanoparticles against the influenza A virus. *J. Virus Erad.*, 9, 100330. <https://doi.org/10.1016/j.jve.2023.100330>.

Rybalchenko, N. P., Hnatiuk, T. T., Artiukh, L. O., Naumenko, K. S., Zaremba, P. Yu., Demchenko, V. L., Kokhtych, L. M., Iurzenko, M. V., Rybalchenko, T. V., Ovsyankina, V. O., Dolgoshey, V. B., Sytnyk, I. O., Marynin, A. I. (2023). Antimicrobial and antiviral activity of nanocomposites based on polyelectrolyte complexes and silver nanoparticles. *Microbiological Journal*, 86, 36—50. <https://doi.org/10.15407/microbiolj86.02.036>.

Ahmaruzzaman, M., Mishra, S. R., Gadore, V., Yadav, G., Roy, S., Bhattacharjee, B., Bhuyan, A., Hazarika, B., Darabdhara, J., & Kumari, K. (2024). Phenolic compounds in water: From toxicity and source to sustainable solutions — an integrated review of removal methods, advanced technologies, cost analysis, and future prospects. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 112964. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112964>.

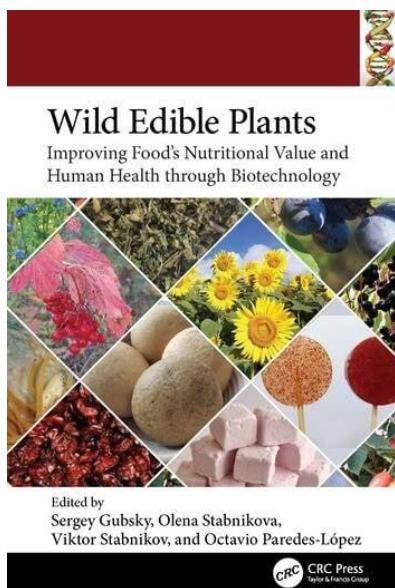
Suntornsuk, W., Pochanavanich, P., Suntornsuk, L. (2002). Fungal chitosan production on food processing by-products. *Process Biochem.*, 37, 727—729. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(01\)00265-5](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(01)00265-5).

Mitani, E., Ozaki, Y., & Sato, H. (2022). Two types of C O...HO hydrogen bonds and OH...OH (dimer, trimer, oligomer) hydrogen bonds in PVA with 88% saponification/PMMA and PVA with 99% saponification/PMMA blends and their thermal behavior studied by infrared spectroscopy. *Polymer*, 246, 124725. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2022.124725>.

Jiang, Y., Hou, Y., Fang, J., Liu, W., Zhao, Y., Huang, T., Cui, J., Yang, Y., & Zhou, Z. (2019). Preparation and characterization of PVA/SA/HA composite hydrogels for wound dressing. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 24(2), 132—141. <https://doi.org/10.1080/1023666x.2018.1558567>.

Mondal, S. K., Chakraborty, S., Manna, S., & Mandal, S. M. (2024). Antimicrobial nanoparticles: Current landscape and future challenges. *RSC Pharmaceutics*. <https://doi.org/10.1039/d4pm00032c>.

## Доробок українських науковців від видавництва CRC Press



Авторитетне міжнародне видавництво наукової літератури **CRC Press Taylor & Francis group** під керівництвом відомого біохіміка та дієтолога Октавіо Паредес-Лопеса видало книгу «**Wild Edible Plants Improving Food's Nutritional Value and Human Health through Biotechnology**», до якої увійшли дослідження українських учених.

Дикорослі рослини використовуються людьми як важливе джерело харчування з давніх часів. Вони багаті на корисні для здоров'я сполуки, такі як феноли, флавоноїди, антиоксиданти, вітаміни, мікроелементи та харчові волокна. При додаванні до харчових продуктів ця сировина підвищує харчову цінність, функціональність і сенсорні якості традиційних продуктів. У цій книзі представлено дослідження біотехнологічних підходів до розроблення м'ясних, хлібобулочних і кондитерських виробів, а

також напоїв, збагачених дикими їстівними рослинами. У ній висвітлюються останні досягнення використання дикорослих рослин як природних емульгаторів, стабілізаторів і загусників у харчових системах на основі водно-олійних емульсій. Крім того, обговорюється потенційне застосування їстівних водоростей та дикорослих грибів як у харчовій промисловості, так і в медицині.

Це видання охоплює останні розробки в галузі харчової біотехнології та слугує візуальним освітнім посібником, що пропонує вичерпні знання про дикорослі їстівні рослини, водорості та гриби, а також їхнє застосування у виробництві харчових продуктів.

Серед редакторів книги — завідувач кафедри біотехнології і мікробіології, професор *Віктор Стабніков* та доцент кафедри біотехнології і мікробіології *Олена Стабнікова*.

Книга призначена для здобувачів, викладачів, науковців та інженерів у харчовій промисловості та біотехнологічному секторах. Крім того, видання може слугувати цінним ресурсом для розробників інноваційних харчових технологій.

**Детальна інформація про книгу — за посиланням:**

<https://doi.org/10.1201/9781003486794>

## 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](mailto: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 А4 (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 формуються 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 англomовних 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 вмщатися 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 ([npnuht@nuft.edu.ua](mailto:npnuht@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