



2024

НАУКОВІ ПРАЦІ

НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Том 30 № 4

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

КИЇВ ✦ НУХТ ✦ 2024

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. Minutes of meeting # 1 from 5th of September, 2024

© NUFT, 2024

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 № 1 від 05 вересня 2024 року

© НУХТ, 2024

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

канд. техн. наук, доц., Україна

Ph.D., 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

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

Автоматизація та інформаційні технології

Михалюк А. П., Міркевич Р. М. Сучасний стан та аналіз кібербезпеки автоматизованих систем керування технологічними процесами та автоматизованих систем управління виробництвом

Скригун В. О., Седих О. Л., Грибков С. В. Інформаційна технологія для моделювання та управління екосистемою ІТ-проєкта

Безпека харчових продуктів і виробництв

Свтушенко О. В., Сірик А. О. Дослідження травматизму в галузі освіти

Біотехнології

Белемець Т. О., Красінко В. О., Удимович В. М., Чегринєць А. І. Потенційні ад'юванти та їх системи для створення новітніх вакцин

Механічна та електрична інженерія

Гавва О. О., Кривопляс-Володіна Л. О., Доломакін Ю. Ю., Марцінкевич Л. В., Кохан А. А. Обґрунтування параметрів живильника клапанного типу адаптронного модуля дозування рідкої продукції

Запорожець О. В., Володін С. О. Параметричний синтез мехатронної системи пневмотранспортування сипких продуктів

Козак О. С., Теличкун Ю. С., Теличкун В. І. Визначення реологічних характеристик м'якушки батона для розрахунку параметрів процесу вакуумного охолодження

Харчові технології

Кирпиченкова О. М., Сильчук Т. А., Силка І. М. Використання рослинної сировини в технології борошняних кондитерських виробів у закладах ресторанного господарства

Годунко Є. В., Заброда А. В., Бондаренко Ю. В., Білік О. А. Застосування лляної закваски спонтанного бродіння у виробництві рустикального хліба

Михонік Л. А., Черкас О. І., Ситниченко Т. О., Лебедець Т. Є., Хомич Г. П. Дослідження технологічних властивостей різних видів пшеничного цілнозернового борошна

Automation and information technologies

7 *Mykhaliuk A., Mirkevych R.* The current state and analysis of cyber security of process control system and automated manufacturing management system

31 *Skryhun V., Sedykh O., Hrybkov S.* Information technology for modeling and managing the IT project ecosystem

Food Products and Manufacturing Safety

40 *Yevtushenko O., Siryk A.* Research of injuries in the education sector

Biotechnologies

52 *Belemets T., Krasinko V., Udumovich V., Chegrynets A.* Potential adjuvants and their systems for the creation of new vaccines

Mechanical and Electrical Engineering

76 *Gavva O., Kryvoplias-Volodina L., Dolomakin Y., Martsynkevych L., Kokhan A.* Substantiation of the parameters of the valve-type feeder of the adaptronic module for dosing liquid product

88 *Zaporozhets O., Volodin S.* Parametric synthesis of a mechatronic system for pneumatic conveying of bulk products

99 *Kozak O., Telychkun Y., Telychkun V.* Determination of rheological characteristics of bread crumb for calculating the parameters of vacuum cooling process

Food Technologies

109 *Kyrpichenkova O., Sylchuk T., Sylka I.* Use of vegetable raw materials in the technology of flour confectionery products in restaurant industry

120 *Godunko Ie., Zabroda A., Bondarenko Yu., Bilyk O.* Application of flax sourdough spontaneous fermentation in rustic bread production

141 *Mykhonik L., Cherkas I., Symytenko T., Lebedenko T., Khomych G.* Technological research properties of different types of whole grain flour

-
- Радзієвська І. Г., Мельник О. П.* Особливості осадження білків сої при виробництві тофу 155 *Radzievska I., Melnyk O.* Features of soybean protein precipitation in tofu production
- Успенко О. В., Білько М. В., Кучеренко В. М.* 163 *Uspalenko O., Bilko M., Kucherenko V.* Methods of reducing and removing alcohol from grape wines
- Сімахіна Г. О.* Наукові підходи до вибору способу консервування ягід з мінімальними втратами вітамінного комплексу 185 *Simakhina G.* The scientific approaches to select a method for berries preservation with the minimal losses of vitamin complex
- Воронцов М. А., Галенко О. О.* Альтернативні джерела харчових волокон та їх використання у технології емульгованих м'ясопродуктів 198 *Vorontsov M., Galenko O.* Alternative sources of dietary fiber and their use in the technology of emulsified meat products

Хімічні науки

Chemical sciences

- Стаднічук Н. О., Левицька Н. П., Деміч А. А., Кроніковський О. І.* Актуальність визначення акриламідів у харчових продуктах і питній воді 216 *Stadnichuk N., Levytska N., Demich A., Kronikovskiy O.* Relevance of determining acrylamide in food products and drinking water

Ювілеї

- Ковбаса В. М., Грищенко А. М., Кохан О. О.* 225 75-річний ювілей кафедри технології хлібопекарських і кондитерських виробів та її здобутки
- Ковбаса В. М., Михонік Л. А.* Вчитель, науковець, керівник 233

УДК 621.317.73

THE CURRENT STATE AND ANALYSIS OF CYBER SECURITY OF PROCESS CONTROL SYSTEM AND AUTOMATED MANUFACTURING MANAGEMENT SYSTEM

A. Mykhaliuk, R. Mirkevych

National University of Food Technologies

Key words:

*SCADA cloud systems
Cyberattacks
Vulnerabilities
Network IDS/IPS
Insider threats
Supply chain security*

Article history:

Received 11.07.2024
Received in revised form
30.07.2024
Accepted 14.08.2024

Corresponding author:

A. Mykhaliuk

E-mail:

andrew.mikhaliuk@corew
in.ua

Citation: Михалюк А. П., Міркевич Р. М. (2024). Сучасний стан та аналіз кібербезпеки автоматизованих систем керування технологічними процесами та автоматизованих систем управління виробництвом. *Наукові праці НУХТ*, 30(4), 7—30.

DOI: 10.24263/2225-2924-2024-30-4-3

ABSTRACT

Vulnerabilities and cyberattacks that threaten the security of cloud-based SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) systems are analyzed in this study. Four key areas of vulnerability were identified that are critical to the functioning of these systems: communication between SCADA systems and cloud services, shared infrastructure, the possibility of insider attackers, and the robustness of SCADA protocol security.

Cyberattacks were classified into five main groups, including attacks on hardware, software, communication and protocols, management processes, and insider attacks. DoS (Denial of Service), MITM (Man-In-The-Middle) and APT (Advanced Persistent Threat) were identified as the most significant threats to cloud SCADA systems. To mitigate these threats, it is recommended using network IDS/IPS (Network Intrusion Detection Systems/Network Intrusion Prevention Systems, NIDS/NIPS).

However, some threats remain insufficiently addressed. Sophisticated malware, insufficient IoT (Internet of Things) security and reliance on cloud providers, and supply chain vulnerabilities pose additional risks to SCADA systems. There is particularly dangerous concept of competitive artificial intelligence, which can deceive security systems or carry out attacks on SCADA systems.

Measures to improve the security of cloud-based SCADA systems: implementing real-time security monitoring systems, developing robust incident response plans, regular security audits, improving IoT security, and working closely between different organizations to share threat information were also recommended.

In addition, the security of cloud-based SCADA systems requires further research to prevent future incidents and catastrophic events. In particular, potential quantum attacks and supply chain security need to be investigated, as these aspects may significantly affect the stability and security of SCADA systems in the future.

DOI: 10.24263/2225-2924-2024-30-4-3

СУЧАСНИЙ СТАН ТА АНАЛІЗ КІБЕРБЕЗПЕКИ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ВИРОБНИЦТВОМ

А. П. Михалюк, Р. М. Міркевич

Національний університет харчових технологій

У цьому оглядовому дослідженні аналізувалися вразливості та кібератаки, що загрожують безпеці хмарних систем SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). Виявлено чотири ключові області вразливості, що мають вирішальне значення для функціонування цих систем: зв'язок між системами SCADA та хмарними службами, спільна інфраструктура, можливість присутності зловмисників-інсайдерів і надійність безпеки протоколів SCADA.

Кібератаки класифікувалися на п'ять основних груп, що включають атаки на апаратне забезпечення, програмне забезпечення, зв'язок і протоколи, процеси керування й атаки зсередини. Найбільш значущими загрозами для хмарних систем SCADA були визначені DoS (Denial of Service), MITM (Man-In-The-Middle) та APT (Advanced Persistent Threat). Для пом'якшення цих загроз рекомендується використовувати мережеві IDS/IPS (Network Intrusion Detection Systems/Network Intrusion Prevention Systems, NIDS/NIPS).

Проте деякі загрози залишаються недостатньо вирішеними. Складне шкідливе програмне забезпечення, недостатня безпека IoT (Internet of Things) та залежність від постачальників хмарних технологій і вразливості в ланцюгу постачання створюють додаткові ризики для SCADA-систем. Особливо небезпечною є концепція змагального штучного інтелекту, що може обманювати системи безпеки або здійснювати атаки на SCADA-системи.

У дослідженні також рекомендуються заходи для підвищення безпеки хмарних систем SCADA: впровадження систем моніторингу безпеки в реальному часі, розробка надійних планів реагування на інциденти, регулярні перевірки безпеки, підвищення безпеки IoT і тісна співпраця між різними організаціями для обміну інформацією про загрози.

Крім того, безпека хмарних систем SCADA вимагає подальших досліджень для запобігання майбутнім інцидентам і катастрофічним подіям. Зокрема, необхідно дослідити потенційні квантові атаки та безпеку ланцюга постачання, оскільки ці аспекти можуть суттєво вплинути на стабільність і захищеність SCADA-систем у майбутньому.

Ключові слова: хмарні системи SCADA, кібератаки, вразливості, мережеві IDS/IPS, внутрішні загрози, безпека ланцюга постачання.

Постановка проблеми. Диспетчерське керування та збір даних (SCADA) являє собою архітектуру системи керування, необхідну для роботи критичної інфра-

структури в промислових секторах, включаючи виробництво електроенергії, видобуток нафти, газу та виробничі підприємства, зокрема й підприємства харчової промисловості. Ці системи полегшують роботу, контролюючи та відстежуючи дані та процеси в реальному часі, локально або віддалено. Вони використовують різні компоненти, такі як датчики, приводи, перемикачі й клапани (Morsey, 2017). Системи SCADA перейшли від автономних, ізольованих середовищ (наприклад, монолітних або розподілених) з обмеженими функціями та власними протоколами зв'язку до мережових платформ, що використовують глобальні мережі (WAN) з відкритими протоколами та стандартами зв'язку (Yadav, & Paul, 2021). Натепер системи SCADA перетворилися на відкриті системи, підключені до Інтернету, повністю інтегровані з мережами корпоративних інформаційних технологій (IT) і підтримують різні засоби, програмне забезпечення та Інтернет-протоколи, такі як TCP/IP (Yadav, & Paul, 2021; Cai, Wang, & Yu, 2008). Такий рівень інтеграції підвищив продуктивність та функціональні можливості SCADA систем, але в той же час зробив системи цього рівня вразливими для кібератак. Пропоноване дослідження присвячене огляду сучасного стану кібербезпеки в автоматизованих системах керування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Оскільки складні промислові операції вимагають передових і ефективних середовищ та обробляють величезні обсяги даних, у літературі пропонується перенести системи SCADA в хмару (Stojanović, Boštjančić-Rakas, & Marković-Petrović, 2019). Хмарні обчислення, що використовують паралельні та розподілені системи, пропонують IT-ресурси за конкретними угодами про рівень обслуговування між клієнтами й постачальниками послуг (Buyya, Yeo, & Venugopal, 2008). Хмарні системи можуть підвищити продуктивність традиційних систем за рахунок зниження технічних і промислових витрат. Ці складні системи покращують характеристики обчислювального середовища, зокрема якість обслуговування, надійність, гнучкість і ефективність зв'язку. Крім того, вони забезпечують відповідну конфігурацію та обслуговування системи (Mushtaq та ін., 2017).

Існують два методи інтеграції систем SCADA з технологіями хмарних обчислень (Stojanović, Boštjančić-Rakas, & Marković-Petrović, 2019).

Перший метод передбачає використання загальнодоступної хмарної інфраструктури, де програми SCADA виконуються в приміщеннях компаній або організацій. Хоча функції керування додатками SCADA залишаються ізольованими в мережі контролера, вони безпосередньо підключені до хмарних служб для передачі, зберігання та розподілу даних.

Другий метод використовує приватну або гібридну хмарну інфраструктуру, в якій додатки SCADA повністю виконуються в хмарі, а контролери віддалено підключаються до цих додатків через з'єднання WAN. Важливо, що забезпечення надійних заходів безпеки, мінімальної затримки та високої доступності послуг має вирішальне значення при переході критичної інфраструктури SCADA до хмарного середовища (Tariq, Asim, & Khan, 2019).

Хоча використання хмарних систем SCADA зростає в різних галузях промисловості, ці системи стикаються з тими ж проблемами кібербезпеки, що й інші системи, інтегровані в хмару. Дані в хмарі часто доступні та знаходяться у відкритому, розподіленому середовищі (Church та ін., 2017). Функції хмарних систем

SCADA, такі як моніторинг у реальному часі та/або контроль процесів, передача даних через Інтернет і віддалений доступ, створюють численні вразливості безпеки, якими можуть скористатися потенційні зловмисники. Ці вразливості дають змогу зловмисникам впроваджувати небезпечне програмне забезпечення, змінювати контрольні дані або блокувати передачу даних (Stojanović, Boštjančić-Rakas, & Marković-Petrović, 2019). Крім того, публічне хмарне середовище наражає ці системи на інші загрози безпеці, включаючи атаки на відмову в обслуговуванні (DoS), розподілені DoS (DDoS) й атаки типу «людина посередині» (MITM) (El Mrabet, Kaabouch, El Ghazi, & El Ghazi, 2018).

Дослідники в попередніх дослідженнях детально розглянули хмарні структури SCADA та їх основні компоненти, як зазначено в посиланнях (Church та ін., 2017; Church та ін., 2015; Wilhoit, 2013; Yi, Mueller, Yu, & Chuan, 2017). Однак за останні роки існує обмежена кількість наукових досліджень, присвячених проблемам безпеки, властивим цим ключовим інфраструктурам. Щоб згадати деякі з них, автори (Bhamare та ін., 2020; Alakbarov, & Hashimov, 2023) загалом розглядали широкі вразливості та кібератаки хмарних систем SCADA, включаючи обмежений контроль безпеки над даними, втрату з'єднання, відсутність стандартизації безпеки та відсутність достатньої автентифікації та механізми шифрування. Дослідники пропонують різні заходи кібербезпеки, такі як шифрування, системи виявлення вторгнень і розробка безпечної архітектури для виявлення та пом'якшення кіберзагроз у хмарних середовищах. Крім того, у статті (Alakbarov, & Hashimov, 2023) підкреслюється важливість регулярного аналізу журналів, застосування рішень безпеки на основі блокчейну для покращення цілісності та контролю даних, а також необхідність ретельного резервного копіювання та відновлення даних. У системах присутні вразливі місця та загрози системам SCADA у хмарних середовищах Інтернету речей (IoT) (Sajid, Abbas, & Saleem, 2016), включаючи ризики безпеки, пов'язані з реєстрацією даних, відсутністю механізмів автентифікації та шифрування, а також загрози відсутності захисту вбудованих пристроїв, в основі промислових систем SCADA на основі IoT.

Інші дослідження класифікують різні атаки на основі конкретних критеріїв. Загрози для критичної інфраструктури, представляючи різні атаки на системи SCADA, аналіз атак на критичну інфраструктуру та вектори атак з підтримкою IoT, включаючи їхній вплив на охорону здоров'я, транспортні системи та стільникову інфраструктуру 5G присутні у авторів по цій темі (Maglaras та ін., 2018). Для захисту критично важливих інформаційних активів у документі описано заходи кібербезпеки, класифіковані відповідно до правових, технічних, організаційних аспектів, аспектів нарощування потенціалу та співпраці. Він підкреслює важливість розвідки кіберзагроз для превентивних заходів протидії потенційним атакам.

Автори рекомендують вивчати нові протоколи SCADA, розроблені для задоволення вимог Industry 4.0, інтегрувати концепції IoT, використовувати технології віртуалізації, такі як Software Defined Networking (SDN) і Network Function Virtualization (NFV), застосування аналітики великих даних для підвищення безпеки SCADA та прийняття структури кібергігієни SCADA (Pliatsios, Sarigiannidis, Laggas, & Sarigiannidis, 2020). Подібним чином у статті (Ghosh, & Sampalli, 2019) представлено класифікацію атак на основі потреб безпеки та рівнів мережевого

протоколу систем SCADA. Ця класифікація охоплює атаки на апаратне забезпечення, програмне забезпечення та мережеві з'єднання. У ньому розглядаються численні схеми безпеки, запропоновані для усунення вразливостей мережі SCADA, організовуючи їх на основі поточних стандартів, виявлення та запобігання атакам.

Метою дослідження є огляд, аналіз і дослідження сучасного стану інформаційної безпеки автоматизованих систем керування технологічними процесами й автоматизованих систем управління об'єктів критичної інфраструктури та виробничих підприємств, зокрема підприємств харчової промисловості.

Матеріали і методи. Використані сучасні наукові матеріали, у яких досліджується використання методів інформаційної безпеки автоматизованих систем керування. Як методичне забезпечення застосовано практичні інженерні методи розробки та імплементації автоматизованих систем керування технологічними процесами й виробництвами з урахуванням вимог інформаційної безпеки, описані в таких міжнародних і галузевих технічних стандартах, як серія стандартів ІЕС 62443-2-1 (ISA-99).

Викладення основних результатів дослідження. Загалом, обсяг існуючих досліджень безпеки хмарних систем SCADA часто звужується до конкретних типів атак, а результати розкидані по численних публікаціях. Усуваючи цю прогалину, наше дослідження має на меті запропонувати всебічний огляд основних вразливостей і кібератак, спрямованих на хмарні системи SCADA. Крім того, буде розглянуто ряд існуючих рішень безпеки, розроблених для посилення цих систем проти таких загроз.

Щоб зрозуміти вразливості та кібератаки, описані далі, пропонується короткий огляд архітектури традиційних і хмарних систем SCADA, а також основних технологій, які використовуються в обох системах.

Традиційні системи SCADA складаються з інтеграції апаратних компонентів, програмного забезпечення та каналів зв'язку, які полегшують моніторинг, контроль і управління промисловими процесами. Апаратне забезпечення включає віддалені термінали (RTU), програмовані логічні контролери (PLC), інтелектуальні електронні пристрої (IED), головні термінали (MTU), а також виконавчі пристрої та датчики. Програмне забезпечення охоплює людино-машинний інтерфейс (HMI), центральну базу даних (Historian) та інше програмне забезпечення користувача (Yadav, & Paul, 2021). RTU збирають дані в режимі реального часу від датчиків у фізичному середовищі через канали LAN/WAN і передають цю інформацію до MTU. Поряд з ПЛК та IED, RTU локально керують виконавчими механізмами та контролюють датчики SCADA (Stojanović, Bošljančić-Rakas, & Marković-Petrović, 2019). RTU також передають дані поточного стану підключених фізичних пристроїв. MTU діє як центральна станція моніторингу, видаючи команди RTU, відповідаючи на їхні повідомлення, обробляючи та зберігаючи дані, аналізуючи інформацію та створюючи звіти для майбутнього зв'язку.

HMI діє як інтерфейс між апаратним і програмним забезпеченням SCADA, полегшуючи контроль, моніторинг і зв'язок між RTU і MTU. Historian відповідає за зберігання даних зв'язку, подій і сигналів тривоги та виконує функції централізованої бази даних або сервера. Він підтримує HMI, надаючи дані для графічного аналізу трендів. Комунікаційна мережа забезпечує взаємодію між компонентами SCADA, використовуючи бездротові або дротові засоби масової інформації.

Часто перевагу надають бездротовому зв'язку через його ефективність у з'єднанні географічно розподілених і віддалених районів. Ця мережа, зазвичай, ізольована від зовнішніх мереж, щоб зменшити ризики кібербезпеки. Традиційні системи SCADA працюють незалежно на місці та часто використовують закриті, специфічні для постачальника та власні протоколи зв'язку в режимі реального часу (наприклад, TCP/IP, Modbus), які підвищують безпеку через невідомість, але можуть обмежити взаємодію. На рис. 1 показано загальну архітектуру традиційної системи SCADA. Для отримання додаткової інформації ми відсилаємо читача до (Yadav, & Paul, 2021; Stojanović, Boštjančić-Rakas, & Marković-Petrović, 2019).

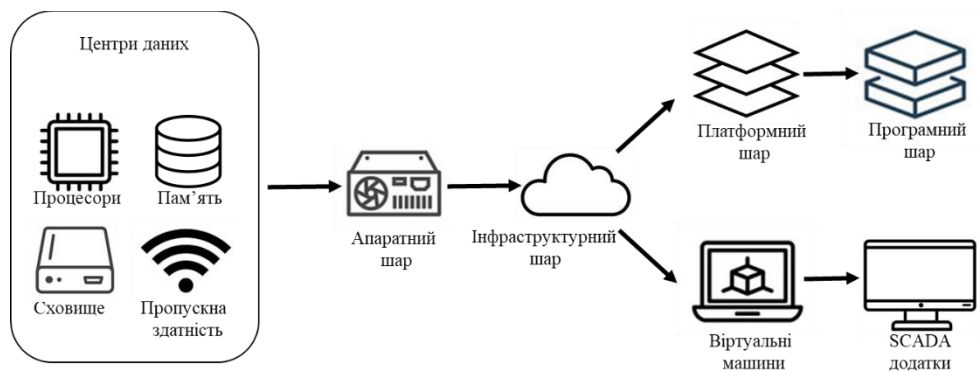


Рис. 1. Архітектура традиційних систем SCADA

У хмарній системі SCADA архітектура, зазвичай, передбачає інтеграцію додатків SCADA з хмарними службами для підвищення масштабованості, доступності та рентабельності (Combs, 2011). На додаток до різних традиційних компонентів систем SCADA, хмарна архітектура відповідає за більш широку обробку даних, зберігання та розширену аналітику (Yadav, & Paul, 2021). Він забезпечує глобальний доступ до даних, підтримує масштабні обчислювальні завдання та розміщує додатки, які вимагають значної обчислювальної потужності. Контролери, такі як RTU та PLC, підключаються через канали WAN до програм SCADA, що виконуються в хмарі (Sajid, Abbas, & Saleem, 2016).

Хмарні системи SCADA включають інтеграцію Cyber-Physical Systems (CPS)/IoT, що забезпечує підключення широкого спектра датчиків і пристроїв та полегшує збір і автоматизацію даних у реальному часі. Сервіси хостингу, як-от туманні вузли, які включають промислові контролери, маршрутизатори та вбудовані сервери, діють як посередники, обробляючи дані ближче до їх джерела, щоб покращити обробку в реальному часі, зменшити затримку та підтримати локальну аналітику та зберігання даних (Yadav, & Paul, 2021; Byers, 2018). Крім того, функції керування в додатку SCADA відокремлені в мережі контролера, тоді як сам додаток підключено до хмарних служб для візуалізації, звітності та віддаленого доступу (Stojanović, Boštjančić-Rakas, & Marković-Petrović, 2019). Комунікаційні мережі в хмарних системах SCADA підтримують різні протоколи та стандарти (наприклад, протокол розподіленої мережі (DNP3)), забезпечуючи взаємодію та безпечний обмін даними між пристроями та хмарою (Nugent, 2017). Інфраструктура також інтегрує технології безпеки, такі як брандмауери, які контролюють

вхідний і вихідний мережевий трафік, і включає в себе шифрування, автентифікацію, системи виявлення вторгнень і механізми контролю доступу для захисту від кіберзагроз (Howard, 2015).

Загалом, системи хмарних обчислень пропонують чотири основні рівні послуг для додатків SCADA, кожен з яких структурований ієрархічно таким чином (Stojanović, Boštjančić-Rakas, & Marković-Petrović, 2019; Combs, 2011):

1. Апаратний рівень, розташований у центрах обробки даних, складається з основних фізичних компонентів, таких як процесори, пам'ять, сховище та пропускна здатність.

2. Рівень інфраструктури впроваджує віртуалізацію та надає інфраструктуру як послугу (IaaS), що містить пул віртуальних машин (VM), на яких розміщені програми SCADA і може бути наданий на вимогу ІТ-користувачам.

3. Рівень платформи базується на службах інфраструктури, щоб пропонувати платформу як послугу (PaaS), що дає змогу розробляти й доставляти програмне забезпечення через Інтернет.

4. Рівень програмного забезпечення надає готове до використання рішення та програми, що задовольняють різноманітні потреби бізнесу та надають програмне забезпечення як послугу (SaaS) за допомогою компонентів і служб рівня платформи.

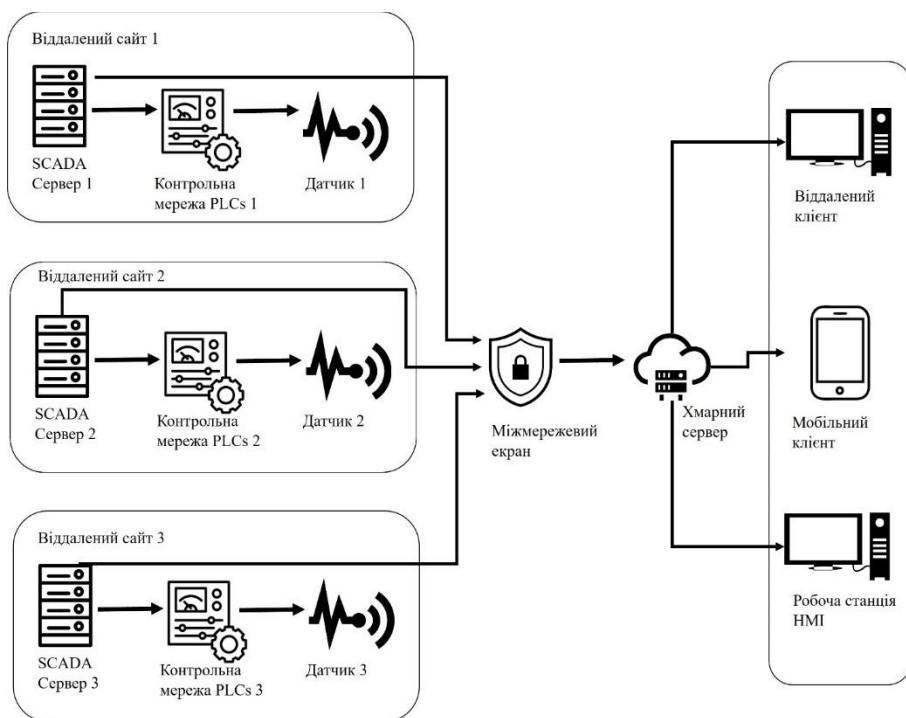


Рис. 2. Архітектура хмарних SCADA системи

Перехід до хмарних систем SCADA від традиційних архітектур знаменує значний зсув до більш інтегрованих, інтелектуальних і гнучких промислових систем

управління. Хоча хмарні системи пропонують численні переваги, вони також створюють нові проблеми, особливо щодо кібербезпеки та конфіденційності даних. В обох архітектурах наголос на безпеці (як за допомогою кібернетичних, так і фізичних засобів) залишається першочерговим, що підкреслює критичну важливість захисту промислових процесів та інфраструктури.

У результаті аналізу літературних джерел можна виділити чотири основні фактори вразливості:

- підключення до хмарних сервісів;
- спільна інфраструктура;
- шкідливі інсайдери;
- безпека протоколів SCADA.

Крім того, було окреслено п'ять категорій кібератак:

- апаратні;
- програмні;
- комунікаційні та протокольні;
- контрольні атаки;
- інсайдерські атаки.

У межах цих атак на програмне забезпечення додатково класифікуються як промислові системи управління (ICS), які засновані на вразливостях або специфічні для хмари. Найпоширенішими тактиками під час різноманітних кібератак, що впливають на безпеку хмарних систем SCADA, є DoS, MITM і атаки на розширені стійкі загрози (APT). Рис. 3 ілюструє загальну класифікацію факторів вразливості, кібератак і їх загальну тактику, отриману з підходу індуктивного узагальнення, застосованого до відповідних досліджень. Також у цьому документі обговорюються кілька відповідних рішень безпеки для хмарних обчислень загалом і хмарних систем SCADA зокрема, рекомендовано їх застосування для виявлення та запобігання кібератак.

Попередні дослідження вивчали загальні фактори вразливості та проблеми безпеки в хмарних системах SCADA. Ці виклики варіюються від людських помилок і недостатніх ресурсів для фізичних пристроїв до власних протоколів і незахищених застарілих систем. Незахищені застарілі інтерфейси керування, підключення до Інтернету, підключені промислові пристрої Інтернету речей (IIoT) і різноманітні пристрої, які можна взяти з собою (BYOD) (Mesbah, Elsayed, Jurcut, & Azer, 2023), разом із нещасними випадками через недбалість і збої обладнання (Rakas, Stojanović, & Marković-Petrović, 2020), все це може служити точками входу в системи для кібератак, введення вразливостей. Крім того, незахищені віртуальні машини, недоступність хмарної інфраструктури (Nazir, Patel, & Patel, 2020), викрадення облікового запису або трафіку служби (Cerullo, Mazzeo, Papale, Sgaglione, & Cristaldi, 2016), проблеми з безпекою промислової автоматизації та пристроїв аналізу, невідповідні механізми безпеки програмного забезпечення в багатьох промислових датчиках, що виконують процеси в реальному часі (Mesbah, Elsayed, Jurcut, & Azer, 2023), а також відсутність належних бекдор-можливостей деякими виробниками для керування та оновлення промислових пристроїв (Ulltveit-Moe та ін., 2016) є значними факторами вразливості, які організації повинні враховувати після переходу на хмарну інфраструктуру.

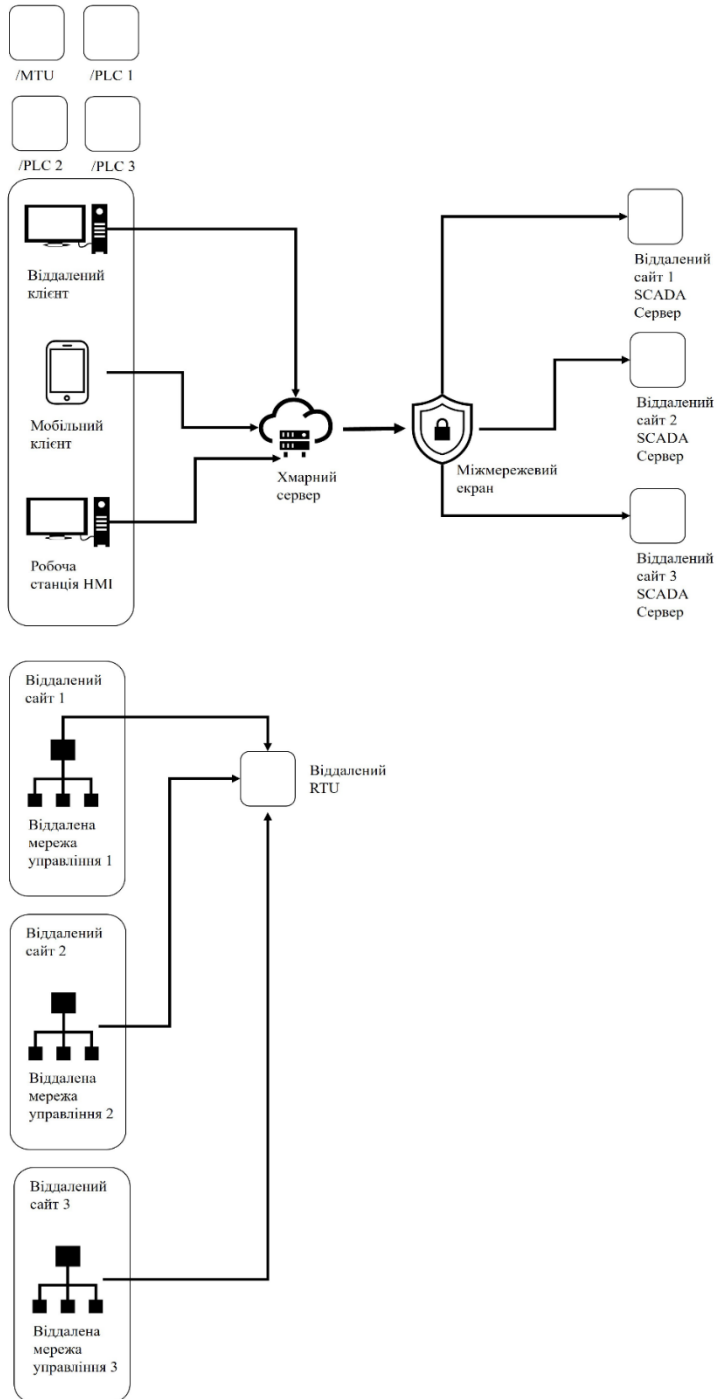


Рис. 3. Промислова система управління (ICS) з інтеграцією SCADA та хмари

Аналіз кібератак, спрямованих на хмарні системи SCADA, виявив чотири поширені вразливості:

- взаємозв'язок між системами SCADA та хмарними службами;
- використання спільної інфраструктури;
- присутність зловмисників інсайдерів;
- надійність безпеки протоколів SCADA.

Традиційні системи SCADA, розроблені як закриті системи без підключення до Інтернету, служать захисним механізмом. Однак міграція цих систем у хмару піддає їх складним мережевим середовищам, збільшуючи таким чином загрози безпеці, подібні до тих, з якими стикається будь-яка хмарна інфраструктура (Stojanović, Boštjančić-Rakas, & Marković-Petrović, 2019; Sajid, Abbas, & Saleem, 2016). У хмарних системах SCADA локальні пристрої можуть втратити зв'язок із віддаленими компонентами, що призведе до затримок у виробничих процесах, втрати даних і поширення помилок в інших компонентах системи (Bhamare та ін., 2020). Це пояснюється необхідністю підключення до хмарних центрів обробки даних, що є критичним аргументом проти впровадження хмарних обчислень (Yi, Mueller, Yu, & Chuan, 2017). Розгортання даних і програм у хмарі та доступ до них через Інтернет за своєю суттю підвищує вразливість системи до атак зловмисних користувачів (Nazir, Patel, & Patel, 2020).

На відміну від традиційних систем, компоненти хмарних систем SCADA не дотримуються єдиної системи безпеки, що призводить до непослідовної операційної продуктивності (Bhamare та ін., 2020). Це вимагає розгляду додаткових питань безпеки, включаючи відстеження хакерів, витік інформації, проблеми затримки та конфіденційності (Yadav, & Paul, 2021).

Таблиця 1. Вразливість «Підключення між системою SCADA та хмарною службою» впливає на хмарні системи SCADA (на основі статей за 2016—2024 рр.)

Вплив вразливості	Автор(и) публікації	Рік вразливості
Залежність від хмарного зв'язку робить систему SCADA більш вразливою до зовнішнього доступу	Sajid, Abbas, & Saleem	2016
Загрози безпеці зростають через необхідне підключення до публічної хмари	Yi, Mueller, Yu, & Chuan	2017
Підвищення ризиків, які потенційно можуть вплинути на безпеку хмарних систем SCADA	Stojanović, Boštjančić-Rakas, & Marković-Petrović	2019
Втрата з'єднання призводить до затримки процесів, втрати даних і проблем із конфіденційністю	Bhamare та ін.	2020
Зв'язок через публічну хмару наражає систему SCADA на потенційні кібератаки	Nazir, Patel, & Patel	2020
Покладення на хмарний зв'язок може наражати SCADA на атак типу «відмова в обслуговуванні» (DoS) і атак типу «людина посередині» (MITM)	Yadav, & Paul	2021

Спільне використання інфраструктури із зовнішніми неідентифікованими користувачами створює різні загрози для таких систем (Stojanović, Boštjančić-Rakas,

& Marković-Petrović, 2019). Зокрема, ризики пов'язані з можливістю спільного використання апаратної інфраструктури, як-от фізичних серверів, з іншими суб'єктами, такими як підприємства чи конкуренти. Ці об'єкти можуть використовувати методи впровадження команд/відповідей для системних атак. Це призводить до кількох наслідків, потенційно впливаючи на хмарні системи SCADA в їхніх критичних програмах реального часу (Nazir, Patel, & Patel, 2020). Функція багатокористування в хмарних технологіях створює значні ризики, особливо якщо гіпервізор або монітор віртуальної машини не мають надійного захисту. Вторгнення у віртуальні машини на одному гіпервізорі можуть спричинити зловмисну діяльність, порушуючи цілісність і конфіденційність даних критичної інфраструктури (Cerullo, Mazzeo, Papale, Sgaglione, & Cristaldi, 2016). Основні впливи вразливості спільної інфраструктури на хмарні системи SCADA підсумовано в табл. 2.

Таблиця 2. Вразливість «Спільної інфраструктури» впливає на хмарні системи SCADA (на основі статей за 2016—2024 рр.)

Вплив вразливості	Автор(и) публікації	Рік вразливості
Ризики безпеки виникають через функцію мультиорендування, притаманну хмарним технологіям	Cerullo, Mazzeo, Papale, Sgaglione, & Cristaldi	2016 рік
Спільне використання інфраструктури із зовнішніми сторонами наражає систему на ін'єкції команд/відповідей, включаючи атаки DoS і MITM	Stojanović, Boštjančić-Rakas, & Marković-Petrović	2019 рік
Хмарні постачальники не гарантують, що ресурси SCADA не будуть передаватись іншим підприємствам, що потенційно може призвести до загроз для системи	Nazir, Patel, & Patel	2020 рік

Зловмисні інсайдери, зазвичай, вважаються найсерйознішою загрозою для будь-якої системи, критичні системи, такі як системи SCADA, які контролюють промислові операції насамперед є метою таких зловмисників. Це можуть бути колишні співробітники, системні адміністратори або постачальники хмарних послуг із привілейованим доступом до системних ресурсів. Ці інсайдери створюють внутрішні вразливості системи безпеки (Sajid, Abbas, & Saleem, 2016; Cerullo, Mazzeo, Papale, Sgaglione, & Cristaldi, 2016). Різноманітні загрози безпеці, створені зловмисниками, включають несанкціонований доступ і контроль, порушення даних, крадіжку даних, маніпулювання даними та їх використання (Bhamare та ін., 2020).

Ці загрози безпеці можуть призвести до навмисних або ненавмисних помилок, потенційно завдаючи значної шкоди системі. Цей ризик підвищується, оскільки інсайдери володіють детальними знаннями про роботу системи (Nazir, Patel, & Patel, 2020). У контексті Інтернету речей (IoT) у хмарних системах SCADA співробітники, постачальники та підрядники часто підключаються до цих систем. Вони можуть мати дозвіл на доступ до мережевих датчиків або керування ними, дозволяючи їм додавати або оновлювати функції та отримувати доступ до виробничих даних і статистики. Спроби заблокувати або припинити ці форми авторизованого

доступу можуть призвести до завершення роботи хмарної системи SCADA всієї організації (Ulltveit-Moe та ін., 2016). У табл. 3 узагальнено основні впливи вразливості, спричинені фактором зловмисників у хмарних системах SCADA.

Таблиця 3. Вразливість «зловмисних інсайдерів» впливає на хмарні системи SCADA (на основі статей за 2016—2024 рр.)

Вплив вразливості	Автор(и) публікації	Рік вразливості
Зловмисні адміністратори хмарного постачальника (CP) або будь-який інший користувач із привілейованим доступом до ресурсів постійно загрожуватимуть системі	Cerullo, Mazzeo, Papale, Sgaglione, & Cristaldi	2016
Загрози, пов'язані із зовнішніми особами та постачальниками хмарних послуг	Sajid, Abbas, & Saleem	2016
Співробітники та постачальники, пов'язані з хмарою, можуть мати авторизований доступ до датчиків у мережі та/або контролю над ними, що потенційно може призвести до різноманітних ризиків безпеці	Cerullo, Mazzeo, Papale, Sgaglione, & Cristaldi	2016
Інші віддалені користувачі хмари зловживають недоліками системи	Bhamare та ін.	2020
Втрата доступу до ресурсів системи SCADA може бути спричинена як злими намірами співробітників КП, так і невинними помилками	Nazir, Patel, & Patel	2020

Іншим фактором, що сприяє вразливості хмарних систем SCADA до різноманітних загроз безпеці, є відсутність захисту в деяких традиційних протоколах зв'язку SCADA, таких як Modbus/TCP, серії 60870-5 Міжнародної електротехнічної комісії (IEC), IEC 61850 і DNP3 (Sajid, Abbas, & Saleem, 2016). Ці протоколи не підтримують механізми автентифікації та шифрування (Stojanović, Boštjančić-Rakas, & Marković-Petrović, 2019; Mesbah, Elsayed, Jurcut, & Azer, 2023) і страждають від відсутності елементів керування захистом (Yadav, & Paul, 2021). У результаті ці протоколи відкривають системні програми, що працюють у хмарі, і забезпечують зловмисникам легкий доступ до приватних облікових даних, таких як IP-адреси та імена користувачів, під час використання хмари. Крім того, неадекватна безпека в таких протоколах, як стандарт IEC 61850, який використовується для інтелектуальних електронних пристроїв на електричних підстанціях, використовує вразливі місця систем SCADA та створює ключові проблеми управління для мереж SCADA (Sajid, Abbas, & Saleem, 2016). У табл. 4 описано основний вплив цих вразливостей безпеки на хмарні системи SCADA.

Таблиця 4. Вразливість «протоколів системи SCADA» впливає на хмарні системи SCADA (на основі статей за 2016—2024 рр.)

Вплив вразливості	Автор(и) публікації	Рік вразливості
Системи SCADA використовують Modbus/TCP, IEC 61850 і DNP3 для автоматизації та керування. Однак ці протоколи не захищені та наражають операції керування та автоматизації на кібератаки	Sajid, Abbas, & Saleem	2016

Спеціальні для SCADA протоколи прикладного рівня, такі як Modbus і DNP3, не підтримують елементи керування шифруванням і автентифікацією, що негативно впливає на безпеку хмарних систем SCADA	Stojanović, Boštjančić-Rakas, & Marković-Petrović	2019
Ризики безпеки в традиційній системі SCADA поширюються через відсутність засобів керування захистом у Modbus/TCP, IEC 40 та DNP3	Yadav, & Paul	2021

Кібератаки на хмарні системи SCADA розглядаються або широко (Bhamare та ін., 2020; Alakbarov, & Hashimov, 2023; Rashid, Gardiner, Green, & Craggs, 2019) або класифікують їх на основі конкретних критеріїв, таких як пасивний або активний, внутрішній або зовнішній (Maglaras та ін., 2018) та цілі атак (Stojanović, Boštjančić-Rakas, & Marković-Petrović, 2019; Pliatsios, Sarigiannidis, Lagkas, & Sarigianididis, 2020; Ghosh, & Sampalli, 2019). Оскільки найпоширенішим критерієм класифікації багатьма дослідниками є ціль атаки або частина системи, яка зазнала атаки чи була використана, ми застосовуємо цей критерій у нашому опитуванні та розширюємо існуючу класифікацію на п'ять типів атак: апаратні, програмні, комунікаційні та протокольні, контроль процесу і внутрішні атаки на програмне забезпечення поділяються на категорії, пов'язані з ICS, на основі вразливостей або на хмару.

Апаратне забезпечення в хмарних системах SCADA взаємопов'язане з різноманітними глобальними компонентами та різними бібліотеками сторонніх розробників, що забезпечує складну взаємодію всередині систем. Основні апаратні елементи включають центр керування та контролери, такі як RTU, PLC та інтелектуальні електронні пристрої.

Центр управління збирає та аналізує дані з польових об'єктів, відображає ці дані на консолях HMI і діє на основі виявлених подій. Контрольні функції контролерів збирають дані та передають їх у хмару для зберігання та розповсюдження. Додаткові системні компоненти включають сервер MTU, сервери додатків, сервер Historian, інженерні робочі станції, сервер HMI та консолі, а також комунікаційні пристрої, такі як маршрутизатори, комутатори та модеми (Stojanović, Boštjančić-Rakas, & Marković-Petrović, 2019).

Загалом, постачальники систем SCADA знають про загрози безпеці апаратного забезпечення, такі як бекдор-атаки. Крім того, бездротові пристрої, які постачають дані традиційним системам SCADA, не мають надійного захисту через мінімальні вимоги до потужності, що є доступним вектором для системних вторгнень (Nazir, Patel, & Patel, 2020).

Апаратні атаки в хмарній інфраструктурі — це вразливі місця на апаратному рівні, включаючи ін'єкції троянських програм і порушення надійності та безпеки (McLaughlin та ін., 2016). Ці вразливості дозволяють несанкціоновану модифікацію мікропрограми, зворотне проектування логіки через порти Joint Test Action Group і пошкодження друкованої плати через маніпулювання накопичувачами універсальної послідовної шини, що може змінити налаштування системи доменних імен (DNS), що призводить до перенаправлення зв'язку.

Ще одна складна апаратна атака, спрямована як на програмне, так і на апаратне забезпечення ICS, була описана в (Nazir, Patel, & Patel, 2020). У цій атаці використовується зловмисне програмне забезпечення Web Graphics Library для проникнення в апаратне забезпечення графічного процесора (GPU) через найменш привілейовані віддалені сторони, потенційно відкриваючи вміст із пам'яті GPU після робочих навантажень. Ця атака може поширюватися від центральної системи до інших пристроїв і використовуватися для ініціювання атак DoS, порушуючи роботу ICS.

Крім того, апаратне забезпечення системи SCADA може стати мішенню зловмисного програмного забезпечення, введеного в мікропрограму ПЛК, таким чином ставлячи під загрозу безпеку контролера. Крім того, несанкціонований доступ до фізичного розташування систем SCADA може призвести до суттєвих збоїв у роботі, включаючи втручання в налаштування критичних порогів (Irmak, & Erkek, 2018). Атаки на обладнання також можуть бути наслідком втрати живлення пристрою через перемикачі, навмисного пошкодження або фізичних атак на мережу керування (Chromik, Remke, & Haverkort, 2016).

Програмне системи SCADA охоплюють всі додатки, які використовуються для роботи систем SCADA додатки для керування обладнанням, збору інформації, процедур контролю та моніторингу, діагностики та обслуговування даних, а також середовища розробки клієнт/сервер і сторонніх розробників (Daneels, & Salter, 1999). Програмні атаки на системи SCADA викликають основне занепокоєння, ідентифікуються як кіберкінетичні атаки, які є складними та можуть загрожувати життю та завдати фізичної шкоди (Resul, & Gündüz, 2020). Ці кібератаки можна здійснити за допомогою різних методів, таких як ін'єкції зловмисного програмного забезпечення, ін'єкції команд/відповідей, фішинг, DoS-атаки, атаки ін'єкції SQL, атаки MITM та APT (Stojanović, Boštjančić-Rakas, & Marković-Petrović, 2019). У хмарних системах SCADA атаки на програмне забезпечення можна класифікувати як пов'язані з ICS, на основі вразливостей або специфічні для хмари.

Приклади загальних атак, які можуть вплинути на ICS, контрольовані системами SCADA, включаючи:

- атаки APT;
- атаки DDoS;
- пошкодження мережевих послуг голосу і даних;
- комбіновані кібер- та фізичні напади;
- атаки, ініційовані хактивістами;
- компрометації або збої в ланцюзі поставок (Bhamare та ін., 2020).

Кілька резонансних сценаріїв атак на ICS та критичну інфраструктуру, таких як інциденти MITM, ін'єкції запитів на керування, атаки на повторне відтворення на RTU та маніпуляції з керуванням контактами (Green, Krotofil, & Abbasi, 2017). Крім того, автори в (Rashid, Gardiner, Green, & Craggs, 2019) зазначили, що сприйняття помилки значно сприяли успіху цих атак. Ці помилки сприйняття пов'язані з чотирма вимірами: якістю системи, межами системи, спостережливістю та керуваністю.

Існують різні програмні атаки, що впливають на критичну інфраструктуру систем SCADA, включно з вірусами-троянами, спалахами хробаків Stuxnet, хробаками Slammer, зловмисними програмами Flame, Dragonfly, DDoS і MITM (Tariq,

Asim, & Khan, 2019). Крім того, атаки на соціальному рівні, такі як соціальна інженерія, внутрішні загрози та фішингові схеми. Також описані кібератаки на системи SCADA електромереж, деталізуючи:

- пошкодження або втрату IT-активів через атаки, які маніпулюють системними даними;
- шкідливі дії, такі як зловживання IT-активами з навмисним втручанням в інформаційні системи (наприклад, DoS);
- підслуховування, перехоплення та викрадення, які сприяють несанкціонованому зв'язку із системними пристроями (наприклад, MITM) (Chromik, Remke, & Haverkort, 2016).

Програмні атаки — це вразливості на програмному рівні, починаючи від помилок кодування і закінчуючи неналежним впровадженням механізмів контролю доступу (Rashid, Gardiner, Green, & Craggs, 2019). З іншої боку, атаки на програмне забезпечення також описують як такі, що виникають через недоліки в дизайні та реалізації вихідного коду, включаючи такі проблеми, як переповнення буфера, впровадження SQL, міжсайтовий сценарій (XSS) і неадекватне керування виправленнями (Irmak, & Erkek, 2018).

Атаки на програмне забезпечення описують як використання зловмисниками слабких місць для отримання неавторизованого доступу до систем (Demertzis, & Piadis, 2018). Наприклад, конкретні атаки, спрямовані на енергосистему SCADA, такі як введення команд віддаленого відключення, зміни налаштувань реле та атаки введення даних.

Атаки на програмне забезпечення розглядаються з різних точок зору, визнаючи їх викликами кібербезпеки та вразливими місцями, які потенційно можуть вплинути на системи SCADA, зокрема щодо виправлення та людського фактору (Cherdantseva та ін., 2016). Вони відзначили, що виправлення можуть ненавмисно створити нові вразливості або порушити роботу систем, особливо тих, які потребують безперервної роботи 24/7. Крім того, людський фактор може призвести до помилок, викликаючи ненавмисні атаки та соціальну інженерію, яка може призвести до навмисних внутрішніх і зовнішніх атак.

Загалом програмні атаки на хмарні системи SCADA передусім включають APT, порушення цілісності даних, атаки MITM, атаки відтворення та атаки DoS (Sajid, Abbas, & Saleem, 2016). Ці програмні атаки класифікуються на чотири категорії (Nechibvute, & Mafukidze, 2023):

- загрози доступності, що охоплюють віднімання пристрою, DDoS-атаки, крадіжки послуг, атаки на шляху та виснаження ресурсів вузла;
- загрози цілісності, пов'язані з неправильною конфігурацією, ін'єкцією зловмисного програмного забезпечення, ін'єкцією неправдивих даних, піддробкою та маніпулюванням інформацією про маршрутизацію;
- загрози конфіденційності, які охоплюють крадіжку конфіденційної інформації, пасивний аналіз трафіку, розкриття статусу вузла та розголошення інформації про інфраструктуру;
- загрози автентифікації, включаючи ескалацію привілеїв, соціальну інженерію, неадекватний контроль доступу та уособлення вузла.

ІоТ, що характеризується інтеграцією кібер- і фізичних систем, які полегшують обмін різними типами даних і конфіденційною інформацією, що дає змогу

інтелектуальним програмам і службам працювати точно в режимі реального часу, особливо вразливий до цих проблем безпеки програмного забезпечення в хмарних системах SCADA. Ці проблеми можуть призвести до помилок конфігурації або програмного забезпечення в операційних системах і програмному забезпеченні сторонніх виробників пристроїв IoT, а також у каналах зв'язку. Вони також сприяють вразливості внутрішніх мережевих пристроїв, зовнішніх окремих постачальників послуг і постачальників хмарних послуг (Sajid, Abbas, & Saleem, 2016).

Атаки, які базуються на вразливостях нульового дня, найнебезпечніші, бо здатні уникати виявлення програмним забезпеченням для захисту від шкідливих програм (Rashid, Gardiner, Green, & Craggs, 2019). Ці атаки становлять значний ризик, оскільки мільйони пристроїв IoT можуть бути миттєво скомпрометовані, якщо в їхніх системах з'явиться невідома помилка програмного забезпечення. Загалом, інтеграція IoT у системи SCADA ускладнює забезпечення безпеки взаємопов'язаних пристроїв і може залучити деяких постачальників, продукти яких порушують протоколи безпеки зв'язку (Nechibvute, & Mafukidze, 2023).

Зручність доступу до хмарних систем з будь-якого місця в усьому світі також робить їх вразливими до атак зловмисників (Nazir, Patel, & Patel, 2020). Типи атак, такі як DoS, DDoS і MITM, стають все більш витонченими, уникаючи традиційних методів виявлення. Ба більше, стратегії захисту традиційних систем SCADA часто не підходять для боротьби з цими атаками.

Комунікаційні протоколи — це набори правил передачі та обміну даними через канали зв'язку. Протоколи зв'язку системи SCADA полегшують взаємодію між MTU і RTU (Yadav, & Paul, 2021). Як правило, протоколи системи SCADA не включають шифрування, що створює проблеми при розробці безпечних з'єднань і систем зв'язку (Nazir, Patel, & Patel, 2020).

Найбільш широко використовувані протоколи в системах SCADA включають Modbus і DNP3. Ці байт-орієнтовані протоколи використовуються в промислових системах для віддаленого виконання команд на керуючих пристроях. Однак при інтеграції в IP-мережі поширюється на всі машини в мережі. В Інтернеті ці протоколи стають сприйнятливими до кібератак і корупції через відсутність захисних заходів (Cai, Wang, & Yu, 2008).

Зловмисники, націлені на протоколи та комунікації системи SCADA, головним чином зосереджені на виявленні та використанні вразливостей у мережевих процесах (Demertzis, & Iliadis, 2018). У літературі ідентифікуються різні типи атак, наприклад атаки MITM через отруєння протоколу вирішення адрес, DNS отруєння, підробка мережевого протоколу часу, модифікація даних протоколу, використання правил протоколу (Rodofile, Radke, & Foo, 2019), а також на непотрібні порти та служби, вразливості каналів зв'язку та недоліки в протоколах зв'язку. Ці недоліки включають відсутність сертифікації, повноважень, шифрування та вразливість до атак DoS (Irmak, & Erkek, 2018).

Нарешті, існують атаки, розроблені спеціально для мережевих протоколів систем SCADA. До них належать атаки на протоколи мережевого рівня, націлені на такі елементи, як брандмауери, модеми, системи польових шин, системи зв'язку, маршрутизатори, віддалені точки доступу, а також протоколи та мережі керування (McLaughlin та ін., 2016). Інші атаки впливають на мережу системи SCADA в

цілому та спричиняють втрату доступності, цілісності та конфіденційності, а також проблеми відмови та відсутності автентифікації в протоколах розподіленої мережі (Ghosh, & Sampalli, 2019).

Атаки процесу керування на системи SCADA як вразливості рівня процесу (McLaughlin та ін., 2016). До них входить введення неправильної інформації для погіршення продуктивності керованого процесу, зміна змінних процесу виконання або логіки керування, а також пошкодження стану процесу. Отже, атаки на процес керування в системах SCADA, зазвичай, передбачають отримання зловмисниками контролю над цими системами (Demertzis, & Piadis, 2018).

Різні приклади атак на процес управління на системи SCADA охоплюють атаки на модифікацію схемної логіки, функціональні атаки на схемну логіку, автоматизацію відтворення, викрадення з'єднання та атаки обману зворотного зв'язку (Rodofile, Radke, & Foo, 2019). Різні атаки, пов'язані з керуванням, на системи SCADA, такі як напади на контури зворотного зв'язку-контролю та фізичну інфраструктуру електромереж (Lin, Slagell, Kalbarczyk, Sauer, & Iyer, 2016).

Як наслідок, операції керування та безпеки в хмарних системах SCADA стикаються з такими проблемами, як затримки, втрата даних і скомпрометована надійність, безпека та конфіденційність (Stojanović, Bošljančić-Rakas, & Marković-Petrović, 2019).

Менеджери системи SCADA часто несуть відповідальність за втрату конфіденційності даних через обмежений контроль безпеки (Bhamare та ін., 2020). Інші користувачі хмари можуть використовувати вразливі місця в цих локальних засобах безпеки, що призведе до витоку даних. Деякі користувачі хмарних систем SCADA не визнають потребу в додаткових процесах і конфігураціях безпеки, демонструють відсутність відповідальності або не довіряють заходам безпеки, які пропонують постачальники хмарних послуг. Це призводить до значних інцидентів із загрозою кібербезпеці (Zhang, Luo, & Litvinov, 2021). Однією з головних загроз в ІоТ є загроза від внутрішньої інформації, яка може бути реалізована співробітниками або постачальниками ІоТ, уповноваженими на доступ або контроль мережевих датчиків (Ulltveit-Moe та ін., 2016). Інсайдери можуть робити навісмі чи ненавісмі помилки, потенційно завдаючи значної шкоди через знання системи. Крім того, працівники постачальника хмарних послуг, маючи повний доступ до даних, можуть зловживати ними для зловмисних цілей, таких як шпигунство або диверсія. Це також може статися через звичайну або ненавісмі помилку, що призводить до втрати доступу до ресурсів SCADA (Nazir, Patel, & Patel, 2020).

Відсутність ефективної автентифікації й авторизації користувачів (Tariq, Asim, & Khan, 2019) разом із підвищенням привілеїв, соціальною інженерією, неадекватним контролем доступу (Rubio, Alcaraz, Roman, & Lopez, 2019) та досвідчених інсайдерів, які можуть контролювати системи без підключених мереж або запроваджувати зловмисне програмне забезпечення (Zeng, & Zhou, 2018), також є основними загрозами безпеці та ризиками для хмарних систем SCADA.

На основі класифікації кібератак, очевидно, що три найпоширеніші та типові тактики, які потенційно можуть поставити під загрозу безпеку хмарної системи SCADA, це атаки DoS, MITM та APT. DoS-атаки спрямовані на те, щоб зробити послугу недоступною для законних користувачів. Це досягається шляхом наповнення цільової системи надмірним трафіком, доки вона не перестане відповідати

або не вийде з ладу, забороняючи таким чином доступ авторизованим користувачам. Ці атаки можна виконувати кількома способами, наприклад DoS або DDoS. Хоча DoS-атаки безпосередньо не завдають шкоди значним активам, вони можуть призвести до фінансових втрат і тимчасових витрат для компанії в періоди, коли її послуги та ресурси недоступні.

Зловмисники здійснюють атаки MITM, позиціонуючи себе в потоці зв'язку між користувачами хмари та хмарними програмами. Вони досягають цього за допомогою спуфінгу або сніфінгу. Під час спуфінгу зловмисник маскується під інших користувачів хмари, отримуючи доступ до хмарних систем SCADA. Це дає змогу їм обходити контроль безпеки або викрадати дані. Сніфінгові атаки передбачають перехоплення зловмисниками та моніторинг пакетів даних у хмарній системі SCADA. Це дає їм змогу отримувати конфіденційну інформацію, таку як паролі та облікові дані (Sajid, Abbas, & Saleem, 2016).

APT виникають, коли зловмисник або група зловмисників отримує несанкціонований доступ до мережі системи з наміром видобутку дуже конфіденційних даних. АPT, зазвичай, використовують вразливості нульового дня, тобто діри в безпеці програмного забезпечення, про які постачальник не знає. Ці вразливості можливі після розробки системи або програмного забезпечення, і їх можна негайно використати без виявлення чи виправлення, що призводить до успішних атак (Bere, & Muyingi, 2015).

Ці три атаки є мережевими та представляють собою несанкціонований доступ до хмарних систем SCADA. Вони можуть призвести до системних збоїв і маніпулювання даними та повідомленнями в системі. Поширеною вразливістю в хмарних системах, яка призводить до вразливості атак DoS і MITM, є спільне використання інфраструктури. Для АPT основною вразливістю є вразливість нульового дня.

У літературі пропонуються різні рішення безпеки, деякі з яких розроблені для хмарних обчислень загалом, а інші спеціально для хмарних систем SCADA. Існують розроблені рішення безпеки, адаптовані до хмарної інфраструктури, яка використовується в системах SCADA, охоплюючи публічні, приватні або гібридні моделі (Stojanović, Boštjančić-Rakas, & Marković-Petrović, 2019). Для публічних хмарних інфраструктур одне рішення передбачає використання технології push замість технології pull для переміщення даних у хмару. Цей підхід зменшує відкриті мережеві порти в мережі контролера, зменшуючи таким чином вплив системи SCADA на Інтернет. Інша стратегія зосереджена на захисті розташування хмарної інфраструктури та послуг, що надаються постачальником хмарних послуг, включаючи безпеку доступу користувачів, конфіденційність інформації, рівні контролю користувачів, керування файлами журналу для виявлення вторгнень і реагування на них, а також шифрування даних. На відміну від цього, основне рішення безпеки для приватної хмарної інфраструктури передбачає використання стратегії поглибленого захисту. Ця багаторівнева архітектура безпеки спрямована на мінімізацію впливу збою будь-якого окремого рівня та включає такі заходи, як розумний контроль доступу, брандмауери, системи виявлення та запобігання вторгненням, антивірусне програмне забезпечення тощо. Крім того, основним рекомендованим рішенням безпеки для гібридної хмарної інфраструктури є використання безпечних віртуальних приватних мереж для керування інфраструктурою.

Існує низка оптимальних методів захисту хмарних систем SCADA (Sajid, Abbas, & Saleem, 2016). До них належать розділення мереж, аналіз журналів, аналіз мережевого трафіку, використання інструментів для регулярного виявлення зловмисних дій, проведення стандартного тестування вразливостей, впровадження постійного моніторингу та аналізу, виконання моніторингу цілісності файлів, ретельний аналіз дамів пам'яті, послідовне оновлення та виправлення, а також використання проксі-сервера.

Також підхід базується на шифруванні на основі атрибутів політики зашифрованого тексту (CP-ABE), щоб забезпечити детальний контроль доступу до даних, що зберігаються в хмарі, враховуючи як статичні, так і динамічні атрибути користувача (Routray, & Vera, 2023). Структура безпеки розроблена для запобігання несанкціонованому доступу до даних, витоку даних і приховуванню політики доступу для забезпечення конфіденційності даних. Цей підхід використовує туманні сервери для перевірки динамічних атрибутів користувачів і звільнення від кінцевих користувачів обчислювальних завдань, що, у свою чергу, зменшує витрати на обчислення, роблячи систему більш масштабованою та ефективною.

Іншою технікою є приманки SCADA, зокрема приманки з низьким рівнем взаємодії під назвою Conpot, для виявлення потенційних зловмисних дій у мережах SCADA (Mesbah, Elsayed, Jurcut, & Azer, 2023). Крім сегментації мережі, контролю доступу та систем виявлення вторгнень, організації можуть використовувати приманки для усунення ризиків атак операційних технологій (OT) (наприклад, PLC, RTU, HMI тощо) у хмарних системах та системах на основі IoT. Використання приманок або систем-приманок, призначених для відволікання зловмисників від реальних активів, дає змогу збирати цінну інформацію про шаблони атак. Аналіз даних honeypot допомагає зрозуміти динаміку атак OT і покращити механізми безпеки. Зокрема, приманки SCADA дають змогу адміністраторам безпеки виявляти вразливі місця системи шляхом імітації цілей зловмисника в контрольованому середовищі та моніторингу поведінки зловмисників. Це може виявити нові техніки та методи атак і покращити безпеку системи SCADA шляхом виправлення вразливостей і впровадження більш сильних заходів безпеки. Однак honeypot (пастки) слід розгортати безпечно, щоб мінімізувати потенційні загрози повернути більше уваги зловмисників.

Основні типи IDS (хмарні системи виявлення вторгнень) та IPS (системи запобігання вторгненням) для хмарних обчислень включають систему виявлення вторгнень на основі хосту (HIDS)/систему запобігання вторгнень на основі хосту (HIPPS) і систему виявлення вторгнень на основі мережі (NIDS)/систему запобігання вторгненням в мережу (NIPS) (Alam, Shuaib, & Samad, 2019). Функція HIDS/HIPPS шляхом моніторингу, аналізу та запобігання аномаліям у даних, зібраних з хост-машин. Ці дані надходять із файлових систем, баз даних і аналізів мережевих обчислювальних систем. При виявленні аномалій для профілактики спрацьовує сигналізація. NIDS/NIPS, навпаки, відстежує та виявляє зловмисний трафік у мережі, перевіряючи всі мережеві пакети на наявність шкідливих шаблонів. У разі атаки NIDS/NIPS сповіщає адміністраторів або блокує джерело IP від доступу до мережі, залежно від серйозності атаки.

Як обговорювалося раніше, атаки DoS, MITM і APT в основному спрямовані на мережеву інфраструктуру хмарних систем SCADA. Таким чином, NIDS/NIPS,

мабуть, є більш ефективним у захисті цих систем від різних кібератак порівняно з методами NIDS/NIPS.

Висновки

У цьому дослідженні розглядалися вразливості та кібератаки, що впливають на безпеку хмарних систем SCADA. Було визначено чотири основні області вразливості: зв'язок між системами SCADA та хмарними службами, спільна інфраструктура, присутність зловмисників інсайдерів і надійність безпеки протоколів SCADA. Крім того, це дослідження класифікувало кібератаки на п'ять груп: апаратне забезпечення, програмне забезпечення, атаки, пов'язані з зв'язком і протоколом, атаки на процес керування та атаки зсередини. Було виявлено, що DoS, MITM і APT становлять найбільшу загрозу для цих систем через їхню залежність від спільних інфраструктур, промислових операцій у реальному часі та високої доступності. Також розглянуто кілька рішень безпеки для пом'якшення цих загроз. Оскільки найпоширеніші атаки є мережевими (такі як DoS, MITM і APT), це дослідження підтверджує, що мережеві IDS/IPS (NIDS/NIPS) є ефективними заходами безпеки для виявлення та запобігання кібератакам, захищаючи таким чином хмару системи SCADA.

У той час, як наше дослідження охоплювало різні вразливості, атаки та механізми безпеки, різноманітні загрози й атаки залишаються непокритими поточними рішеннями, такими як складне шкідливе програмне забезпечення (наприклад, програми-вимагачі та шпигунські програми), які можуть адаптуватися та видозмінюватися, щоб уникнути виявлення, а також недостатній рівень безпеки (наприклад, паролі за замовчуванням або незашифрований зв'язок) у пристроях IoT, що робить їх м'якими мішенями для зловмисників. Крім того, залежність від постачальників хмарних технологій для забезпечення безпеки піддає системи SCADA ризику, якщо постачальники не впроваджують суворих заходів безпеки або якщо вони самі скомпрометовані. Оскільки хмарні системи SCADA часто покладаються на компоненти та послуги від кількох постачальників, вони сприйнятливі до атак на ланцюг поставок (наприклад, скомпрометовані оновлення програмного забезпечення). Складні атаки на ланцюжок поставок, що відбуваються нагорі, можуть вплинути на системи SCADA, і такі ризики не завжди можуть враховуватися в поточних моделях безпеки. Озброєні ПЛК становлять значну загрозу в хмарних системах, де зловмисне програмне забезпечення може бути встановлено в ПЛК, щоб змінити їх функціонування або використовувати їх як точки входу для проникнення в системи SCADA.

Однією з найбільш значних нових загроз для хмарних систем є концепція змагального штучного інтелекту (AI) (Anthi, Williams, Rhode, Burnap, & Wedgbury, 2021), де моделями машинного навчання маніпулюють або для того, щоб ввести в оману системи безпеки, або для здійснення атак на системи SCADA. Наприклад, група APT може використовувати модель машинного навчання для аналізу шаблонів у мережевому трафіку системи SCADA або визначення регулярних періодів обслуговування та інтервалів передачі даних. Цю модель можна навчити імітувати звичайні шаблони мережевого трафіку, генерувати трафік, який поєднується з регулярними даними технічного обслуговування, і уникати виявлення під час відображення мережі. Моделі машинного навчання також можуть вивчати робочі

шаблони системи SCADA, включаючи балансування навантаження, цикли перемикання підстанції та налаштування трансформатора, таким чином отримуючи контроль над декількома ПЛК і непомітно змінюючи навантаження трансформатора для створення дисбалансу. Зловмисники планують, щоб ці зміни відбувалися одночасно в години пікового використання, щоб максимізувати вплив. Раптова несподівана зміна навантаження може спричинити каскадний збій у мережі, що призведе до втрати електроенергії. У таких випадках інженерам може бути важко визначити причину збоїв, що призведе до подовження часу відновлення. Підхід, керований штучним інтелектом, не тільки забезпечує початкове проникнення, але й дає змогу зловмисникам навчитися й адаптуватися до поведінки системи, що робить атаку дуже ефективною та складною для пом'якшення або виявлення заходами безпеки.

Щоб усунути раніше виявлені загрози та атаки, організаціям, які впроваджують інфраструктуру хмарної системи SCADA, слід розглянути різні важливі кроки. Наприклад:

- впровадження систем моніторингу безпеки в реальному часі, які можуть адаптуватися до нових загроз, що розвиваються, що, у свою чергу, може зменшити вікно можливостей для зловмисників;

- наявність надійного плану реагування на інциденти, який можна швидко й ефективно запровадити у разі порушення безпеки;

- виконання регулярних комплексних перевірок безпеки, включаючи сканування вразливостей і тестування на проникнення, щоб виявити потенційні прогалини в безпеці;

- розробка надійних інфраструктур безпеки для пристроїв Інтернету речей, інтегрованих у системи SCADA, щоб гарантувати, що ці пристрої не стануть точками входу для зловмисників.

- підвищення безпеки ланцюга постачання завдяки тісній співпраці з постачальниками та партнерами, щоб переконатися, що вони дотримуються високих стандартів безпеки;

- підвищення обізнаності та навчання серед працівників для запобігання порушенням безпеки через людські помилки або внутрішні загрози, а також

- участь у співпраці для обміну інформацією про загрози, що може допомогти у швидшій ідентифікації та реагуванні на нові загрози.

Крім того, використання штучного інтелекту та алгоритмів машинного навчання може передбачити атаки на системи SCADA та покращити виявлення складних і раніше невідомих шаблонів атак. Ці алгоритми також можуть виявляти аномальну поведінку, яка може вказувати на те, що ПЛК було зламане. Для захисту від атак, керованих штучним інтелектом, і ПЛК із використанням зброї, системні адміністратори та групи безпеки повинні розглянути такі методи, як поєднання перевірок цілісності апаратного та програмного забезпечення, аналіз поведінки, керований штучним інтелектом, і створення безпечного життєвого циклу розробки для програмного забезпечення ПЛК. Адаптація нормативних актів і стандартів для обов'язкових практик безпечного кодування та журналів аудиту ІІІ має вирішальне значення для запобігання зловмисним діям ІІІ. Також важливо регулярно виправляти відомі та потенційні вразливості, особливо в хмарному середовищі, де загрози можуть швидко зростати.

Безпека хмарних систем SCADA є надзвичайно важливим питанням, яке потребує більш ретельного дослідження. Вирішення проблем безпеки цих систем є життєво важливим для запобігання майбутнім інцидентам і катастрофічним подіям. Майбутні дослідження мають вивчити кілька невивчених типів загроз. Це включає квантові атаки, коли традиційні методи шифрування можуть застаріти. Дослідники повинні присвятити зусилля квантово-стійким криптографічним методам, щоб захистити хмарні системи SCADA від майбутніх загроз. Окрім квантових загроз, безпека ланцюга постачання потребує уваги дослідників, включаючи розробку платформ для оцінки стану безпеки сторонніх постачальників і механізмів для виявлення скомпрометованих програмних або апаратних компонентів. Незважаючи на технологічний прогрес, людський фактор і внутрішні загрози залишаються критично вразливими місцями. Дослідження складного контролю доступу, поведінкової аналітики та механізмів виявлення внутрішніх загроз можуть запропонувати значні покращення безпеки. У майбутніх дослідженнях слід також наголошувати на розширеній оцінці ризиків безпеки та важливості проведення відповідних тестових стендів для перевірки рішень безпеки для цих систем. Крім того, впровадження розширених заходів безпеки на основі штучного інтелекту та розгляд безпеки як невід'ємного компонента проектування системи є критично важливими для хмарних систем SCADA. Зосереджуючись на цих областях, майбутні дослідження можуть розглянути мінливий ландшафт загроз, з якими стикаються хмарні системи SCADA, і сприяти розробці більш стійких рішень безпеки.

Література

- Alakbarov, R., & Hashimov, M. (2023). *Development of Security Mechanisms in Cloud Based SCADA Systems*. In Proceedings of the 2023 5th International Conference on Problems of Cybernetics and Informatics. doi:10.1109/pci60110.2023.10325946.
- Alam, S., Shuaib, M., & Samad, A. (2019). *A collaborative study of intrusion detection and prevention techniques in cloud computing*. In Proceedings of the International Conference on Innovative Computing and Communications. doi:10.1007/978-981-13-2324-9_23.
- Anthi, E., Williams, L., Rhode, M., Burnap, P., & Wedgbury, A. (2021). Adversarial attacks on machine learning cybersecurity defences in industrial control systems. *Journal Information Security Application*, 58, 102717.
- Bere, M., & Muyingi, H. (2015). *Initial investigation of industrial control system (ICS) security using artificial immune system (AIS)*. In Proceedings of the 2015 International Conference on Emerging Trends in Networks and Computer Communications (ETNCC). doi:10.1109/etncc.2015.7184812.
- Bhamare, D., Zolanvari, M., Erbad, A., Jain, R., Khan, K., & Meskin, N. (2020). Cybersecurity for industrial control systems: A survey. *Computer Security*, 89, 101677.
- Buyya, R., Yeo, C. S., & Venugopal, S. (2008). *Market-oriented cloud computing: Vision, hype, and reality for delivering it services as computing utilities*. In Proceedings of the 2008 10th IEEE International Conference on High Performance Computing and Communications. Dalian: IEEE.
- Byers, C. (2018). *Fog Computing for Industrial Automation*. Взято з <https://www.controleng.com/articles/fog-computing-for-industrial-automation/>.
- Cai, N., Wang, J., & Yu, X. (2008). *SCADA system security: Complexity, history and new developments*. In Proceedings of the 2008 6th IEEE International Conference on Industrial Informatics. doi:10.1109/indin.2008.4618165.
- Cerullo, G., Mazzeo, G., Papale, G., Sgaglione, L., & Cristaldi, R. (2016). *A Secure Cloud-Based SCADA Application: The Use Case of a Water Supply Network*. In Proceedings of the International Conference on New Trends in Intelligent Software Methodology Tools and Techniques. Larnaca: SoMeT 16.

- Cherdantseva, Y., Burnap, P., Blyth, A., Eden, P., Jones, K., Soulsby, H., & Stoddart, K. (2016). A review of cyber security risk assessment methods for SCADA systems. *Computer security*, 56, 1—27.
- Chromik, J. J., Remke, A., & Haverkort, B. R. (2016). *Improving SCADA security of a local process with a power grid model*. In Proceedings of the 4th International Symposium for ICS & SCADA Cyber Security Research. doi:10.14236/ewic/ics2016.13.
- Church, P., Mueller, H., Ryan, C., Gogouvtis, S. V., Goscinski, A., Haitof, H., & Tari, Z. (2015). *Moving SCADA systems to IaaS clouds*. In Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Smart City/SocialCom/SustainCom (SmartCity). doi:10.1109/smartycity.2015.186.
- Church, P., Mueller, H., Ryan, C., Gogouvtis, S. V., Goscinski, A., Haitof, H., & Tari, Z. (2017). *In Handbook of Big Data Technologies. SCADA systems in the Cloud*. Berlin: Springer.
- Combs, L. (2011). *Cloud computing for SCADA*. *Control Engineering*. Взято з <https://www.controleng.com/articles/cloud-computing-for-scada/>.
- Daneels, A., & Salter, W. (1999). *What is SCADA?*. In Proceedings of the International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems. Trieste: Conf. Proc. C.
- Davis, C., Tate, J., Okhravi, H., Grier, C., Overbye, T., & Nicol, D. (2006). *SCADA cyber security testbed development*. In Proceedings of the 2006 38th North American Power Symposium. doi:10.1109/naps.2006.359615.
- Demertzis, K., & Iliadis, L. (2018). *Modern Discrete Mathematics and Analysis: A computational intelligence system identifying cyber-attacks on smart energy grids* (1st ed). Berlin: Springer.
- El Mrabet, Z., Kaabouch, N., El Ghazi, H., & El Ghazi, H. (2018). Cyber-security in smart grid: Survey and challenges. *Computer and Electrical Engineering*, 67, 469—482.
- Ghosh, S., & Sampalli, S. (2019). A survey of security in SCADA networks: Current issues and future challenges. *IEEE Access*, 7, 135812—135831.
- Green, B., Krotofil, M., & Abbasi, A. (2017). *On the significance of process comprehension for conducting targeted ICS attacks*. In Proceedings of the 2017 Workshop on Cyber-Physical Systems Security and Privacy. doi: 10.1145/3140241.3140254.
- Howard, P. (2015). *Checklist for SCADA Systems in the Cloud*. Взято з <https://www.route-fifty.com/infrastructure/2015/06/a-security-checklist-for-scada-systems-in-the-cloud/287164/>.
- Irmak, E., & Erkek, I. (2018). *An overview of cyber-attack vectors on SCADA systems*, In Proceedings of the 2018 6th International Symposium on Digital Forensic and Security (ISDFS). doi:10.1109/isdfs.2018.8355379.
- Lin, H., Slagell, A., Kalbarczyk, Z. T., Sauer, P. W., & Iyer, R. K. (2016). Runtime semantic security analysis to detect and mitigate control-related attacks in power grids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9, 163—178.
- Maglaras, L., Ferrag, M., Derhab, A., Mukherjee, M., Janicke, H., & Rallis, S. (2018). Threats, countermeasures and attribution of cyber attacks on critical infrastructures. *EAI Endorsed Transactions on Security and Safety*. doi:10.4108/eai.15-10-2018.155856.
- McLaughlin, S., Konstantinou, C., Wang, X., Davi, L., Sadeghi, A. R., Maniatakos, M., & Karri, R. (2016). The cybersecurity landscape in industrial control systems. *Proceedings of the IEEE*, 104, 1039—1057.
- Mesbah, M., Elsayed, M. S., Jurcut, A. D., & Azer, M. (2023). Analysis of ICS and SCADA Systems Attacks Using Honey pots. *Future Internet*, 15, 241. doi:10.3390/fi15070241.
- Molle, M., Raithele, U., Kraemer, D., Graß, N., Söllner, M., & Aßmuth, A. (2019). *Security of cloud services with low-performance devices in critical infrastructures*, In Proceedings of the Cloud Computing 2019, The Tenth International Conference on Cloud Computing, GRIDS, and Virtualization. doi:10.48550/arXiv.2405.11368.
- Morsey, C. (2017). *Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) Systems and Cyber-Security: Best Practices to Secure Critical Infrastructure*. (Dissertation, D. Sc.). Robert Morris University, Pittsburgh.
- Mushtaq, M. F., Akram, U., Khan, I., Khan, S. N., Shahzad, A., & Ullah, A. (2017). Cloud computing environment and security challenges: A review. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 8, 183—195.

- Nazir, S., Patel, S., & Patel, D. (2020). Cloud-based autonomic computing framework for securing SCADA systems. In *Innovations, Algorithms, and Applications in Cognitive Informatics and Natural Intelligence*, 276—297. doi:10.4018/978-1-7998-3038-2.ch013.
- Nechibvute, A., & Mafukidze, H. (2023). Integration of scada and industrial iot: Opportunities and challenges. *IETE Technical Review*, 1—14. doi:10.1080/02564602.2023.2246426.
- Nugent, E. (2017). How Cloud and Fog Computing will Advance SCADA Systems. *Manufacturing Automation*, 32, 22—24.
- Pliatsios, D., Sarigiannidis, P., Lagkas, T., & Sarigiannidis, A. G. (2020). A survey on SCADA systems: Secure protocols, incidents, threats and tactics. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 22, 1942—1976.
- Rakas, S. V. B., Stojanović, M. D., & Marković-Petrović, J. D. (2020). A review of research work on network-based scada intrusion detection systems. *IEEE Access*, 8, 93083—93108.
- Rashid, A., Gardiner, J., Green, B., & Craggs, B. (2019). *Everything is awesome! Or is it? Cyber security risks in critical infrastructure*. In Proceedings of the International Conference on Critical Information Infrastructures Security, 3—17. doi:10.1007/978-3-030-37670-3_1.
- Resul, D., & Gündüz, M. Z. (2020). Analysis of cyber-attacks in IoT-based critical infrastructures. *International Journal of Information Security*, 8, 122—133.
- Rodofile, N. R., Radke, K., & Foo, E. (2019). Extending the cyber-attack landscape for SCADA-based critical infrastructure. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 25, 14—35.
- Routray, K., & Bera, P. (2023). *Context-Aware Attribute Based Access Control for Cloud-based SCADA Systems*. In Proceedings of the 1st Workshop on Enhanced Network Techniques and Technologies for the Industrial IoT to Cloud Continuum, 35—40. doi:10.1145/3609389.3610569.
- Rubio, J. E., Alcaraz, C., Roman, R., & Lopez, J. (2019). Current cyber-defense trends in industrial control systems. *Computer security*, 87, 101561.
- Sajid, A., Abbas, H., & Saleem, K. (2016). Cloud-assisted IoT-based SCADA systems security: A review of the state of the art and future challenges. *IEEE Access*, 4, 1375—1384.
- Saliieva O., & Yaremchuk, Yu. (2020). Cognitive model for studying the level of protection of a critical infrastructure object. *Ukrainian Scientific Journal of Information Security*, 26(2), 64—73.
- Stojanović, M. D., Boštjančić-Rakas, S. V., & Marković-Petrović, J. D. (2019). SCADA systems in the cloud and fog environments: Migration scenarios and security issues. *Facta Universitatis Series Electronics and Energetics*, 32(3), 345—358. doi:10.2298/fuee1903345s.
- Tariq, N., Asim, M., & Khan, F. A. (2019). Securing SCADA-based critical infrastructures: Challenges and open issues. *Procedia Computer Science*, 155, 612—617.
- Ulltveit-Moe, N., Nergaard, H., Erdödi, L., Gjørseter, T., Kolstad, E., & Berg, P. (2016). *Secure information sharing in an industrial Internet of Things*. doi:10.48550/arXiv.1601.04301.
- Wilhoit, K. (2013). *SCADA in the Cloud*. Trend Micro: Cupertino. 5 c.
- Yadav, G., & Paul, K. (2021). Architecture and security of SCADA systems: A review. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 34, 100433.
- Yi, M., Mueller, H., Yu, L., & Chuan, J. (2017). *Benchmarking cloud-based SCADA system*. In Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Cloud Computing Technology and Science (Cloud Com), 122—129. doi:10.1109/cloudcom.2017.25.
- Zeng, P., & Zhou, P. (2018). Intrusion detection in scada system: A survey. In *Intelligent Computing and Internet of Things*, 342—351. doi:10.1007/978-981-13-2384-3_32.
- Zhang, S., Luo, X., & Litvinov, E. (2021). Serverless computing for cloud-based power grid emergency generation dispatch. *International Journal Electrical Power Energy Systems*, 124, 106366.

INFORMATION TECHNOLOGY FOR MODELING AND MANAGING THE IT-PROJECT ECOSYSTEM

V. Skryhun, O. Sedykh, S. Hrybkov

National University of Food Technologies

Key words:

*Information technology
IT-project
IT-project ecosystem*

Article history:

Received 03.07.2024
Received in revised form
19.07.2024
Accepted 13.08.2024

Corresponding author:

S. Hrybkov

E-mail:

sergio_nuft@i.ua

Citation: Скригун В. О., Седих О. Л., Грыбков С. В. (2024). Інформаційна технологія для моделювання та управління екосистемою ІТ проєкта. *Наукові праці НУХТ*, 30(4), 31—39. DOI: 10.24263/2225-2924-2024-30-4-4

ABSTRACT

The aim of the research was to create a new information technology for modeling and managing an IT project ecosystem for food industry enterprises, which will ensure the speed and flexibility of the information system development, its easy integration, and maintenance. Such technology will unite developers and customers into a single symbiosis through metadata that will describe not only the essence and functions of the system but also its final users. The proposed information technology combines elements of modeling, management development control, and maintenance of information systems for the food industry. The modeling of system elements was aimed not only at creating the information system itself but also at modeling the relationships between customers and performers, allowing for planning the execution process, controlling the development process, adhering to deadlines, identifying and documenting the detected drawbacks, and their subsequent elimination. This approach is especially useful for project managers, as it allows to get comprehensive information about each development stage and make more reasonable decisions. In addition, the involvement of customers at the early stages of the modeling process enables documenting all their requirements, which allows creating a more accurate and appropriate final product, while the involvement of final users at the stages of development and testing makes it possible to obtain valuable feedback and adjust the project according to the real needs and expectations of users. This modeling approach ensures a higher level of compliance of the final product with the needs of customers and users, as well as increases the project management efficiency due to the detailed processing of each stage of development. The development and use of such technology will reduce the time needed for creating an IT-product and take into account the peculiarities of the implementation and integration of the project as a whole. The implementation of the proposed technology guarantees an improvement in the quality of the creation and implementation of systems for food industry enterprises since it will take into account the specifics and integration of information systems with automated systems for managing food production technological processes.

DOI: 10.24263/2225-2924-2024-30-4-4

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ТА УПРАВЛІННЯ ЕКОСИСТЕМОЮ ІТ-ПРОЄКТА

В. О. Скригун, О. Л. Сєдих, С. В. Грибков

Національний університет харчових технологій

Метою дослідження є створення нової інформаційної технології для моделювання та управління екосистемою ІТ-проєкта для підприємств харчової галузі, що забезпечить швидкість і гнучкість розробки інформаційної системи, легку інтеграцію та супровід. Така технологія поєднає розробників і замовників у єдиний симбіоз за рахунок метаданих, що опишуть не тільки сутності та функції системи, а також кінцевих користувачів. Запропонована інформаційна технологія поєднує елементи моделювання, контроль розвитку управління та супровід інформаційних систем для харчової галузі. Моделювання елементів системи направлено не тільки на створення самої інформаційної системи, а також на моделювання взаємозв'язків між замовниками та виконавцями, що дасть змогу планувати процес виконання, контролювати процес розробки, дотримуватися термінів виконання, виявляти та документувати виявлені недоліки, а в подальшому їх усувати. Такий підхід особливо корисний для менеджерів проєктів, оскільки дає змогу отримувати вичерпну інформацію про кожен етап розробки і приймати більш обґрунтовані рішення. Крім того, залучення замовників на ранніх етапах процесу моделювання надає можливість документувати всі їхні вимоги, що забезпечує створення більш точного та відповідного кінцевого продукту, а залучення кінцевих користувачів на етапах розробки і тестування дає змогу отримувати цінні відгуки та коригувати проєкт відповідно до реальних потреб і очікувань користувачів. Такий підхід до моделювання забезпечує більш високий рівень відповідності кінцевого продукту потребам замовників і користувачів, а також підвищує ефективність управління проєктами за рахунок детального опрацювання кожного етапу розробки. Розвиток та використання такої технології забезпечить скорочення часу на створення ІТ-продукту та врахує особливості впровадження та інтеграції проєкту в цілому. Впровадження запропонованої технології гарантує підвищення якості створення та впровадження систем для підприємств харчової галузі, адже буде враховувати специфіку та інтеграцію інформаційних систем з автоматизованими системами управління технологічними процесами харчових виробництв.

Ключові слова: інформаційна технологія, ІТ-проєкт, екосистема ІТ-проєкта.

Постановка проблеми. Інформаційні системи відіграють ключову роль у функціонуванні підприємств харчової галузі, забезпечуючи інтегроване управління виробничими процесами, контролем якості продукції, логістичними операціями та ефективним використанням ресурсів. Їхнє впровадження сприяє автоматизації виробництва, що підвищує точність виконання операцій і знижує ризик помилок, пов'язаних із людським фактором.

Створення та супроводження інформаційних систем для підприємств харчової галузі вимагає не лише значних технічних ресурсів, але й ефективного управління

проектами, глибокого розуміння галузевих специфік і постійного вдосконалення систем відповідно до нових викликів і можливостей.

З розвитком інформаційних технологій стає все важче поєднувати різні інформаційні системи на різних рівнях управління, в тому числі із системами управління технологічними процесами харчових виробництв, адже їх створення відбувається з використанням різних технологій, які принципово відрізняються (Hrybkov, Litvinov, & Oliinyk, 2018; Hrybkov, Kharkianen, Ovcharuk, & Ovcharuk 2020). Процес розробки інформаційних систем для підприємств харчової галузі може тривати довго, адже потребує врахування існуючих програмно-технічних комплексів управління як усього підприємства, а також автоматизованих комплексів управління технологічними вузлами. Враховуючи особливості створення інформаційних систем для харчової галузі, виникає потреба у створенні інформаційної технології для моделювання й управління екосистемою ІТ-проектів, що забезпечить підвищення якості моделювання, створення та впровадження інформаційних систем на підприємствах харчової галузі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розвиток інформаційних технологій переживає бурхливий період, що стало збудником появи екосистем інженерії програмного забезпечення, яке поєднує програмні продукти, платформи, розробників, користувачів і бізнес-організації (Dittrich, 2014).

У (Tetlow, Fishman, Homan, & Rahul, 2023) пропонується використання екологічного підходу до дослідження процесу розробки програмного забезпечення. Основні положення екології програмного забезпечення вчений розглядає як частини інженерії програмного забезпечення і наводить такі напрямки досліджень програмного забезпечення: «зелене» програмне забезпечення, сталий розвиток, цифрові екосистеми.

У праці (Сидоров, Сидоров, & Сидоров, 2020) проаналізовано принципи функціонування програмного забезпечення як екосистеми та вперше пропонується концепція екосистеми артефакту програмного забезпечення. В рамках концепції описана узагальнена модель екосистеми артефакту програмного забезпечення, яка відноситься до типу Cornerstone і складається з трьох складових: платформа, програмне забезпечення та артефакт. Вказані ролі складових в екосистемі, описані зв'язки між ними. Застосування концепції представлено на прикладі екосистеми стилю програмування.

У (Seichter, Dhungana, Pleuss, & Hauptmann, 2010) зазначено, що в сучасних екосистемах програмного забезпечення основна увага приділяється учасникам верхнього рівня, тобто організаціям і командам, які займаються створенням, впровадженням і підтримкою програмних продуктів. Однак існує і нижній рівень — артефакти, роль яких у процесах життєвого циклу програмного забезпечення є надзвичайно важливою.

У праці (Sadi, & Yu, 2015) наводиться низка вимог для опису й аналізу екосистем програмного забезпечення, які використовуються для моделювання екосистем артефактів програмного забезпечення. У (Zhifang, Xiaofei, Zhang, & Xiaoping, 2020; Alencar, Coutinho, Moreira, & Bezerra, 2020; Pinheiro, Coutinho, Santos, & Bezerra, 2022) розглядаються аспекти побудови екосистем програмного забезпечення та їх можливі адаптації, але не розглядається можливості управління ІТ-проектами в цілому.

У (Coutinho, Viana & Santos 2017) запропоновано спосіб стандартизації моделювання екосистеми програмного забезпечення за допомогою стратегії мережі постачання програмного забезпечення (SSN). SSN являє собою серію пов'язаних організацій програмного забезпечення, обладнання та послуг, які співпрацюють, щоб задовольнити потреби ринку. Також у цих працях розглянуто взаємодію між різними екосистемами зі створення програмного забезпечення, запропоновано підходи опису взаємозв'язків між існуючими екосистемами, що важливо для того, щоб успішно інтегрувати нову екосистему, чітко бачити її зв'язки з уже наявними екосистемами.

Але у названих вище працях проводиться аналіз опису процесу моделювання та створення програмного забезпечення як частини ІТ-проекта. Необхідно відзначити, що в жодній праці не розглядаються аспекти складності інтегрування створюваного програмного забезпечення в існуючі автоматизовані системи управління технологічними процесами, а також не відображено складність взаємодії команди розробників із замовниками та користувачами.

Мета дослідження: провести аналіз існуючих підходів до створення ІТ-проектів, а також запропонувати інформаційну технологію для моделювання та управління екосистемою ІТ-проекта для підприємств харчової галузі, що забезпечить швидкість і гнучкість розробки інформаційної системи, легку інтеграцію та супровід.

Матеріали і методи. На основі проведеного аналізу літератури було виділено доцільність розробки технології зі створення та проектування екосистем програмного забезпечення, що дають змогу використати підходи, описані в цих працях, взяти їх за основу при створенні інформаційної технології для моделювання й управління екосистем ІТ-проектів для підприємств харчової галузі. В основі запропонованої технології пропонується поєднання об'єктно-орієнтованого підходу з функціональним моделюванням, що надасть можливість створювати гнучкі та масштабовані системи. Об'єктно-орієнтоване моделювання забезпечить структурування програмного забезпечення у вигляді об'єктів, які інкапсують дані та поведінку, що сприятиме реалістичному відображенню предметної області та буде полегшувати повторне використання коду. Об'єктно-орієнтоване моделювання відображає предметну область через об'єкти, які є абстракцією реальних або концептуальних сутностей. Кожен об'єкт містить дані (атрибути) і методи (функції), що визначають його поведінку. Моделі, побудовані на об'єктах, легко представляються у вигляді діаграм класів, де показані зв'язки між об'єктами, їхні властивості та поведінка. До того ж діаграми послідовності і діаграми станів дають змогу візуалізувати динамічні аспекти системи, такі як взаємодія між об'єктами або зміна їх станів у відповідь на події. Необхідно відмітити, що це забезпечить детальний опис і вивчення існуючих на підприємстві структур апаратно-програмних комплексів, що надасть можливість легко інтегрувати створювану систему. За рахунок того, що функціональне моделювання зосереджується на чистих функціях, які приймають вхідні дані і повертають результати без зміни глобального стану системи або створення побічних ефектів, забезпечується створення систем, що є передбачувані та надійні, в яких поведінка функцій залишається стабільною незалежно від зовнішнього контексту. Опис і візуалізація відбувається через потоки даних і функціональні діаграми, які показують, як дані

перетікають через систему, обробляючись різними функціями. Це особливо корисно для складних обчислювальних процесів або систем, де важливо розуміти трансформацію даних на різних етапах їх обробки. Такі візуалізації полегшують виявлення потенційних точок оптимізації або місць, де можуть виникати помилки, що робить систему більш надійною і простішою для підтримки. Функціональний підхід підкреслює важливість чистих функцій й уникнення побічних ефектів, що сприяє підвищенню передбачуваності та надійності системи, а також забезпечує визначення всіх бізнес-процесів та їх виконавців на рівні проектування.

Завдяки інтеграції цих підходів, моделі можуть, з одного боку, відображати реальні об'єкти та їхні взаємодії, а з іншого — зберігати функціональну чистоту та забезпечувати модульність і легкість тестування. Така комбінація дає змогу розробникам скористатися перевагами обох методологій, досягаючи більшої ефективності у вирішенні складних завдань і покращуючи адаптивність системи до змін.

Крім поєднання цих підходів моделювання в технологію також поєднують підходи управління IT-проектами, зокрема підхід гнучкої розробки Agile. Такий підхід забезпечує швидке та ефективне реагування на зміни, максимізацію цінності для клієнта та забезпечення високої якості продукту шляхом ітеративної розробки. Agile поєднує методології, які поділяють спільні принципи і цінності (Hall, 2017; Ambler, 2003).

Таке поєднання забезпечить прозорість і гнучкість створення проекту та його подальшу інтеграцію, обговорення в процесі створення та документування, забезпечить взаємодію розробників і замовників.

Для реалізації запропонованої технології пропонується створення веб-орієнтованого додатку на основі клієнт-серверної архітектури з можливістю моделювання та візуалізації моделей, документування та ведення повного контролю розвитку IT-проекту з відслідковуванням впровадження та інтеграції кінцевої системи.

Викладення основних результатів дослідження. Запропонована інформаційна технологія поєднує всі складові реального світу, що охоплює всі етапи IT-проекту, адже вона відразу включає в роботу замовників і виконавців, а також продовжує його супровід після повної передачі на експлуатацію. Така технологія пропонується для використання в продуктових IT-компаніях або великих компаніях з цілими відділами IT-сектору, що, у свою чергу, стає цікавим для підприємств харчової галузі. Використання для підприємств харчової галузі обумовлено тим, що під одним брендом можуть поєднуватися різні підприємства харчової галузі з різними видами продукції. Суттєва відмінність від існуючих підходів — це поєднання в єдине ціле не тільки етапів створення й управління IT-проектом, а створення на єдиній платформі можливості довготривалої підтримки проекту, адже більшість сучасних програмних засобів, що використовуються для управління IT-проекта, як правило, життєздатні під час роботи над проектом, а потім задачі архівуються. Веб-орієнтована платформа для моделювання та управління екосистемою IT-проекта для підприємств харчової галузі забезпечить доступ 24/7 не тільки для усієї команди розробників, а також усім користувачам і замовникам.

Загальна логічно-функціональна структура інформаційної технології представлена на рис. 1.



Рис. 1. Логічно-функціональна структура інформаційної технології

В основі запропонованої інформаційної технології для створення та проєктування інформаційної технології для моделювання й управління екосистем ІТ-проектів для підприємств харчової галузі пропонується спочатку змодельовати структуру ІТ-проекта, призначити відповідальних осіб та описати в загальних рисах сам проєкт. На цьому етапі обов'язковим є опис усіх інформаційних систем на підприємстві, концепцій їх структур, перелік їх функцій, а також опис структур баз і сховищ даних. Для моделювання процесів і структур пропонується використання об'єктно-орієнтованого та функціонального моделювання. В технології пропонується поєднати підходи моделювання, що дасть розробникам можливість використовувати переваги обох методологій, підвищуючи ефективність у вирішенні складних завдань і покращуючи здатність системи адаптуватися до змін. Завдяки тому, що функціональне моделювання зосереджується на чистих функціях, які приймають вхідні дані та повертають результати, створюються системи, що є передбачуваними та надійними. Поведінка функцій залишається стабільною незалежно від зовнішніх факторів. Опис і візуалізація систем здійснюються через потоки даних і функціональні діаграми, які демонструють перетворення даних через систему за рахунок обробки їх різними функціями.

Об'єктно-орієнтоване моделювання сприяє ефективній організації програмного забезпечення, структуруючи його у вигляді об'єктів, які інкапсулюють як дані, так і поведінкові аспекти системи. Це дає змогу досягти більш реалістичного відображення предметної області, оскільки об'єкти відображають сутності реального

світу або концептуальні елементи, які взаємодіють між собою. Кожен об'єкт у такій моделі включає атрибути, що зберігають стан даних, та методи, які визначають його поведінку і можливі дії. Завдяки такій структурі об'єктно-орієнтоване моделювання забезпечує не лише більш точне відображення реальних процесів, але й значно полегшує повторне використання коду. Оскільки об'єкти є незалежними і модульними, їх можна використовувати в різних частинах системи або навіть в інших проєктах без необхідності значних змін. Це підвищує ефективність розробки, дозволяючи скоротити час і витрати на створення нового функціоналу. Крім того, моделі, побудовані на основі об'єктів, легко візуалізуються у вигляді діаграм класів. Діаграми класів є наочним інструментом для представлення зв'язків між об'єктами, їх властивостей і поведінки, що сприяє кращому розумінню структури і динаміки системи. Це також полегшує спілкування між членами команди розробників і замовниками, дозволяючи ефективніше документувати і пояснювати рішення, прийняті в процесі розробки. Таким чином, об'єктно-орієнтоване моделювання не лише забезпечує високий рівень організації і реалістичності програмного забезпечення, але й сприяє підвищенню гнучкості та ефективності розробки завдяки модульності, повторному використанню коду і наочній візуалізації структури системи.

Моделі в процесі моделювання не тільки дадуть змогу вивчити предметну область, а також здійснити подальший реінжиніринг і швидке проєктування нових ІТ-проєктів. Враховуючи складність автоматизованих систем управління технологічними процесами, які у своїх програмно-апаратних частинах використовують бази та сховища даних, банк моделей дасть змогу з легкістю створювати засоби інтеграції створюваних ІТ-проєктів з існуючими комплексами. Усі створені моделі зберігаються в банку моделей, що надає можливість їх використовувати в рамках певної екосистеми для розробки та удосконалення елементів системи.

Загалом усі метадані та документи зберігають в одному місці, що дає змогу скоротити час на пошук та аналіз інформації. Необхідно відмітити, що метадані, банк моделей і документація оновлюються з кожним етапом з повною фіксацією даних розвитку, що надає можливість оцінити розвиток проєкта від самого початку роботи над проєктом до поточної дати. Крім елементів самого ІТ-проєкта, також фіксується інформація про всіх, хто брав участь у розробці кожного етапу проєкту та здійснював експлуатацію відповідного модуля.

Для реалізації кожного етапу пропонується використання підходів гнучкої розробки Agile для забезпечення швидкого й ефективного реагування на зміни, підвищення цінності для клієнта та забезпечення високої якості продукту шляхом ітеративної розробки.

Висновки

У статті запропоновано створення нової інформаційної технології для моделювання та управління екосистемою ІТ-проєкта для підприємств харчової галузі, що забезпечить швидкість і гнучкість розробки інформаційної системи, легку інтеграцію та супровід. Така технологія поєднає розробників і замовників в єдиний симбіоз за рахунок метаданих, що опишуть не тільки сутності та функції системи, а також кінцевих користувачів і замовників. Запропонована інформаційна технологія поєднає елементи моделювання, контроль розвитку управління та супровід

інформаційних систем для харчової галузі. Моделювання елементів системи направлено не тільки на створення самої інформаційної системи, а також на моделювання взаємозв'язків між замовниками та виконавцями, що дає змогу планувати процес виконання, контролювати процес розробки, дотримуватися термінів виконання, виявляти та документувати виявленні недоліки, а в подальшому їх усувати. На відміну від існуючих технологій моделювання, вона поєднує в собі елементи функціонального та об'єктно-орієнтованого моделювань, але представляє собою не окремі діаграми чи опис предметної області, а використовує концепцію декомпозиції складових з детальною проробкою для менеджерів проекту, із залученням замовників для документування всіх їх потреб, а також відгуків кінцевих користувачів. На відміну від традиційних технологій моделювання, нова методологія об'єднує в собі елементи функціонального та об'єктно-орієнтованого підходів, пропонуючи більш інтегрований і гнучкий підхід до розробки систем. Замість створення окремих діаграм або описів предметної області ця методологія використовує концепцію декомпозиції складових системи, що дає змогу більш детально опрацьовувати кожен компонент з урахуванням всіх аспектів проекту. Замість того, щоб обмежуватися загальним описом системи або її окремими частинами, розробники мають можливість вивчати й опрацьовувати всі аспекти проекту на глибшому рівні, забезпечуючи точність і відповідність кожного етапу вимогам проекту. Такий підхід особливо корисний для менеджерів проектів, оскільки він дає змогу їм отримувати вичерпну інформацію про кожен етап розробки і приймати більш обґрунтовані рішення. Крім того, залучення замовників на ранніх етапах процесу моделювання надає можливість документувати всі їхні вимоги та очікування, що забезпечує створення більш точного і відповідного кінцевого продукту. Важливим аспектом цієї методології є також активне залучення кінцевих користувачів на етапах розробки і тестування, що дає змогу отримувати цінні відгуки та коригувати проект відповідно до реальних потреб і очікувань користувачів. Такий підхід до моделювання забезпечує більш високий рівень відповідності кінцевого продукту потребам замовників і користувачів, а також підвищує ефективність управління проектами за рахунок детального опрацювання кожного етапу розробки. Розвиток і використання такої технології дасть змогу скоротити час на створення ІТ продукту та врахувати особливості впровадження та інтеграції проекту в цілому. Впровадження запропонованої технології забезпечить підвищення якості створення та впровадження систем для підприємств харчової галузі, адже буде враховувати специфіку та інтеграцію інформаційних систем з автоматизованими системами управління технологічними процесами харчових виробництв.

Література

Agile-маніфест розробки програмного забезпечення. Взято з: <http://agilemanifesto.org/iso/uk/manifesto.html>.

Сидоров, Н. А., Сидоров, Н. Н., Сидоров, Е. Н. (2020). Дескриптивна модель екосистеми стилю програмування. *Проблеми програмування*, 2—3, 74—81.

Ambler, S. (2003). *Agile Database Techniques: Effective Strategies for the Agile Software Developer*, Wiley.

Coutinho, E., Viana, D. and Pereira Dos Santos, R. (2017). *An Exploratory Study on the Need for Modeling Software Ecosystems: The Case of SOLAR SECO*. 2017 IEEE/ACM 9th International

Workshop on Modelling in Software Engineering (MiSE), Buenos Aires, 2017, 47—53. doi: 10.1109/MiSE.2017.3.

Dittrich, Y. (2014). Software engineering beyond the project — Sustaining software ecosystems. *Information and Software Technology*, 56(11), 1436—1456.

Francisco Victor da S. Pinheiro, Emanuel Ferreira Coutinho, Italo Santos, Carla, I. M. Bezerra (2022). A Tool for Supporting the Teaching and Modeling of Software Ecosystems Using SSN Notation. *Journal on Interactive Systems*, 2022, 13:1, doi: 10.5753/jis.2022.2602.

Hall, M. G. (2017). Adaptive Code: Agile coding with design patterns and SOLID principles (Developer Best Practices), McLean Gary Hall.

Hrybkov, S. V., Kharkianen, O. V., Ovcharuk, V. O., & Ovcharuk, I. (2020). Development of information technology for planning order fulfillment at a food enterprise. *Eastern-european journal of enterprise technologies*, 3(103), 62—73. doi: 10.15587/1729-4061.2020.195455.

Hrybkov, S. V., Litvinov, V. V., & Oliinyk, H. V. (2018). Web-oriented decision support system for planning agreements execution. *Eastern-european journal of enterprise technologies*, 2(93), 13—24. doi: 10.15587/1729-4061.2018.132604.

Igor R., Alencar, Emanuel F., Coutinho, Leonardo O., Moreira, and Carla I. M., Bezerra. (2020). *A Tool for Software Ecosystem Models: An Analysis on their Implications in Education*. In Proceedings of the XXXIV Brazilian Symposium on 83 Software Engineering (Natal, Brazil) (SBES 2020). ACM, New York, USA, 10.

Kleppmann, M. (2017). Designing Data-Intensive Applications, O'Reilly Media, Inc.

Sadi, M., Yu, E. (2015). Designing Software Ecosystems: How Can Modeling Techniques Help, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

Seichter, D., Dhungana, D., Pleuss, A., Hauptmann, B. (2010). Knowledge Management in Software Ecosystems: Software Artefacts as First-class Citizens, *ECSCA, Copenhagen, Denmark*, 119—126.

Tetlow, P., Fishman, N., Homan, P., Rahul. (2023). *Ecosystems Architecture*. Взято з https://pubs.opengroup.org/opengrouppress/ecosystems-architecture/multipage/_book-html.html.

Zhifang, Liao, Xiaofei, Qi, Yan, Zhang, Xiaoping, Fan, (2020). *How to Evaluate the Productivity of Software Ecosystem: A Case Study in GitHub*. Scientific Programming, Hindawi. August 12, 1—13.

RESEARCH OF INJURIES IN THE EDUCATION SECTOR

O. Yevtushenko, A. Siryk

National University of Food Technologies

Key words:

Labor protection
Safety
Worker
Student
Injury
Education

Article history:

Received 11.07.2024
Received in revised form
29.07.2024
Accepted 09.08.2024

Corresponding author:

O. Yevtushenko

E-mail:

01033sao@gmail.com

Citation: Євтушенко О. В.,
Сірик А. О. (2024). Дослідження
травматизму в галузі освіти. *Наукові праці
НУХТ*, 30(4), 31—42.

DOI: 10.24263/2225-2924-
2024-30-4-5

ABSTRACT

The results of a statistical analysis of injuries in the education sector of Ukraine from 2019 to 2023 is presented in the article. The statistical analysis was carried out on the basis of statistical information from reports of the State Statistics Service of Ukraine and annual reports on injuries of enterprises, institutions and organizations belonging to the sphere of management of the MES of Ukraine.

The distribution of accidents by main causes, types of activities and groups of professions was carried out. It was established that organizational reasons led to 60% of injuries of participants in the educational process. The main reason of injuries among employees was deficiencies and omissions in the organization of occupational health and safety, as well as neglect of personal safety. It was proven that in 82.5% of cases the reason of the injury was the behavior of the acquirer and only in 17.5% – the presence of a traumatic situation.

The reasons of non-industrial injuries of the participants of the educational process that occurred in everyday life were analyzed. It was noted that due to the scale, damage and complexity of solving the problems of cases of non-industrial injuries with fatal consequences, it was a socially dangerous phenomenon and requires a systematic approach to the prevention of injuries in everyday life at all levels, awareness of the priority of the requirements of protecting the life and health of the population over other interests, strengthening monitoring the implementation of injury prevention measures, planning fire safety measures, etc.

In order to prevent injuries, a comprehensive approach to the prevention of injuries in educational institutions among employees and students depending on age was proposed. The obtained results made it possible to predict, timely determine the necessary measures for the prevention of injuries in the education sector and can become the basis for the creation of an information system for planning a complex of technical, educational and organizational measures during the educational process.

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАВМАТИЗМУ В ГАЛУЗІ ОСВІТИ

О. В. Євтушенко, А. О. Сірик

Національний університет харчових технологій

У статті представлено результати статистичного аналізу травматизму в галузі освіти України з 2019 по 2023 роки. Статистичний аналіз проведено на підставі статистичних відомостей звітів Державної служби статистики України і річних звітів з травматизму підприємств, установ та організацій, що належать до сфери управління МОН України.

Проведено розподіл нещасних випадків за основними причинами, видами діяльності та групами професій. Встановлено, що організаційні причини призводять до 60% травм учасників освітнього процесу. Основною причиною травматизму серед працівників є недоліки та упущення в організації охорони праці, а також нехтування особистою безпекою. Доведено, що у 82,5% випадків причиною травми є поведінка самого здобувача і тільки у 17,5% — наявність травмонезбезпечної ситуації.

Проаналізовано випадки невиробничого травматизму учасників освітнього процесу, що сталися в побуті. Відзначено, що за масштабами, збитками та складністю вирішення проблем випадків невиробничого травматизму зі смертельними наслідками є соціально небезпечним явищем і потребує: системного підходу щодо профілактики травматизму в побуті на всіх рівнях, усвідомлення пріоритетності вимог охорони життя та здоров'я населення над іншими інтересами, посилення контролю за виконанням заходів з профілактики травматизму, планування заходів з пожежної безпеки тощо.

Для запобігання випадкам травматизму запропоновано комплексний підхід щодо профілактики травматизму в закладах освіти серед працівників і здобувачів освіти залежно від віку. Отримані результати дають змогу спрогнозувати, своєчасно визначити необхідні заходи щодо запобігання випадкам травматизму в галузі освіти та можуть стати основою для створення інформаційної системи планування комплексу технічних, навчальних та організаційних заходів під час навчального процесу.

Ключові слова: охорона праці, безпека, працівник, здобувач освіти, травматизм, освіта.

Постановка проблеми. На сьогодні галузь освіти серед решти галузей національної економіки має найбільш розширену мережу закладів та установ, що охоплює всю територію України. До сфери управління Міністерства освіти і науки належить майже 27 тисяч закладів освіти державної та комунальної форм власності, в яких навчається більше 6 млн здобувачів та працює майже 1,2 млн працівників (Лист МОН «Про стан травматизму серед здобувачів освіти та працівників закладів освіти за 2023 рік»). Питання забезпечення безпеки закладів освіти є невід'ємною складовою процесу створення безпечного освітнього середовища.

Для розробки заходів щодо запобігання випадкам травматизму серед здобувачів освіти та працівників і профілактики травматизму необхідно провести аналіз травматизму та визначити закономірності виникнення нещасних випадків, тому постає необхідність проведення статистичного аналізу (Zulfıqar, & Bhaskar, 2016; Лук'янихіна, & Виганяйло, 2023) випадків травматизму серед здобувачів освіти та працівників закладів освіти. Статистичні дослідження причин, наслідків та обставин травматизму (насамперед тих, що призвели до загибелі учасників освітнього процесу) в галузі освіти України дадуть змогу визначити пріоритетні напрямки планування та впровадження заходів запобігання травматизму, та можуть стати основою для створення автоматизованої системи планування комплексу технічних, навчальних та організаційних заходів щодо об'єктивного зменшення рівня травматизму. На основі аналізу статистичних даних необхідно дослідити основні причини травматизму, виявити травмонезбезпечні фактори з акцентуванням уваги розробки заходів щодо покращення стану охорони праці в галузі освіти.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Безпека людини як на роботі, так і повсякденному житті є головною метою охорони праці та безпеки життєдіяльності. Наслідки від нещасних випадків у десятки разів дорожчі, ніж вартість заходів щодо їх запобігання, тому важливо виявити шкідливі і небезпечні фактори, що є причиною травматизму та розробити основні шляхи запобігання виробничого травматизму та професійних захворювань серед працівників (Дідур, & Дмитрук, 2023).

Навчальні заклади можна порівняти з невеличким містом, де населення живе і працює. Природно, що в них так само переплітаються проблеми персоналу і громадської безпеки, з одного боку, і питання професійного здоров'я і заходів безпеки — з іншого (Євтушенко, & Сірик, 2018).

На виконання законів України «Про охорону праці», «Про дорожній рух», «Про забезпечення санітарного та епідеміологічного благополуччя населення», Кодексу цивільного захисту України, Положення про організацію роботи з охорони праці та безпеки життєдіяльності учасників освітнього процесу в установах і закладах освіти, затвердженого наказом МОН від 26.12.2017 №1669, органами управління освітою місцевих органів виконавчої влади, закладами освіти, підприємствами, установами та організаціями, що належать до сфери управління МОН, організовується та планується до виконання заходи щодо запобігання та зниження рівня травматизму серед здобувачів освіти та працівників закладів освіти під час освітнього процесу та в побуті.

Проблеми охорони праці є актуальними як в Україні, так і у світі (Hatiar, Beno, & Sablik, 2015; Markova, Homokyova, & Cambal, 2022; Takala, Hämäläinen, & Neupane, 2022; Hollá, Ďad'ová, & Osvaldová, 2023). Щорічно близько 2,3 млн осіб у світі гинуть внаслідок нещасних випадків на виробництві або в результаті професійної хвороби, в середньому ця цифра складає 6000 осіб щодня. В Україні, на жаль, у середньому на 100000 працівників щороку припадає 11 загиблих. Показники рівня смертності в Україні вищі, ніж в Естонії у 4,5 раза, у 5 разів, ніж у Франції, у 12 разів, ніж у Швеції, у 22 рази, ніж у Великій Британії (Профспілка працівників освіти і науки України «Стан охорони праці в Україні: економія на охороні праці та зростання професійної захворюваності», 2022).

Негативна тенденція з виробничого травматизму є наслідком недосконалої системи управління охороною праці, а також недостатньою наглядовою діяльністю з питань охорони праці за суб'єктами господарювання. З огляду на останні зміни в економіці ці питання стають дуже актуальними і потребують невідкладних рішень (Дідур, & Дмитрук, 2023).

В останні роки опубліковано ряд досліджень із загальних проблем охорони праці, уточнення методів обліку й аналізу травматизму, вивчення і систематизації факторів умов праці, що впливають на рівень небезпеки, зокрема ергономічних факторів, а також з вивчення економічних наслідків виробничого травматизму (Богданова, 2016; Таїрова, 2017; Суюсанов, 2018; Березовський, Трус, & Прокопенко, 2019; Бондаренко, Вишневський, & Бондаренко, 2021).

Питання розроблення різних методів аналізу нещасних випадків та обробки даних, безпеки виробничих процесів, комплексної оцінки і методики формування плану заходів щодо запобігання виробничому травматизму, впровадження інформаційних технологій розглянуті в працях (Ткачук, 2005; Водяник, 2008; Запорожець, & Гогунський, 2013; Кружилко, Майстренко, & Полукаров, 2013; Здановський, Гогіташвілі, & Степанишин, 2016; Глива, Березуцький, & Халіль, 2016; Здановський, Євтушенко, & Сірик, 2017; Кружилко, Сторож, & Полукаров, 2017; Кружилко, Ткалич, & Полукаров, 2019; Майстренко, & Лях, 2019).

Варто зазначити, що рівень виробничого травматизму все ще досить високий у різних галузях України, про що свідчать статистичні дані щодо виробничого травматизму. Існують шкідливі і небезпечні виробничі чинники, що приводять до травматизму, запобігання яким значною мірою залежить від своєчасного реагування та профілактики цього небажаного явища.

Актуальність дослідження підтверджується затвердженням Концепції безпеки закладів освіти. Згідно з розпорядженням КМУ від 7 квітня 2023 року № 301-р метою Концепції є створення рівних, незалежних і безпечних умов здобуття освіти. Строк реалізації Концепції — 2023—2025 роки. Основними завданнями Концепції є: створення безпечної інфраструктури закладів освіти, ефективне запобігання та протидія негативним безпековим явищам в освітньому середовищі, формування компетентностей безпеки учасників освітнього процесу.

Охорона праці в навчальному закладі є визначальним компонентом забезпечення якості, комфорту і безпеки всіх учасників навчального процесу. Роботу навчальних закладів з точки зору охорони праці потрібно розглядати в двох напрямках: забезпечення безпечного навчального процесу для здобувачів освіти та працівників закладів освіти.

Метою статті є проведення статистичного аналізу травматизму серед здобувачів освіти та працівників закладів освіти державної та комунальної форм власності, підприємств, установ і організацій, що належать до сфери управління МОН.

Матеріали і методи. Дослідження спрямовано на вивчення загальнодоступної статистичної інформації показників травматизму за звітами Державної служби статистики України та за результатами річних звітів з травматизму закладів вищої та фахової передвищої освіти.

Під час проведення досліджень застосовано метод статистичного аналізу нещасних випадків, які виникли в галузі освіти за період з 2019 р. по 2023 р. для визначення загальних тенденцій щодо травматизму під час освітнього процесу та

побуті. Метод статистичного аналізу нещасних випадків ґрунтується на вивченні кількісної залежності нещасних випадків та професійних захворювань від впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів на основі відповідних актів розслідування.

Під час дослідження враховано досвід аналізу нещасних випадків на підприємствах різноманітних галузей як в Україні, так і за кордоном.

Викладення основних результатів дослідження. Велику роль у запобіганні випадкам травматизму серед здобувачів освіти та працівників закладів освіти відіграє аналіз, і головне, своєчасне доведення його результатів до всіх працівників закладів освіти (Штих, & Євтушенко, 2023).

Метою аналізу травматизму є визначення закономірності виникнення нещасних випадків, розробка заходів з їх запобігання та профілактики травматизму, у зв'язку з чим потрібно систематично аналізувати й узагальнювати причини травматизму.

Дослідження спрямовано на вивчення і порівняння загальнодоступної статистичної інформації показників травматизму на виробництві за звітами Державної служби статистики України та за результатами річних звітів з травматизму вищої та фахової передвищої освіти, органів управління обласних та Київської міської військової адміністрації.

При проведенні аналізу використано статистичні відомості травматизму серед здобувачів освіти та працівників закладів освіти. У ході аналізу визначались причини та характер нещасних випадків, найнебезпечніші види діяльності та процеси, виявлялись загальні тенденції травматизму під час освітнього процесу та у побуті.

За офіційними даними, у галузі освіти за період з 2019 р. по 2023 р. травми отримали 693 працівники, з яких 42 — зі смертельним наслідком (Статистичний бюлетень: Травматизм на виробництві в Україні у 2019—2023 роках), (рис. 1).

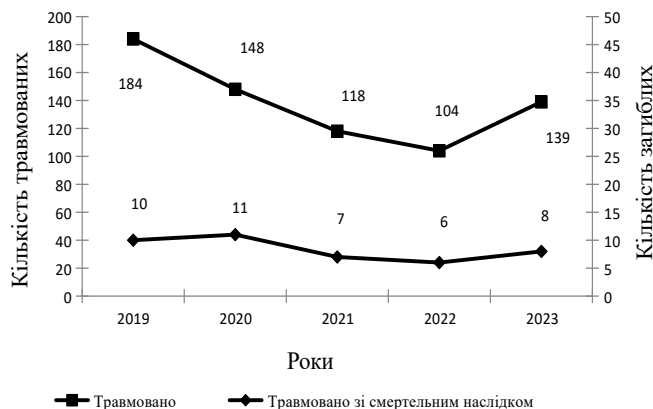


Рис. 1. Динаміка виробничого травматизму серед працівників у галузі освіти України, 2019—2023 рр.

Незважаючи на триваючу широкомасштабну збройну агресію, а в окремих випадках в умовах ведення активних бойових дій, керівники та відповідальні по-

садові особи з охорони праці та безпеки життєдіяльності закладів освіти продовжують виконувати свої основні функції щодо забезпечення безпечних і нешкідливих умов праці під час трудової діяльності.

Збільшення рівня виробничого травматизму та професійної захворюваності в закладах освіти у 2023 р. (рис. 1) обумовлено наслідками повномасштабної збройної агресії та зменшенням кількості працівників, які працюють дистанційно. Крім того, постійні психологічні (стресові) навантаження від наслідків воєнних дій, особливо в районах, наближених до районів бойових дій, впливають на погіршення загального стану здоров'я працівників, що приводять до загострення хронічних захворювань та, як наслідок, смерті під час виконання ними посадових обов'язків.

Основними причинами нещасних випадків за період з 2019 р. по 2023 р. в закладах освіти є організаційні, які складають майже 60%. Аналіз причин нещасних випадків показує, що основною причиною травматизму залишається людський фактор. Передусім це недоліки та упущення в організації охорони праці в закладах освіти, підприємств, установ та організацій, а також нехтування працівниками особистою безпекою.

Проаналізувавши розподіл нещасних випадків за групами професій у галузі освіти за період з 2019 р. по 2023 р., слід зазначити, що найбільший відсоток травматизму припадає на технічних і педагогічних працівників (рис. 2).



Рис. 2. Відсотковий розподіл нещасних випадків за групами професій працівників закладів освіти, 2019—2023 рр.

За оперативною інформацією органів управління освітою Київської міської державної (військової) адміністрації, закладів вищої та фахової передвищої освіти комунальної та державної форми власності, що належать до сфери управління МОН, в період 2019—2023 рр. під час освітнього процесу травми отримали 25,926 тис. здобувачів освіти (Лист МОН «Про стан травматизму серед здобувачів освіти та працівників закладів освіти за 2022 рік»; Лист МОН «Про стан травматизму серед здобувачів освіти та працівників закладів освіти за 2023 рік»), (рис. 3).

На динаміку травматизму здобувачів освіти здебільшого вплинули зовнішні причини. Так, з переходом закладів освіти на дистанційний режим роботи внаслідок початку повномасштабної агресії кількість травмованих здобувачів освіти значно зменшилось. Але з переходом закладів освіти у звичайний режим роботи

в більшості регіонів за 2023 р. спостерігається збільшення випадків травматизму здобувачів освіти під час освітнього процесу порівняно з 2022 роком.

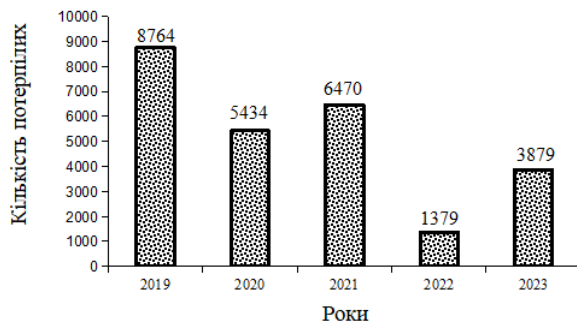


Рис. 3. Динаміка травматизму із здобувачами освіти під час освітнього процесу у 2019—2023 рр.

За узагальненою статистичною інформацією за період 2019—2023 рр. нещасні випадки зі здобувачами освіти під час освітнього процесу, що відбуваються під час перерв і занять із фізкультури та рухливих ігор, є причиною 73% випадків травматизму в закладах освіти. Доведено, що у 82,5% випадків причиною травми є поведінка самого здобувача і тільки у 17,5% — наявність травмонебезпечної ситуації (рис. 4), (Лист МОН «Про стан травматизму серед здобувачів освіти та працівників закладів освіти за 2023 рік»).

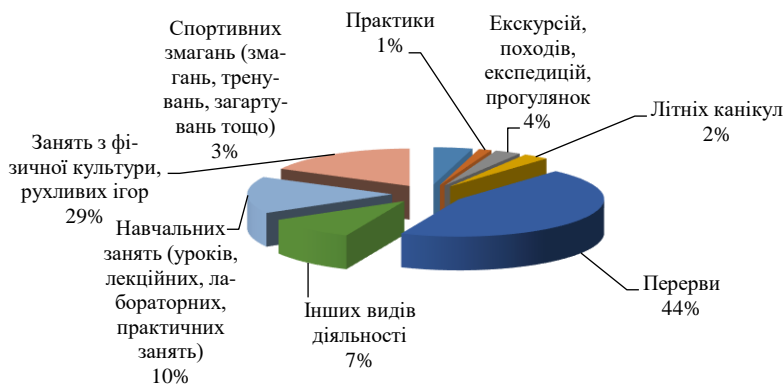


Рис. 4. Відсотковий розподіл нещасних випадків за видами діяльності у 2019—2023 рр.

Згідно зі статистичними даними невинного травматизму (у побуті) в період 2019—2023 рр. загинуло 2293 учасників освітнього процесу (рис. 5), у тому числі за складником вищої освіти — 111 осіб: 2019 р. — 34 особи, 2020 р. — 16 осіб, 2021 р. — 27 осіб, 2022 р. — 27 осіб, 2023 р. — 7 осіб.

Аналіз статистичних даних невинного травматизму зі смертельними наслідками підтвердив, що у 2022 р. на першому місці за поширеністю знаходяться нещасні випадки, що пов'язані з наслідками воєнних дій (47%), на другому — транспортні нещасні випадки (15%), на третьому — випадкове утоплення та за-

нурення у воду (9%), на четвертому — віддалені наслідки зовнішніх причин захворюваності та смертності (6%), на п'ятому — навмисне самоушкодження (5%) (табл. 1).

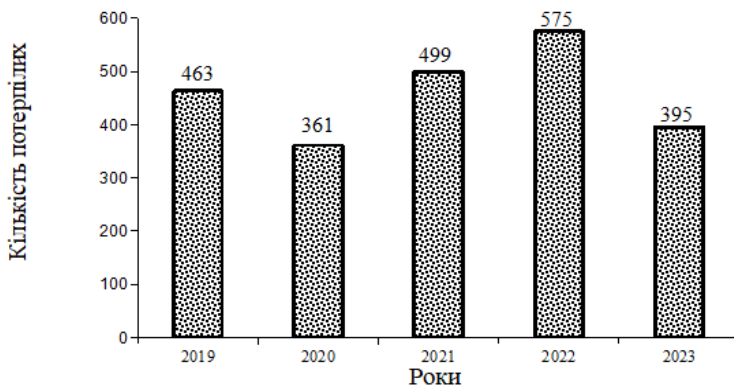


Рис. 5. Динаміка невиробничого травматизму зі смертельними наслідками, 2019—2023 рр.

Таблиця 1. Відсотковий розподіл нещасних випадків зі смертельними наслідками за причинами їх виникнення у 2022 році

Причина нещасного випадку	Відсоток
Випадкова дія неживих механічних сил (осколок вибухового пристрою (боєприпасу), куля вогнепальної зброї тощо)	47
ДТП	15
Випадкове утоплення та занурення у воду	9
Віддалені наслідки зовнішніх причин захворюваності та смертності	6
Навмисне самоушкодження	5
Дія диму, вогню та полум'я	3
Падіння	2
Випадкове отруєння та дія алкоголю	1
Випадкові отруєння та дія отруйних речовин	1
Спричинені електричним струмом, випромінюванням, температурою або тиском	1
Вплив живих механічних сил	1
Інші нещасні випадки із загрозою диханню	1
Інші	8

Порівняно з 2022 р. кількість нещасних випадків у 2023 р. зменшилась на 31,3% (з 575 до 395) (рис. 5), при цьому кількість нещасних випадків, що пов'язані з дорожньо-транспортними пригодами зменшилось у 1,2 раза (з 86 до 69); випадковим утопленням та зануренням збільшилась у 1,2 раза (з 53 до 66); випадковою дією неживих механічних сил (осколок вибухового пристрою (боєприпасу), куля вогнепальної зброї) зменшилась у 6,5 раза (з 272 до 42); навмисним

самоушкодженням збільшилось у 2,2 раза (з 28 до 61); віддаленими наслідками зовнішніх причин захворюваності та смертності збільшилась у 1,5 раза (з 36 до 54). У 2023 році на першому місці за поширеністю знаходяться дорожньо-транспортні пригоди, на другому — випадкове утоплення та занурення у воду, на третьому — навмисне самоушкодження, на четвертому — віддалені наслідки зовнішніх причин захворюваності та смертності (Лист МОН «Про стан травматизму серед здобувачів освіти та працівників закладів освіти за 2023 рік»).

Окрім причин нещасних випадків зі смертельними наслідками внаслідок воєнних дій, основними причинами нещасних випадків є дорожньо-транспортні пригоди, нещасні випадки на воді, навмисне самоушкодження. Серед зовнішніх причин захворюваності здобувачів освіти можуть бути порушення правил та інструкцій з безпеки життєдіяльності, небажання виконувати вимоги безпеки на вулиці, біля водойм у побуті тощо.

За масштабами, збитками та складністю вирішення проблем випадків не виробничого травматизму (у побуті) зі смертельними наслідками є соціально небезпечним явищем та потребує: системного підходу щодо профілактики травматизму в побуті на всіх рівнях, усвідомлення пріоритетності вимог охорони життя та здоров'я населення над іншими інтересами, фінансування відповідних заходів у сфері безпеки життєдіяльності, посилення контролю за виконанням заходів з профілактики травматизму не виробничого характеру, планування заходів з пожежної безпеки, безпеки дорожнього руху, безпеки на водоймах тощо.

Покращення стану травматизму серед учасників освітнього процесу можливо у разі комплексного підходу кожного до проблем профілактики травматизму на всіх рівнях та має включати не тільки внесення змін у законодавчі та нормативно-правові акти й набуття практичних безпекових навичок у всіх сферах діяльності, також необхідно змінити ставлення кожного до особистої безпеки, усвідомлення, що запорукою безпеки є неухильне дотримання всіма учасниками освітнього процесу встановлених правил поведінки в різних умовах. За таких умов можливо докорінно змінити ситуацію на краще (Лист МОН «Про стан травматизму серед здобувачів освіти та працівників закладів освіти за 2023 рік»).

Роботу з профілактики травматизму в закладах освіти необхідно проводити диференційовано, залежно від віку здобувачів освіти. Заходи щодо профілактики травматизму повинні включатися в план виховної роботи, який контролюється керівником закладу освіти. Знання та навички, отримані в закладі освіти, закріплюються в повсякденному житті. Основна увага кураторів (класних керівників) має бути направлена на навчання здобувачів правилам безпеки життєдіяльності, порядку дій у разі загрози виникнення або виникнення надзвичайної ситуації, у тому числі порядку дій у разі оголошення сигналу «Повітряна тривога», поводження біля водойм, дотримання правил дорожнього руху тощо. Крім того, необхідно звертати увагу на виконання заходів психологічного забезпечення з метою запобігання випадкам навмисного самоушкодження серед здобувачів освіти.

У роботі закладу освіти одним із пріоритетних завдань є формування стійких навичок безпечної поведінки здобувачів освіти на території закладу освіти, на вулицях і дорогах. Основною формою профілактики травматизму є інструктування

з охорони праці та безпеки життєдіяльності як працівників закладу освіти, так і здобувачів освіти.

Висновки

У статті проведено статистичний аналіз травматизму серед учасників освітнього процесу та працівників закладів освіти державної та комунальної форм власності, підприємств, установ та організацій, що належать до сфери управління МОН за період з 2019 р. по 2023 рік.

У результаті аналізу статистичних даних виробничого травматизму в галузі освіти за п'ять років з'ясовано, що травми отримали 693 працівники, з яких 42 — зі смертельним наслідком. Встановлено, що основними причинами нещасних випадків за період з 2019 р. по 2023 р. в закладах освіти є організаційні, які складають майже 60%. Аналіз причин нещасних випадків показує, що основною причиною травматизму залишаються недоліки та упущення в організації охорони праці в закладах освіти, підприємств, установ та організацій, а також нехтування працівниками особистою безпекою. Велика частка травм 80% у закладах освіти припадає на дві професійні групи: технічні та педагогічні працівники.

Згідно зі статистичними даними невиробничого травматизму (у побуті) в період 2019—2023 рр. травми отримали 25,926 тис. здобувачів освіти, загинуло 2293 учасники освітнього процесу. Окрім причин нещасних випадків із смертельними наслідками внаслідок воєнних дій, основними причинами нещасних випадків є дорожньо-транспортні пригоди, нещасні випадки на воді, навмисне самоушкодження та внаслідок зовнішніх причин захворюваності здобувачів освіти.

З'ясовано, що 73% випадків травматизму із здобувачами освіти під час освітнього процесу сталися під час перерв, занять із фізкультури та рухливих ігор. Доведено, що у 82,5% випадків причиною травми є поведінка самого здобувача і тільки у 17,5% — наявність травмонезбезпечної ситуації.

На ці факти слід звертати особливу увагу під час проведення інструктажів з охорони праці та безпеки життєдіяльності як з працівниками, так і зі здобувачами освіти. Адже набуття практичних безпекових навичок, усвідомлення, що запорукою безпеки є неухильне дотримання всіма учасниками освітнього процесу встановлених правил безпечної поведінки як під час освітнього процесу, так і в побуті.

Література

Березовський, А. П., Трус, О. М., Прокопенко, Е. В., (2019). Стан виробничого травматизму та професійних захворювань в Україні. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*, 1, 241—249.

Богданова, О. В., (2016). Комбінований метод оцінки ризику травматизму для промислового підприємства. *Проблеми охорони праці в Україні*, 31, 52—63.

Бондаренко, Є. А., Вишневський, С. Я., Бондаренко, А. Є. (2021). Сучасний стан електро-травматизму в енергетичній галузі. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 3, 18—23. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-156-3-18-23>.

Водяник, А. О. (2008). Методологічні основи врахування фактора ризику в профілактиці виробничого травматизму. (Дис. канд. техн. наук). Національний науково-дослідний інститут промислової безпеки та охорони праці, Київ.

Глива, В. А., Березуцький, В. В., Березуцька, Н. Л., Халіль, В. В., (2016). Аудит ризиків безпеки на робочому місці. Технологічний аудит та резерви виробництва, 2(3), 12—17. DOI: 10.15587/2312-8372.2016.66731.

Дідур, К. М., Дмитрук, С. П. (2023). Економічні наслідки виробничого травматизму. *Агро-світ*, 9—10, 96—105. DOI: 10.32702/2306-6792.2023.9-10.96.

Євтушенко, О. В., Сірик А. О., (2018). Безпека праці в навчальних закладах України. Матеріали Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Досягнення і проблеми сучасної науки». Вінниця. el-conf.com.ua.

Запорожець, О. І., Гогунський В. Д. (2013). Завдання наукових досліджень з охорони праці. *Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві*, 4(5), 19—23.

Здановський, В. Г., Гогіташвілі, Г. Г., Степанишин, В. М. (2016). Нове у системі управління охороною праці на основі системного підходу та імплементації євростандартів. *Проблеми охорони праці в Україні*, 31, 3—11.

Здановський, В. Г., Євтушенко, О. В., Сірик, А. О. (2017). Удосконалення інформаційно-керуючої системи енергетичного господарства підприємств на основі інтелектуалізації процесу прийняття рішень. *Проблеми охорони праці в Україні*, 38, 80—93.

Кружилко, О. Є., Майстренко, В. В., Ткачук, К. Н., Полукаров, О. І. (2013). Управління ризиком травматизму на виробничих підприємствах. *Проблеми охорони праці в Україні*, 26, 3—8.

Кружилко, О. Є., Ткалич, І. М., Сірик, А. О., Полукаров, О. І. (2019). Теоретичні основи та інформаційне забезпечення оцінювання виробничого ризику. *Харчова промисловість*, 25, 124—132. DOI: 10.24263/2225-2916-2019-25-18.

Кружилко, О. Є., Сторож, Я. Б., Ткалич, І. М., Полукаров, О. І. (2017). Підвищення ефективності управління охороною праці на основі виявлення небезпек та оцінки ризиків виробничого травматизму. *Адаптивні системи автоматичного управління*, 2, 38—45. DOI: <https://doi.org/10.20535/1560-8956.31.2017.128057>.

Лук'янихіна, О. А., Виганійло, С. М. (2023). Статистичні методи для цілей науки і практики. *Наше право*, 2, 192—195. DOI <https://doi.org/10.32782/NP.2023.2.27>.

Майстренко, В. В., Лях, Ю. М., Євтушенко, О. В. (2019). Аналіз стану безпеки працюючих у харчовій промисловості. *Харчова промисловість*, 25, 133—140. DOI: 10.24263/2225-2916-2019-25-19.

Суусанов, Л. І. (2018). Виробничий травматизм на підприємствах міста Кривий Ріг: аналіз стану та профілактика. *Правовий часопис Донбасу*, 3(64), 68—73. DOI:10.32366/2523-4269-2018-64-3-68-73.

Таїрова, Т. М. (2017). Прогнозування нещасних випадків на виробництві. *Проблеми охорони праці в Україні*, 41, 40—49.

Ткачук, К. Н. (2005). Критерії оцінювання ризику нещасних випадків на виробництві. *Проблеми охорони праці в Україні*, 9, 19—30.

Штих, А., Євтушенко, О. (2023). Аналіз стану травматизму серед здобувачів та працівників закладів освіти. Матеріали 89 Міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді — вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті».

Hatiar, K., Beno, R., Markova, P., Sablik, J. (2015). Ergonomics as an integral part of enterprise programs focused on health and safety at work. In: Proceedings of the XXVIII International Conference CURRENT ISSUES OF OCCUPATIONAL SAFETY.

Hollá, K., Ďaďová, A., Hudáková M., Valla, J., Cidlínová A., Makovická Osvaldová, L. (2023). Causes and circumstances of accidents at work in the European Union, Slovakia and Czech Republic. *Front Public Health*. DOI: 10.3389/fpubh.2023.1118330.

Markova, P., Homokyova, M., Praj, F., Cambal, M. (2022). Prevention of accidents at work and occupational diseases by implementation of ergonomics. *Science Journal*, March, 5526—5532. DOI: 10.17973/MMSJ.2022_03_2022002.

Takala, J., Hämäläinen, P., Håkan Nygård, C-H., Sauni, R., Neupane, S. (2022). Comparative Global Estimates on the Work-related Burden of Accidents and Diseases, 6—10 February,

Melbourne—Rome, Global Digital Congress, Sharing solutions in occupational health through and beyond the pandemic. DOI:10.1016/j.shaw.2021.12.1158.

Zulfiqar, A., Bhaskar, S. (2016). Basic statistical tools in research and data analysis. *Indian Journal of Anaesthesia* | Published by Wolters Kluwer, 54, 662—669. DOI: 10.4103/0019-5049.190623.

POTENTIAL ADJUVANTS AND THEIR SYSTEMS FOR THE CREATION OF NEW VACCINES**T. Belemets, V. Krasinko, V. Udumovich, A. Chegrynets***National University of Food Technologies*

Key words:

Vaccine market
HSV-2 vaccines
Adjuvants
Immunobiological drugs
Immunopotentiating agents

Article history:

Received 08.07.2024
Received in revised form
24.07.2024
Accepted 19.08.2024

Corresponding author:

V. Krasinko

E-mail:

krasinkovo@nuft.edu.ua

Citation: Белемець Т. О., Красінько В. О., Удимович В. М., Чегринєць А. І. (2024). Потенційні ад'юванти та їх системи для створення новітніх вакцин. *Наукові праці НУХТ*, 30(4), 43—66.
DOI: 10.24263/2225-2924-2024-30-4-6

ABSTRACT

Nowadays, despite the sufficiently well-studied and practically developed technology for obtaining vaccine preparations, their production is still associated with a fairly large number of problems and risks. An important part of this issue is the choice of an effective, safe and affordable adjuvant in order to preserve the antigenicity and achieve the proper immunogenicity of vaccines.

With the use of modern scientific publications widespread, current and most promising adjuvants of synthetic and microbial origin in order to obtain the latest vaccines against HSV-2 were analyzed in the work.

It was found the use of previously licensed immunopotentiating agents and their systems – aluminum salts, Freund's adjuvant «IFA» and «CFA» (additionally contains killed bacterial cells of *Mycobacterium tuberculosis*), squalene-based adjuvants («MF59»), nanoemulsions of the «oil-in-water» type «AS03» and surfactant-based adjuvants («Span 85», «Tween»). The article also presents analysis of the advantages, disadvantages, prospects and effectiveness of their use for the purpose of obtaining vaccines of the new generation.

A promising approach now is the possibility of inducing a persistent immune response through the use of agonists of TLR receptors, in particular adjuvants «CpG1018» (TLR4 agonist), «AS01b» and «AS04» (TLR5,6,7) due to their ability to initiate persistent immune responses (T- and B-cell responses).

Special attention is paid to the expediency of using adjuvants of microbial origin: «Flagellin» isolated from the genetically engineered strain *Salmonella minnesota R595 MPL-A*, as a structural protein of the flagella of gram-negative bacteria *Escherichia coli*, spherical nanometric vesicles «OMV» of the outer membrane of *Escherichia coli*, as well as adjuvant system based on the combination of liposomes with *Salmonella typhi* porins.

It was possible to obtain these adjuvants thanks to the cultivation of the corresponding producers in the conditions of microbiological laboratories, which is ecological, safe and may have potential economic feasibility.

DOI: 10.24263/2225-2924-2024-30-4-6

ПОТЕНЦІЙНІ АД'ЮВАНТИ ТА ЇХ СИСТЕМИ ДЛЯ СТВОРЕННЯ НОВІТНІХ ВАКЦИН

Т. О. Белемець, В. О. Красінько, В. М. Удимович, А. І. Чегринець
Національний університет харчових технологій

Нині, незважаючи на вже достатньо добре вивчені та опрацьовані практично технології отримання вакцинних препаратів, їх виробництво й досі пов'язано з досить великою кількістю проблем і ризиків, серед яких вибір ефективного, безпечного та доступного ад'юванта задля збереження антигенності й досягнення належної імуногенності вакцин.

З використанням сучасних наукових публікацій у статті здійснено аналіз розповсюджених, актуальних і найбільш перспективних ад'ювантів синтетичного та мікробного походжень з метою отримання новітніх вакцин проти ВПГ-2.

Виявлено, що й досі науково обґрунтованим залишається використання раніше ліцензованих імунопотенціюючих агентів та їх систем — солей алюмінію, ад'юванта Фрейнда «IFA» та «CFA» (додатково вміщує вбиті бактеріальні клітини *Mycobacterium tuberculosis*), ад'ювантів на основі сквалену («MF59»), наноемульсій типу «масло у воді» «AS03» та ад'ювантів на основі ПЛАР («Span 85», «Tween»). Проаналізовано переваги, недоліки, перспективність та ефективність застосування з метою отримання вакцин нового покоління.

Перспективним підходом нині є можливість індукції стійкої імунної відповіді за рахунок застосування агоністів TLR рецепторів, зокрема ад'ювантів «CpG1018» (агоніст TLR4), «AS01b» й «AS04» (TLR5,6,7) завдяки їх здатності до ініціації стійких імунних відповідей (Т- та В-клітинні відповіді).

Особлива увага звертається на доцільність застосування ад'ювантів мікробного походження, зокрема MPL-A, виділеного з генетично сконструйованого штаму *Salmonella minnesota R595*, флагеліну — структурного білка джгутиків грамнегативних бактерій *Escherichia coli*, сферичних нанометричних везикул OMV зовнішньої мембрани *Escherichia coli*, а також ад'ювантної системи на основі комбінації ліпосом з поринами *Salmonella typhi*. Ці ад'юванти вдалось отримати завдяки культивуванню відповідних продуцентів у контрольованих умовах біотехнологічного процесу, що є екологічно, безпечно та може мати потенційну економічну доцільність.

Ключові слова: ринок вакцин, вакцини проти ВПГ-2, ад'юванти, імунобіологічні препарати, імунопотенціюючі агенти.

Постановка проблеми. На сьогодні не існує ефективнішої стратегії для зниження статистичних показників захворюваності й смертності, ніж здійснення вакцинації. Адже саме вакцинація є найбільш раціональним та економічно вигідним інструментом вирішення проблематики імунологічного захисту людства від найбільш розповсюджених інфекційних агентів. Згідно з наявними опублікованими даними з початком глобальної світової імунізації спостерігається зниження рівнів смертності проти шести найбільш розповсюджених збудників захворювань на дифтерію, кашлюк, поліомієліт, туберкульоз, кір та правець. У сучасному світі лише

завдяки глобальній імунізації людству вдалось подолати масштабну світову пандемію, спричинену зооантропонозним інфекційним агентом — SARS-CoV-2 (Karch, & Burkhard, 2016).

На часі нагальною є проблематика поширення захворювань на генітальну герпетичну інфекцію, викликану вірусом простого герпесу 2-го типу (ВПГ-2) — *Herpes simplex virus*, який характеризується щорічною провокацією 23 млн нових випадків. За оцінкою ВООЗ, 417 млн людей у віці 15...49 років (станом на січень 2022 р.) інфіковані вірусом ВПГ-2 типу. Зокрема, у пацієнтів з ослабленим імунітетом в анамнезі захворювання спостерігається важкі й, часто, летальні випадки, обумовлені ураженням центральної нервової системи. Тому варто наголосити, що лише попереднє щеплення залишається єдиним доступним і раціональним методом лікування за рахунок специфічної імунізації проти ВПГ-1/2, яке можна вважати найбільш виправданим і перспективним. Саме в неактивній формі ВПГ є взагалі нечутливим до дії лікарських засобів, а спроби подіяти є свідомо марною тратою часу, фінансів і дискредитацією самої ідеї можливості лікування герпесвірусних інфекцій (Stanfield, Kousoulas, & Gershburg, 2021; Alareeki та ін., 2023).

Актуальність літературного дослідження визначається високим рівнем розповсюдженості ВПГ-2 та викликаним цим попитом українців на новітню вітчизняну вакцину проти ВПГ-2 з ефективним і безпечним ад'ювантом, обумовлену відсутністю єдиного раніше існуючого імпортного препарату та неможливістю наявної противірусної медикаментозної терапії повним чином запобігти рецидивам і викоріненню захворювання.

Отримання вакцини дасть змогу вирішити наявну соціально-економічну проблему захворювання працездатних людей репродуктивного віку, а також сприятиме позитивній тенденції щодо запобігання розповсюдженню інфекції. Проте за умови вже достатньо вивчених і опрацьованих практично технологій отримання вакцин виробництво імунобіологічних препаратів пов'язано з численними ризиками й проблемами, зокрема за рахунок характеру обраних імунопотенціюючих агентів (ад'ювантів).

У середньому розробка нового вакцинного препарату займає 5...7 років та безпосередньо залежить від низки факторів: фінансування, соціальної зацікавленості, специфіки роботи з патогеном, технологічного забезпечення тощо. Наразі ж виробники прагнуть розробляти імунобіологічні препарати, які будуть ефективними у запобіганні або зменшенні тяжкості перебігу інфекційного захворювання за умови застосування мінімальної кількості доз. Тому зміни, що відбуваються в технологіях виробництва вакцин, пов'язані з необхідністю отримання стабільного антигенного матеріалу з належною імунною відповіддю (обумовленою використанням дієвих ад'ювантів) й обов'язковим високим рівнем безпеки (O'Rourke та ін., 2020).

З метою задоволення сучасних вимог до новітніх імунобіологічних препаратів важливим є етап підбору раціонального і безпечного ад'юванта задля збереження антигенності й досягнення належної імуногенності вакцин. Варто зазначити, що один і той самий ад'ювант може мати здатність як до стимуляції імунітету, так і до інертності залежно від типу вакцинного антигену. Дозволені наразі до використання імунопотенціюючі агенти виконують це завдання завдяки імітації спе-

цифічних наборів еволюційно консервативних молекул, які включають: ліпополісахариди (LPS), компоненти клітинної стінки бактерій, ендцитовані нуклеїнові кислоти, такі як ssDNA, dsRNA, а також неметильований CpG динуклеотид, що містить ДНК (Shah та ін., 2017).

Наразі схвалення нових джерел ад'ювантів може зазнавати значних часових затримок і високих економічних витрат унаслідок нормативних проблем, пов'язаних з питанням їх вивчення, використання, застосування клітинних субстратів або заяви на внесення змін у технологічні процеси отримання — аспекти перешкоди, які стримують новинки, а також затримують доступність вакцин (особливо в країнах з низьким рівнем ресурсів) (Mohan та ін., 2013; Facciola та ін., 2022).

Зважаючи на все вище сказане, питання розгляду та підбору потенційних ад'ювантів з науково доведеною ефективністю й безпечністю для отримання новітніх вакцин не втрачає своєї важливості та перспективності. Варто також зазначити, що абсолютно всі наразі наявні програми вакцинації у світі потребують адекватної підтримки, визнання своєї цінності та економічних вкладень з метою розроблення технологій імунобіологічних препаратів нового покоління.

Метою статті є огляд та узагальнення літературних джерел, які стосуються питань досліджень механізмів і біотехнологічних аспектів отримання й використання актуальних імунопотенціюючих агентів як перспективних ад'ювантів при розробленні новітніх вакцин, зокрема для удосконалення технології отримання вакцини проти ВПГ-2.

Матеріали і методи. Матеріалами досліджень є новітні публікації вітчизняних і зарубіжних науковців у провідних та спеціалізованих періодичних виданнях, що стосуються питань платформ, механізмів і біотехнологічних аспектів підбору ад'ювантів (з акцентом на ад'юванти мікробного походження) для отримання новітніх імунобіологічних препаратів.

Також було використано актуальні та найбільш поширені світові наукометричні бази даних (Google Scholar, Web of Science, PubMed), матеріали провідних закордонних видавництв (Science immunology, Cell, Medicine, Vaccines, Biochemical pharmacology).

Викладення основних результатів дослідження. Обсяг ринку вакцин України та очікувані темпи його розвитку. Загальноприйнято вважати, що вакцинація — цінна інвестиція у здоров'я громадян країни з позитивною економічною віддачею. При чому вакцинацію вважають важливою для системи охорони здоров'я незалежно від виду її переваг (запобігання смерті, збереження років життя: DALY — років життя з поправкою на інвалідність, QALY — набутих років життя із поправкою на якість), про які повідомляється; своєчасне щеплення може забезпечити економію завдяки запобіганню видаткам на охорону здоров'я, пов'язаних з лікуванням ряду відповідних захворювань (<https://www.unicef.org/ukraine/stories/vaccination-for-grown-ups-during-war>).

На сьогодні на світовому ринку існує декілька розроблених вакцин проти ВПГ-2 типу, що сприяють розвитку клітинної імунної відповіді, проте жодна не здатна надати повної гарантії (80...90%) та має певні недоліки. Так, «Chiron» (Британія; препарат на основі двокомпонентних білків та ад'юванта «MF-59») — має різний вплив на організм, обумовлений статтю, «GEN-003» (США; стимулює імуноглобуліни сироватки крові для інактивації вірусу) — знаходиться на стадії

клінічних досліджень, «BNT163» (Німеччина, на основі мРНК, кодує глікопротеїни ВПГ-2, що запобігають проникненню вірусу в клітини й подальшому поширенню) — знаходиться на першому етапі клінічної розробки (Watanabe та ін., 2023; O'Rourke та ін., 2020).

До початку повномасштабної війни на ринку України були представлені ще дві протигерпетичні вакцини — «Герповакс» і «Вітагерпевак» на основі ліофілізованого інактивованого антигену вірусу I і II, що був вирощений на перещеплювальній лінії клітин нирок зеленої мавпи — «Vero B» (є дозволеними ВООЗ як субстрат для виробництва противірусних вакцин) та офіційно зареєстрований у державному реєстрі лікарських засобів України (Salabro та ін., 2022).

Наразі у підконтрольних територіях України наявні деякі види вакцин для імунопрофілактики населення відповідно до чинного «Календаря профілактичних щеплень». Поставки цих імунобіологічних препаратів значною мірою активувалися впродовж липня-серпня 2022 р., але в імпорті відсутні вакцини проти ВПГ-1 та ВПГ-2.

Отже, вакцинація й нині залишається одним із найбільш ефективних профілактичних методів можливості протидії інфекційним захворюванням й входить до гарантованих державних послуг України. Перелік профілактичних щеплень, які обов'язкові для включення до «Календаря профілактичних щеплень» (складається із 44 обов'язкових вакцин), наведений у ст. 12 Закону України «Про захист населення від інфекційних хвороб» від 06.04.2000 р. № 1645-III. Календар у 2020 р. був розширений відповідно до затвердженого наказу МОЗ України на додаткову вакцинацію від 10 інфекційних збудників (проти гемofilьної інфекції, гепатиту В, паротиту, краснухи та ін.); станом на 2022 р. запланованим було також додаткове впровадження вакцинації проти пневмококової інфекції. Тут варто зауважити, що жоден із нині прийнятих і поданих на розгляд законопроектів України не містить положень щодо впровадження обов'язкової вакцинації проти ВПГ1/2 до «Календаря профілактичних щеплень» (Смілянська, Волянський, Дідоренко, & Карлова, 2024).

Імунологічні особливості використання актуальних ад'ювантів у складі новітніх вакцин. Усі нині існуючі та доступні до використання ад'юванти у складі вакцин умовно можна розподілити та декілька видів залежно від їх функціоналу: можливості зменшення кількості доз введення вакцини, необхідних для активації імунної відповіді або антигену; посилення імуногенності рекомбінантних або очищених антигенів; прискорення імунної відповіді; підвищення ефективності й збільшення тривалості захисту у популяціях зі слабкими імунними відповідями (особи похилого віку, новонароджені, ВІЛ-інфіковані та ін.), а також застосування як системи доставки антигену та його асиміляції у слизовій оболонці епітеліальними клітинами (Mohan та ін., 2013).

Одна з найбільш популярних існуючих класифікаційних систем ад'ювантів базується на механізмах їх дії та має дві основні категорії: імунні потенціатори (частинки) та системи доставки.

Окрім того, усі нині ліцензовані ад'юванти можна також класифікувати за п'ятьма потенційними способами дії: підтримка презентації антигенного матеріалу, індукція CTL (цитотоксичних Т-лімфоцитів), модифікація мереж цитокінів

(імуномодуляція), створення депо й націлення на конкретні імунокомпетентні клітини для подальшої їх диференціації в сенсibiliзовані форми (Facciola та ін., 2022).

Загалом, узагальнений механізм активації імунної відповіді (активації клітинної та гуморальної ланок імунітету), наведено на рис. 1. Причому варто зазначити, що в системах доставки ад'ювант не лише пов'язаний з антигеном вакцини, але й функціонує як носій антигену й депо зі здатністю до індукції місцевої прозапальної відповіді шляхом активації вродженої ланки імунітету, що призводить до залучення імунних клітин до місця ін'єкції (Ong та ін., 2021).

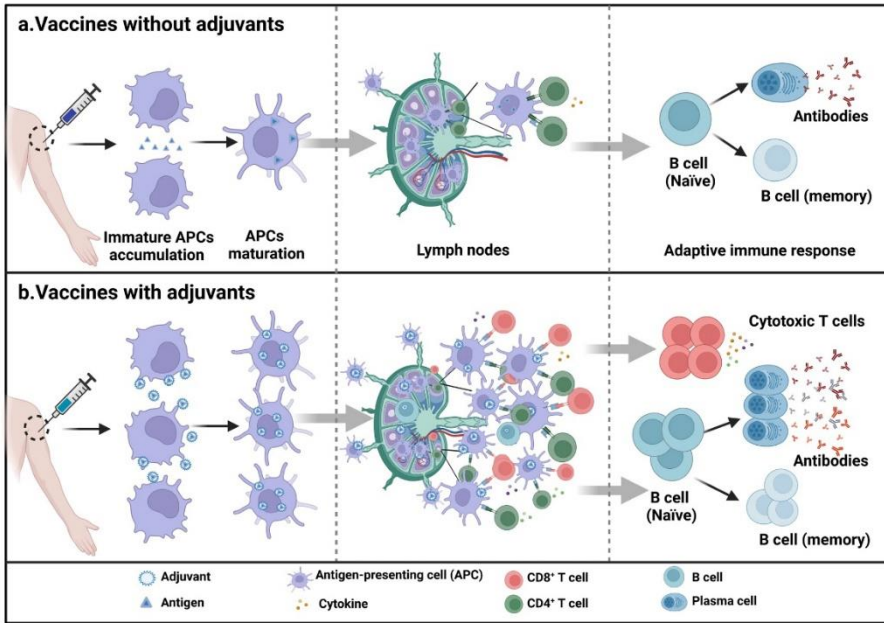


Рис. 1. Узагальнена схема імуногенності вакцин: а. Вакцини без використання ад'ювантів; б. Вакцини з ад'ювантами у своєму складі (Zhao та ін., 2023)

Як видно з рис. 1, вакцини у складі яких ад'юванти відсутні, індуюють більш помірну імунну (адаптивну) відповідь, що характеризується меншою кількістю утворення В-клітин пам'яті та плазматичних клітин; зменшення кількості останніх корелює зі зменшення титру антитіл в імунній сироватці. Варто також зауважити, що щеплення цими вакцинами не призводить до утворення цитотоксичних Т-лімфоцитів.

На противагу першим вакцинам, що містять у своєму складі ад'юванти, сприяють дозріванню більшої кількості антигенпрезентуючих клітин (АПК), посиленій взаємодії між антигенпрезентуючими клітинами та субпопуляцією Т-лімфоцитів (CD8, CD4), продукції більшої кількості й різноманітності поляризованих цитокінів, багатофункціональних Т-клітин, а також антитіл. Як результат, імунологічні реакції більш широкого та стійкого типу без потреби у збільшенні дози використаного антигену.

Нині Європейським агентством лікарських засобів (EMA) та Управлінням із

санітарного нагляду за якістю харчових продуктів і медикаментів (FDA), ліцензовано ряд ад'ювантів загальновідомих вакцин у світі (табл.1).

Таблиця 1. Узагальнений список ліцензованих ЕМА та FDA ад'ювантів у складі людських внутрішньом'язових вакцин (Facciola та ін., 2022; Apostolico та ін., 2016; Vanderslott, & Marks, 2021)

Торговельна назва	Тип вакцини	Вид ад'юванта
SYNFLORIX	Пневмококова полісахаридна кон'югована вакцина	Фосфат алюмінію (0,5 мг Al ³⁺)
ADACEL	Відновлений дифтерійний анатоксин, правцевий анатоксин та вакцина проти коклюшу	Фосфат алюмінію (0,3 мг Al ³⁺)
VAXELIS	Гепатиту В (рекомбінантна), поліомієліту (інактивована), коклюшу, правця, дифтерії (ацелюлярний компонент), вакцина проти <i>Haemophilus influenzae</i> типу В	Фосфат алюмінію (0,17 мг Al ³⁺); аморфний сульфат гідроксифосфату алюмінію (0,15 мг Al ³⁺)
AVAXIM	Гепатит А (інактивована)	Гідроксид алюмінію (0,3 мг Al ³⁺)
PREVENAR 13	Пневмококова 13-валентна (полісахаридна кон'югована)	Гідроксид алюмінію (0,125 мг Al ³⁺)
BOOSTRIX	Дифтерія, правець, коклюш (безклітинний компонент, знижений вміст антигену)	Гідроксид алюмінію (0,3 мг Al ³⁺) та фосфат алюмінію (0,2 мг Al ³⁺)
TETRAVAC	Дифтерія, правець, коклюш (ацелюлярний компонент), поліомієліт (інактивована)	Гідроксид алюмінію (0,3 мг Al ³⁺)
GARDASIL 9	9-ти валентна вакцина ВПЛ (рекомбінантна)	Аморфний гідроксифосфат сульфату алюмінію (0,5 мг Al ³⁺)
FENDRIX	Гепатит В (рекомбінантна)	AS04, що містить 3-О-дезацил-4'-монофосфорилліпід А (MPL) 50 мкг, адсорбований на гідроксиді алюмінію (0,5 мг Al ³⁺)
CERVARIX	ВПЛ (16, 18-ти типова, рекомбінантна)	AS04, що містить 3-О-дезацил-4'-монофосфорилліпід А (MPL) 50 мкг, адсорбований на гідроксиді алюмінію (0,5 мг Al ³⁺)
SHINGRIX	Оперізуючий герпес (рекомбінантна)	AS01B, що містить екстракт рослини <i>Quillaja saponaria</i> Molina, фракція 21 (QS-21) 50 мкг, 3-О-дезацил-4'-монофосфорилліпід А (MPL) із <i>Salmonella minnesota</i> 50 мкг
FLUAD	Грип (інактивована, поверхневий антиген)	MF59, що містить 9,75 мг сквалену; 1,175 мг полісорбату 80; 1,175 мг сорбітантріолеату; 0,66 мг цитрату натрію; 0,04 мг лимонної кислоти
NUVAXOVID	COVID-19 (рекомбінантна, з ад'ювантом)	Matrix-M, що містить фракцію А (42,5 мкг) і фракцію С (7,5 мкг) екстракту <i>Quillaja saponaria</i> Molina

Інформація, наведена в табл. 1, підтверджує, що більшість нині використовуваних імунобіологічних препаратів з ліцензією ЕМА й FDA характеризуються наявністю ад'ювантів різної природи, але переважно синтетичного походження (солі алюмінію, на основі/з вмістом сквалену). Загалом, така закономірність є цілком зрозумію, адже ці ад'юванти є одними з першочергово ліцензованих для використання в рецептурах вакцинних препаратів.

Впровадження до використання у складі вакцин нових видів ад'ювантів, зокрема мікробного походження, має часову пролонгацію, обумовлену необхідністю дотримання всіх наявних вимог без впливу на безпеку нових імунопотенціюючих агентів, що є складним завданням для науковців і фармацевтичних компаній при виборі джерел їх одержання. Саме тому на сьогодні у світі існує надмірно малий відсоток ад'ювантів, які включено до складу широко використовуваних ліцензованих вакцин. Отже, потреба в розширенні джерел отримання та пошук способів виділення нових видів ад'ювантів з метою підвищення безпеки й ефективності отриманих вакцинних препаратів, зокрема вакцин проти ВПГ-2 є актуальним завданням сьогодення (Malik та ін., 2018).

На підтвердження цієї потреби можна привести ситуацію з нещодавною пандемією COVID-19, яка підкреслила особливу важливість суспільного доступу до ефективних вакцин задля протистояння потенційній загрозі нових спалахів захворювань. Ад'ювантні властивості імунопотенціюючих агентів у вже ліцензованих протиковідних вакцинах (РНК-вакцинах) пов'язані з ліпосомальними компонентами, що використовуються як носії кодуючої РНК. Причому найновіша ліцензована вакцина проти COVID-19 у своєму складі має «Matrix-M» — ад'ювант на основі природних компонентів з фракцією-А та фракцією-С екстракту *Quillaja saponaria* Molina (Brito, Malyala, & O'Hagan, 2013).

З огляду на все сказане вище, при розробці новітніх вакцин проти ВПГ-2 важливим є підбір не лише природнього, але й раціонального та ефективного імунопотенціюючого агента, що відповідатиме таким вимогам: не вступатиме в небажані реакції взаємодії з іншими компонентами вакцини, буде доступним, матиме просту технологію виділення, а також наукові та експериментальні шляхи підтвердження своєї імуностимулюючої активності. При цьому важливо також враховувати можливий термін зберігання, економічну життєздатність й фармацевтичні характеристики ад'юванта — рівень ендотоксину, рН, осмоляльність, термостійкість тощо.

Ліцензовані ад'юванти як імунопотенціюючі агенти у складі вакцин. Важливою умовою входу вакцин у практику є наявність ліцензованих ад'ювантів, що мають підтверджену дієвість відповідними нормативними документами, отриманими на основі результатів проведених наукових досліджень. Саме тому дослідження різноманіття сімейства молекулярних сполук, які підвищують тривалість імунної відповіді та імуногенність вакцин, мають важливе значення для науково обґрунтованої максимізації захисного ефекту імунобіологічних препаратів шляхом підвищення величини та тривалості імунної відповіді (Pulendran та ін., 2021).

Ад'юванти на основі алюмінію (алюміній гідроксид або алюмінієвий галун) нині застосовують у складі щонайменше 146 схвалених вакцин для профілактики захворювань. Деякі з них вже згадувались у табл. 1. Натепер ад'юванти на основі

солей алюмінію можуть існувати у трьох типах: алюмінію фосфат, алюмінію сульфат та алюмінію гідроксид.

Ефективність цього виду імунопотенціюючих агентів забезпечується за рахунок створення «депо» для антигену, що локалізується у місці ін'єкції, подальшим уповільненням його вивільнення (за рахунок сорбції пролонгується контакт вакцини з клітинами), а також потужною гуморальною відповіддю за слабкої індукції клітинно-опосередкованої імунної відповіді. Варто зауважити, що з метою запобігання розвитку абсцесу за підшкірної інокуляції введення вакцин із солями алюмінію необхідно здійснювати виключно внутрішньом'язово. Це, у свою чергу, суттєво зменшує коло імунобіологічних препаратів з цим видом ад'ювантів (Гулянич, Недосеков, & Годовський, 2017; Powell, Andrianov, & Fusco, 2015).

Загалом, механізм імуностимулюючої дії гідроксиду алюмінію та інших ад'ювантів на їх основі добре описаний науковцями (Ho та ін., 2018; Pulendran, Aruna-chalam, & O'Hagan, 2021). Він полягає в утворенні агрегатів задля безперервного вивільнення антигенів, часткових структур, які сприяють фагоцитозу антигенпрезентуючих клітин, а також ініціації локального запалення через інфламасому NLRP3 із подальшою презентацією антигенів (залучення й активація макрофагів зі збільшенням експресії молекул ГКГ II). Активація інфламасоми індукує секрецію зрілого IL-1 β й IL-18 дендритними клітинами, диференціювання клітин Т-хелперів Th2, сприяючи активації В-клітин й подальшому виробленню імуноглобулінів IgG. Однак у цих дослідженнях також окреслені незалежні від NLRP3 шляхи виробництва імуноглобулінів і нефагоцитарний спосіб дії гідроксиду алюмінію.

Хоча ад'юванти на основі солей алюмінію набули широкого використання у вакцинних препаратах, для більшої ефективності потенціювання імунної відповіді необхідно приділити особливу увагу попередженню впливу цього ад'юванта на стабільність антигенної композиції. Загалом, алюмінієвий галун да змогу збільшити титр антитіл проти патологій вірусного або бактеріального характерів, проте алюмінієвий гідроксид вважається генотоксичною речовиною, яка за надлишкової кількості в організмі здатна призводити до погіршення пам'яті, психічних розладів, незворотніх змін, а також хвороб Альцгеймера та Паркінсона. Окрім того, існує ризик підвищення розвитку атеросклерозу та епілепсії (Rivas та ін., 2005).

Групою вчених (Gherardi та ін., 2001) на початку двохтисячних років експериментальним шляхом було підтверджено утворення довгострокових (упродовж десятиліть) локальних відкладень солей алюмінію у місцях ін'єкцій — макрофагальний міофасцит. Спочатку вважалося що депо-ефект є важливим для ад'ювантної активності галуну, але це в подальшому було спростованим завдяки демонстрації їх ад'ювантної дії навіть після виведення депо. Однак на сьогодні будь-який шкідливий патофізіологічний вплив довготривалих відкладень солей алюмінію в тканинах і пов'язаний з ними макрофагальний міофасцит залишається предметом наукових дискусій (Principi, & Esposito, 2018; Duwe, & Niedzwiecki, 2018; Badran та ін., 2022).

Нині раціональний дизайн новітніх безпечних та ефективних вакцин передбачає вибір відповідного ад'юванта з урахуванням очікуваного ефекту, впливу на безпечність та ефективність вакцини, отриманої з його використанням, економічної доступності, а також умов застосування імунопотенціатора, що відповідатиме

бажаному імуногенному потенціалу — виклику доречної імунної відповіді за найменшого ризику для здоров'я людини. При цьому застосування найбільш раціонального та безпечного ад'юванта — важливе для опосередкованої ним індукції імунітету різних типів вакцин, адже навіть якщо компоненти антигену та ад'юванта є безпечно поєднуваними індивідуально, утворена ними суміш може бути неоптимальною, несумісною і впливати на безпечність та ефективність отриманих новітніх протиінфекційних засобів (De Gregorio, & Rappuoli, 2014).

Згідно з доступними для широкого загалу праць, висвітленими у світових наукометричних базах даними, дослідження вчених останніми роками (Ong, Lian, Kawasaki, & Kawai, 2021; Hennessy, & McKernan, 2021; Mu, Dong, & Wang, 2023; Hao та ін., 2020; Mekonnen, Mengist, & Jin, 2022) були зосереджені на задіянні у виробництві новітніх ад'ювантів, імуностимулююча дія яких обумовлена безпосередньою взаємодією рецепторів розпізнавання патернів вроджених клітин імунної системи людини (PRR).

Така увага обумовлена роллю клітин вродженого імунітету у формуванні імунологічної реакції під час зустрічі із збудником захворювання, зокрема здійснення модулюючої функції (сигналів) імунної системи за рахунок організації адаптивної імунної реакції та націленню на специфічні імунні відповіді, що значною мірою доведено для точного налаштування відповідей Т-клітин й продукції антитіл плазматичними клітинами. Наприклад, ад'юванти, націлені на TLR як CpG1018 (TLR9) та MPL, вже включені до складу ліцензованих вакцин разом з кількома іншими: R848, TLR7/8 ліганд, що продемонстрували великі перспективи у стимуляції стійких і тривалих Т- і В-клітинних відповідей. Незважаючи на те, що нове покоління ад'ювантів — багатообіцяюче, механізми їх дії й досі є недостатньо вивченими (Kwissa та ін., 2012).

Відповідно до даних, опублікованих у (Harandi та ін., 2018), найбільш широко використовуваними ад'ювантами наразі є імунопотенціюючі агенти на основі масляно-водної емульсії. Загалом, упродовж більше 70 років, починаючи від першої ліцензії ад'юванта у 1920-х роках, галуни (нерозчинні солі алюмінію) залишаються єдиними ад'ювантами, включеними до складу ліцензованих імунобіологічних препаратів — вакцин проти правця, кашлюку, дифтерії, гепатиту В, а також проти ВПЛ (вірусів папіломи людини). Однак у 1990-х роках до ліцензованого у Європі для дорослих старше 65 років продукту «Fluad» — тривалентної інактивованої вакцини проти сезонного вірусу грипу, вперше було включено ад'ювант MF59 «масло-у-воді».

У дослідженнях (Cid, & Bolívar, 2021) зазначається, що за минулі 20 років лише 4 інші ад'юванти були ліцензовані та, відповідно, включені до складу вакцин, а саме: «AS04» (3-О-дезацил-4'-монофосфорилліпід) — проти ВПЛ «Cervarix» та гепатиту В «Fendrix», «AS03» (полісорбат 80, сквален, DL- α -токоферол) — проти грипу «Pandemrix» та «Arepanrix», «AS01» (монофосфорильований ліпід А, сапонін QS-21) — проти оперізуючого лишая «Shingrix» і малярії «Mosquirix» та імуностимулятор «CpG 1018» (неметильовані цитозин-фосфат-гуанінові олігодезоксинуклеотиди) — проти гепатиту В «Hepelisav-B».

Наразі одним з ад'ювантів масляно-водної емульсії, що набув широкого розповсюдження в експериментальних наукових дослідженнях, є ад'ювант Фрейнда у

повній «IFA» (додатково вміщує вбиті бактеріальні клітини *Mycobacterium tuberculosis* для залучення макрофагів й інших вроджених клітин імунної системи до місця ін'єкції; здебільшого використовують за первинної імунізації) та неповній «CFA» формах. Типова ж композиція «CFA» має у своєму складі 1 мг вбитих бактеріальних клітин (нагріванням) *Mycobacterium tuberculosis* та висушених з 0,85 мл парафіну й 0,15 мл Arlacel® 83 (суміш олеїнової, пальмітинової, стеаринової та лінолевої ефірів з 2-(3,4-дигідрокситетрагідрофураніл)-етиленгліколем) (Malik та ін., 2018).

Використані активні компоненти згаданих вище ад'ювантів обумовлені наявністю *Mycobacterium tuberculosis*, дипептиду, N-ацетилмураміл-L-аланін-D-ізоглутаміну — активує макрофаги й дендритні клітини через домен олігомеризації, що зв'язує нуклеотиди, які містять 2 (NOD2) і скелетні елементи стінки бактеріальної клітини. Варто також зауважити, що «CFA», окрім запалення, викликає агрегацію та преципітацію розчинних білкових агентів з утворенням частинок, які сприяють їх подальшому ефективному поглинанню антигенпрезентуючими клітинами; позитивно впливає на синтез імуноглобулінів IgG (на протипагу синтезу класу IgM) та субпопуляцій Т-хелперів Th1; сприяє реакціям відстроченої гіперчутливості, а також пригнічує індукцію толерантності. Однак за рахунок підтвердженої експериментальними дослідженнями токсичності й наявності ряду побічних реакцій цього ад'юванту, його подальше використання для отримання новітніх вакцин є неприйнятним, на протипагу «IFA», який має меншу токсичність, завдяки чому підходить для клінічного використання (Beirne та ін., 2015; Tadepalli та ін., 2017).

На сьогодні широкого застосування у виробництві вакцинних препаратів набули ад'юванти на основі сквалену «MF59» (наноемульсія типу «масло у воді», містить сквален), «AS03» (містить α -токоферол) та ад'юванти-агоністи TLR рецепторів — «CpG1018» (агоніст TLR4), «AS01b» та «AS04» (TLR5,6,7). Додатково до переліку ліцензованих імунопотенціюючих агентів вакцин необхідно додати ад'юванти, які за своєю хімічною природою є поверхнево-активними речовинами — «Span 85» й «Tween 80». Слід також зазначити, що терпен (сквален) наразі використовується як допоміжний засіб для кількох різних вакцин з антигенами вірусів гепатитів (B і C), а також ВПГ-1 (вірус простого герпесу) (Galson та ін., 2016).

Дія іншого імунологічного ад'юванту на основі сквалену «MF59» асоціюється зі збільшенням активності Т-клітин, зокрема Т-хелперів, і вищою продукцією антитіл класів IgG1 та IgG2a. Також повідомляється, що MF59 здатний індукувати імунні відповіді Th1 клітин в CD8⁺ Т-лімфоцитів (Yang та ін., 2020).

Авторами статті (Clark та ін., 2009) експериментальним шляхом продемонстровано, що ад'ювант «MF59» здатний сприяти сероконверсії й серопротекції вже через 21 добу після введення першої дози вакцини проти вірусу грипу А/Н1N1. Також було виявлено, що застосування цієї вакцини характеризується вищим відсотком серопротекції та сероконверсії через 21 і 42 дні за умови використання ад'юванта. Причому повідомляється лише про помірні й легкі реакції (головний біль) на введення, що здебільшого локалізуються у місці здійснення ін'єкції (синці, біль у м'язах). Однак жодна з цих побічних реакцій не тривала більше 72 годин.

Іншими вченими (Desbien та ін., 2015) було протестовано декілька перспективних формул потенційних ад'ювантів, які вміщують сквален та інші сполуки у своєму складі — емульсія «масло у воді» зі скваленом «GLA-SE» та глюкопіранозилліпідний ад'ювант «GLA». Було показано, що ад'ювант «GLA-SE» здатен індукувати сильну імунну відповідь шляхом передачі сигналів через TLR-4 шлях, IL-18, IFN- γ та каспази, що, у свою чергу, сприяло до відповіді Th1.

Ад'ювант «GLA-SE» використовується у складі вакцин проти туберкульозу, що відзначаються потужною продукцією антитіл з піковою кількістю після другої імунізації та незначними реакціями у легкій формі (втома, загальна слабкість і головний біль) (Coler та ін., 2018).

На сьогодні у світовій практиці було введено понад 20 млн доз вакцин з ад'ювантом «AS03» з результатами оцінки біобезпеки від прийнятих до відмінних (Reed та ін., 2009).

Так, у статті (Wimmers та ін., 2021) описані дослідження вакцини проти вірусу грипу з ад'ювантом на основі сквалену «AS03» на добровольцях. Згідно з результатами досліджень, використання цього ад'юванта спровокувало тривалі модифікації гістонів та епігенетичні зміни в моноцитах до 21-ї доби після вакцинації. Виявлено, що класичні моноцити при цьому зберігають підвищений рівень хроматину антивірусних локусів IRF, включно з ключовими противірусними імунними регуляторами (IRF1, IRF8, RIG-1 (DDX58)) та рядом генів стимульованими інтерферонами. Варто зауважити також й більшу ефективність мононуклеарних клітин периферійної крові (PBMCs) у вакцинованих піддослідних заражених Данге та вірусом Зіка (контролювали «*in vitro*»). Про це свідчать зниження вірусного навантаження після вакцинації культури та кореляція титрів вірусів з рівнями експресії інтерферон-регуляторних факторів (IRF). Тож введення ад'юванта «AS03» до складу вакцини мало позитивний ефект.

Актуальним нині новим агоністом TLR7/8 рецепторів є «3М-052», який здатний індукувати потужні антигенспецифічні імунні відповіді за рахунок клітинних відповідей Т-хелперів Th1 у поєднання з імуноглобулінами та плазматичними клітинами. Проте, незважаючи на наявність доказової бази потужності «3М-052» як вакцинного ад'юванта, механізми його дії й досі залишаються недостатньо дослідженими. Усі наразі існуючі дані щодо вивчення ад'ювантного потенціалу «3М-052» є обмеженими характеристикою периферичної імунної відповіді у крові від ННР. При цьому важливим залишається факт відсутності ґрунтовних даних щодо подій, які відбуваються у лімфатичних вузлах як місцях ініціації імунних відповідей (Arunachalam та ін., 2020).

Загальновідомо, що після первинного щеплення активовані дендритні клітини з локального місця введення ін'єкції мігрують до дренуючих лімфатичних вузлів з метою представлення антигену Т-лімфоцитам й секреції цитокінів, де останні націлені на підтримку диференціації Т- та В-клітин, стимулюючи таким чином імунну відповідь (Liang та ін., 2017). Але, незважаючи на наявні свідчення про доведену потужну активацію вродженої і адаптативної ланок імунітету, дослідження, які б порівнювали імунні відповіді індуковані живими вірусними вакцинами, що можуть викликати стійку продукцію імуноглобулінів, із вакцинами з ад'ювантом «3М-052», — відсутні (Kasturi та ін., 2020).

У (Lee, Wimmers, & Pulendran, 2022; Kasturi та ін., 2020) описано дослідження на лабораторних мишах щодо молекулярного атласу імунітету до ад'ювантних живих та ослаблених вакцин. Для створення комплексної клітинної транскриптомної та епігеномної картин вродженої імунної відповіді у dLN на ранніх і пізніх термінах після імунізації антигеном з ад'ювантами «YF-17D» або «3M-052-Alum» було використано імунофлюоресцентний аналіз (проточну цитометрію), одноклітинне секветування АТАС (scАТАС-seq) та РНК (scRNA-seq). Встановлено індукцію активації й рекрутингу міелоїдних клітин у dLNs зі стійкою гуморальною відповіддю у мишей на 14 і 28-й день після імунізації антигеном плюс «3M-052/Alum», що вказує на високий титр антитіл класів IgG, IgG2c, IgG3. Окрім того, відмічається значне посилення відповіді зародкового центру, Т-фолікулярних хелперних клітин, а також підвищення титру імуноглобулінів після здійснення імунізації 5 мкг «3M-025-Alum» порівняно з використанням галуно окремо як ад'юванта.

Отже, кожен із перерахованих вище синтетичних ад'ювантів та їх систем характеризується різноплановістю негативного впливу з-поміж вже згаданих плюсів від використання. До прикладу емульсійні ад'юванти можуть мати токсичну дію у складі профілактичних вакцин, провокувати виразки та гранульоми (у місці введення), неповне формування імунної відповіді, запальні реакції тощо (Burny, Callegaro, & Clement, 2017). Так, емульсійний ад'ювант «MF59», окрім бажаної імуностимулюючої дії, володіє побічними ефектами у місці ін'єкції, а також може провокувати еритеми й ущільнення (Mori та ін., 2023).

Відповідно до результатів попередньо проведених наукових досліджень на мишах ін'єкції вакциною з ад'ювантом MF59 стимулюють позаклітинне вивільнення АТФ, інгібування якого місцевими ін'єкціями апірази може послаблювати імунну відповідь (Vono та ін., 2013). Відтак імунізація мишей MF59 призводить до некроптозу макрофагів лімфатичних вузлів і стимуляції антиген-специфічних CD8+ Т-клітин (Kim та ін., 2020).

Небажані побічні реакції також притаманні ад'юванту Фрейнда, що включають у себе посилення больових відчуттів у щеплених тварин з потенційними загрозами їх безпеці й здоров'ю. Тому навіть при здійсненні досліджень на тваринах висунуті певні рекомендації щодо використання СФА через обумовлені хворобливі реакції і можливості ушкодження тканин. Варто також зазначити, що ад'ювант Фрейнда володіє токсичними характеристиками для людей через високий вміст відпрацьованих масел — призводять до гранулом, уражень і запалень у місці ін'єкції; не піддаються біологічному розкладанню (Mohan та ін., 2013).

Окремо виділена група солей алюмінію, яка вже давно набула найбільшого розповсюдження як імунопотенціюючий агент у складі вакцин, ще й досі залишається предметом обговорення наукової спільноти. Адже поряд з низькою захисною ефективністю додатково характеризується потенційною токсичністю, можливими алергічними реакціями та здатністю сприяти виникненню автоімунного/запального синдрому (ASIA) (Owen та ін., 2021).

Беручи до уваги усе вищесказане, повною мірою аргументованим є більш детальний розгляд потенційної можливості використання ад'ювантів мікробного походження у складі новітніх вакцин.

Перспективні ад'юванти мікробного походження для створення новітніх вакцин. Нині питанням дослідження, вивчення та застосування ад'ювантів бактеріальної природи у вакцинології присвячено ряд зарубіжних праць. У (Parmaksız, Pekcan, & Şenel, 2023) висвітлено перспективні аспекти створення ад'ювантної системи на основі комбінації нейтральних і катіонних ліпосом з поринами *Salmonella typhi* у формі наночасток з використанням модельного антигену овальбуміну.

Іншими вченими (Lee та ін., 2011) запропоновано ад'ювантний ефект від використання сферичних нанометричних везикул зовнішньої мембрани *Escherichia coli* (OMV) на антигенспецифічний праймінг Т-клітин.

У (Taleghani, Vozorg, & Zamani, 2019) розглянуто можливість застосування MPL-A (монофосфорилліпід А, виділений з генетично сконструйованого штаму *Salmonella minnesota* R595) — перший ліганд TLR, що був схвалений для використання як ад'ювант при створенні вакцин для людини.

Широко відомим ад'ювантом мікробного походження є ад'ювант бактеріальної природи — флагелін, що являє собою структурний білок джгутиків грамнегативних бактерій; складається із 494 амінокислот. Більшість білкових молекул флагелінів, після потрапляння в організм людини, залишаються у джгутиках бактерій, проте деякі з них все ж таки вивільнюються у середовище, даючи змогу імунній системі бути розпізнаними (Hajam, Dar, & Lee, 2017).

Як показують дослідження (Murthy, Deb, & Salzman, 2004) гіперконсервативні N і C кінці флагеліну можуть розпізнаватись молекулами Toll-рецепторів імунних клітин та в діапазоні 1...10 нМ і викликати максимальну інтенсивність сигналізації розпізнаним рецептором. Зокрема, йдеться про рецептор TLR-5, який експресується на макрофагах, лімфоцитах і дендритних клітинах.

Саме ж розпізнавання рецептора TLR-5 за використання флагеліну призводить до передачі сигналу двома шляхами — MyD88-залежним та MyD88-незалежним, які, у свою чергу, обумовлюють індукцію факторів транскрипції NF- κ B, IRF3 й AP-1, що призводить до продукції хемокінів й цитокінів — направляють (приваблюють) ДК, а також Т- та В-лімфоцити до лімфатичних вузлів. Тут варто зауважити, що флагелін може сприяти сильній антиген-специфічній Т-клітинній (CD4⁺) відповіді за рахунок взаємодії з рецепторами TLR-5 на CD11c⁺ клітинах. Як результат, високий титр імуноглобулінів, який демонструє потенціал ад'ювантної активності флагеліну (Bates, Uematsu, & Mizel, 2009).

Детальний опис суті проявлення ад'ювантних властивостей флагеліну описаний у (Huleatt, Nakaar, & Powell, 2008), де автори зазначають, що флагелін у вакцинних препаратах використовують шляхом спільного введення з основним антигеном, а також через злиті білки, одержані завдяки додаванню епітопів, пов'язаних з молекулою флагеліну. Доведено, що фізичне зв'язування антигенів імунобіологічних препаратів створює більш потужну вакцину, ніж звичайне змішування флагеліну з антигеном. Нині вже також визначено, у які саме ділянки молекули флагеліну необхідно вставити епітопи задля максимізації титру антитіл. Однак остаточно висновки досліджень з цього питання наразі поки відсутні.

Авторам статті (Song, Zhang, & Paessler, 2009) вдалось одержати оптимальні титри утворених антитіл шляхом введення в гіперваріабельну ділянку флагеліну епітопу гемаглютиніну (HA). L. Song з колегами розробили підхід зв'язування аго-

ністів TLR-5 та флагеліну з самодостатньою захисною субодиноцею НА (глобулярною голівкою). Таке практичне рішення є вельми доречним, адже домен глобулярної голівки охоплює більшість нейтралізуючих епітопів НА та в контексті злитого білка флагеліну стабільно повторно згортається для точного формування цих конформаційно чутливих епітопів. Ці злиті білки — імунологічно потужні вакцини, що можуть бути експресовані у стандартних системах прокаріотичної ферментації, якими є *Escherichia coli*). За результатами здійснених досліджень встановлено, що тестована вакцинна R3 конфігурація (обидва кінця глобулярної голівки НА прив'язані до флагеліну) з-поміж декількох вакцин підтипу H5 (на основі вірусу грипу A/Vietnam/1203/2004 (VN04)), у якій домен D3 флагеліну замінено глобулярною голівкою НА, є найбільш ефективною для виявлення захисних титрів НАІ та захисту лабораторних мишей від захворювання й пов'язаних з ним летальних наслідків.

Як показують дослідження (Delaney, Phipps, & Mizel, 2010), вставка у гіперваріабельну ділянку епітопу L1R обумовлює продукцію імуноглобулінів, а за умови вставки у N-кінець флагеліну — утворення антитіл, здатних взаємодіяти з нативним L1R.

У праці (Lin та ін., 2016) продемонстровано, що вставка епітопів до іншого кінця білка (C-кінця) індукує передачу сигналів через NLRC4 і NAIK5. Результат — CD8⁺ Т-клітинні відповіді проти пухлинних клітин. Така експериментально продемонстрована різниця шляхів відповідей імунної системи свідчить про універсальність флагеліну як допоміжного засобу різної цільової направленості залежно від обраної області введення антигену. Проте для повного розкриття потенціалу використання ад'ювантних властивостей флагеліну необхідним є здійснення подальших фундаментальних наукових досліджень.

Варто також відмітити позитивні аспекти використання фрагментів джгутиків бактеріальних клітин, а саме: ефективність за низького дозування, відсутність токсичності пов'язаної з інтраназальним введенням на тваринних моделях та синтезу IgE.

У (Treanor, Taylor, & Shaw, 2010) підтверджується безпечність застосування ад'ювантних властивостей злитих білків флагеліну в досліджуваних вакцинах проти грипу А H1N1. Згідно з отриманими результатами, стабілізація всіх без винятку наявних побічних ефектів в одних дослідницьких групах відтворюється після 4 діб відпочинку; в інших — після прийому нестероїдних протизапальних засобів.

До перспективних ад'ювантів мікробного походження з точки зору науки та імунобіотехнологій нині також відносять везикули зовнішньої мембрани (OMV) отримані з використанням грамнегативних бактерій (*Escherichia coli*). OMV є сферичними протеоліпосомами (нанометричні везикули), що утворюються виступами на зовнішній мембрані та містять фактори вірулентності різної хімічної будови (білки, пептидоглікани, ліпополісахариди, екзотоксини, ДНК, РНК); являють собою новий підхід до розробки вакцин завдяки їх запальному потенціалу й стимуляції вродженої та адаптативної ланок імунітету. Оскільки бактеріальні везикули BMV (зовнішньої мембрани, позаклітинні) несуть велику кількість антигенних матеріалів і мають здатність індукувати імунну відповідь «*in vivo*», на сьогодні їх

одержують у значних кількостях з бактерій як дикого типу, так і з генномодифікованих. Зокрема, розповсюдженою наразі є розроблена система клонування на основі *Escherichia coli* та похідних OMV, злитих з ліпопротеїном I зовнішньої мембрани (OprI) *P. aeruginosa*. На практиці ця система виявила імуногенність стимулюванням дендритних клітин/макрофагів, демонструючи потенційну ад'ювантність (Daleke-Schermerhorn, Felix, & Luirink, 2014).

Як потужна й універсальна вакцинна платформа, бактеріальні везикули стимулюють CD4⁺ Т-клітинну і В-клітинну відповіді за рахунок розпізнавання молекул, зокрема ліпополісахаридів (LPS) на мембранах молекулами TLR та системою комплементу, що призводить до залучення АПК клітин. Така спільна стимуляція молекулами OMV є більш потужною за самостійну виключно за рахунок задіяння LPS. При цьому бактеріальні мембранні везикули не тільки індукують дозрівання дендритних клітин з метою посилення захоплення молекул антигену з подальшою його презентацією (зادля розвитку адаптативної відповіді), але й також активують В-клітини для виробництва різних класів імуноглобулінів (IgA, IgM, IgG) (Zingl, Leitner, & Schild, 2020).

Загалом, усі локальні різновиди бактеріальних везикул привабливі для розробки вакцинних препаратів завдяки здатності презентувати білки варіабельних розмірів (50...200 нм) з різних джерел, які можуть бути легко захоплені імунними клітинами (призводить до підвищення ефективності обробки і доставки антигену), а й також природній присутності патоген-асоційованих молекулярних патернів (PAMP) для виклику сильних імунних відповідей (Krishnan, Kubiawicz, & Zhang, 2022).

Вищезазначені впливи бактеріальних везикул на імунну систему детально описані в наукових працях (Vader та ін., 2016; Elsharkasy, Nordin, & Vader, 2020; Buschmann, Mussack, & Byrd, 2021), де також підкреслюється їх ад'ювантна здатність до індукції пролонгованих імунних відповідей (клітинних і гуморальних) у складі розроблюваних вакцин.

Дані властивості можна пояснити більш високою щільністю PAMP на BMV. Окрім того, завдяки біогенезу BMV — мають широкий спектр бактеріальних мембранних антигенів, що можуть служити основними мішенями для вакцин (Mehanny, Lehr, & Fuhrmann, 2021).

На сьогодні вже існує ряд експериментальних даних щодо застосування бактеріальних везикул в імунобіотехнологіях (Masfortol, Gil, & González, 2017). Деякі види вакцин з ад'ювантами OMV вже почали переходити на стадію клінічних випробувань завдяки попередньо продемонстрованій ними безпеці та ефективності: вакцини проти грипу, алергенів (фаза I клінічних випробувань) та *Shigella flexneri* (фаза I і II клінічних випробувань) (Martíñon, Cisneros, Calderón-Vargas, 2019). Зазначені вакцини вводились інтраназально й стимулювали вироблення імуноглобулінів лише з незначними побічними ефектами (імуностимулюючі білки та LPS з OMV не реплікуються — підвищує їх безпеку), що додатково підкреслюють потенціал ад'ювантних властивостей бактеріальних везикул (Daleke-Schermerhorn, Felix, & Luirink, 2014).

У (Afrough, Karam, & Siadat, 2020) розроблено вакцину-кандидата на основі злиття PorA серогруп A, B (*N. Meningitidis*) та OMV із тестом на лабораторних

тваринах та контролі на порівнянні ефективностей OMV з іншими широко розповсюдженими ад'ювантами. У ході експериментальних досліджень здійснювали вакцинавання (підшкірно) лабораторних мишей ін'єкцією із сумішами білків PrgA, OMV і ад'ювантом Фрейнда. Після чого проводили аналіз бактерицидної активності сироватки (SBA), а імунні відповіді вимірювали методом ELISA. Отримані результати засвідчують значно вищий титр антитіл у групах мишей вакцинованих із використанням OMV порівняно з вакцинаванням з ад'ювантом Фрейнда. При цьому рекомбінантний білок PrgA плюс ад'ювант OMV були здатні індукувати відповіді антибактеріальних антитіл проти серогруп А і В у модельних мишах BALB/c.

Іншими науковцями (Gan, Li, & Ding, 2021) було запропоновано використання EV, отриманих з грампозитивних бактерій, а також OMV грамнегативних бактерій — *Bacillus anthracis*, *Enterococcus faecium*, *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus pneumoniae*, як системи доставки у боротьбі з інфекціями бактеріальних збудників. Проте застосування EV і OMV як ад'ювантів бактеріальної природи має свої недоліки через складність підтримання мембрани за рахунок відносної крихкості структури MB, що може вплинути на їх поглинання антигенпрезентуючими клітинами. Для вирішення даної проблеми автори статті пропонують використовувати покриття MVs на наночастинки для збільшення стабільності «*in vivo*» та часу циркуляції.

Нині OMV вже було включено до ліцензованої багатокомпонентної рекомбінантної менингококової вакцини 4CMenB «Bexsero» (широко використовується у багатьох країнах світу) (Acevedo, Fernández, & Perez, 2014). Тут слід підкреслити також виявлені перехресні здатності вакцини «Bexsero» та «MeNZB» OMV, описані австралійськими вченими.

Згідно з проведеними у праці (Semchenko, Tan, & Seib, 2019) дослідженнями оцінки утворення антитіл (імуноферментний аналіз) було встановлено, що антитіла проти гонококів, індуковані MeNZB-подібними білками OMV, можуть пояснити попередні спостереження щодо зниження захворюваності на гонорею після вакцинації MeNZB. При цьому високий рівень людських антигонококових антитіл NHBA, що утворюються під час вакцинації «Bexsero», забезпечує додатковий перехресний захист від захворювання на гонорею. Наукові пояснення причинно-наслідкового зв'язку перехресного впливу від вакцинації досі з'ясовуються.

Зазначені результати добре корелюються з думкою науковців з Нової Зеландії (Petousis-Harris, & Radcliff, 2019) щодо потенційного впливу вакцини проти менингококової інфекції з OMV ад'ювантом (MeNZB) на перехресний захист від гонореї, посиляючись у своїй гіпотезі на проаналізовані екологічні спостереження за статистикою зареєстрованих захворювань.

Узагальнюючи інформацію з проаналізованих наукових публікацій щодо плюсів і мінусів використання ад'ювантів мікробного походження, можна стверджувати, що ад'юванти OMVs потребують більш раціонального дизайну для виклику оптимальної імунної відповіді. Наявна надмірна кількість ендотоксинів у складі OMV обумовлює потребу у здійсненні їх постійного контролю. Важливим також є те, що OMV у поєднанні з деякими агоністами TLR здатні до виклику неконтрольованої імунної відповіді — фактора надмірного запалення (Gnoro, Watkins, & Putnam, 2017).

До мінусів застосування ліпополісахаридів як імунопотенціюючих агентів можна віднести їх токсичність, що досить ускладнює переклад використання LPS-ад'ювантів на клінічний сценарій разом із проблемами стабільності, а отже, виробництва та забезпечення якості (Facchini та ін., 2021).

Висновки

У запропонованому огляді розглянуто проблематику отримання новітніх вакцин проти ВПГ-2, що обумовлено різкою потребою в цьому імунобіологічному препараті для працездатного населення України. Окреслені сучасні та актуальні ад'юванти у межах механізмів індукції безпечної імунної відповіді (з урахуванням природи патогену), методів їх одержання й наукових досліджень щодо можливості застосування у складі вакцин.

Науково обґрунтованим нині залишається використання імунопотенціюючих агентів синтетичного походження — солей алюмінію, ад'юванта Фрейнда «IFA» та «CFA» (додатково вміщує вбиті бактеріальні клітини *Mycobacterium tuberculosis*), ад'ювантів на основі сквалену («MF59»), наноемульсій типу «масло у воді» «AS03» (додатково вміщує α -токоферол), а також ад'ювантів на основі ПАР («Span 85», «Tween»).

Позаяк наразі з'являється все більше наукових досліджень щодо доцільності застосування ад'ювантів мікробного походження на кшталт сферичних нанометричних везикул зовнішньої мембрани *Escherichia coli* (OMV), ад'ювантної системи на основі комбінації ліпосом (нейтральні й катіонні) з поринами *Salmonella typhi* у формі наночасток з використанням модельного антигену овальбуміну, MPL-A з генетично сконструйованого штаму *Salmonella minnesota* R595, а також структурного білка джгутиків грамнегативних бактерій — флагеліну.

З'ясовано, що все більшої актуальності досягає застосування агоністів TLR рецепторів, зокрема «CpG1018» (агоніст TLR4), «AS01b» й «AS04» (TLR5,6,7), адже ці ад'юванти здатні ініціювати стійкі Т- і В-клітинні відповіді.

Показовим є відсутність аналізу жодного вітчизняного наукового видання з питань підбору нових ефективних ті безпечних ад'ювантів різного походження. Першочергово це пов'язано з недостатньою кількістю праць вітчизняних українських досліджень за відповідною тематикою.

Усі ці фактори засвідчують необхідність докладання спільних зусиль наукової спільноти, економічних впливань і сприяння розвитку науки на рівні влади для сучасного розвитку біотехнології в Україні, що є особливо актуальним, беручи до уваги світову пандемію Covid-19 та приведені статистичні дані щодо поширеності захворювань на ВПГ-2.

Недостатнє використання вакцинних препаратів в Україні, із соціальної точки зору, є жертвою власного успіху самої вакцинації, що призвело до відсутності здорової оцінки ситуації населенням, серйозності хвороб, тяжкості яких можна запобігти методом своєчасної імунізації. Саме тому абсолютно всі наявні програми вакцинації у світі потребують визнання цінності, економічних вкладень, розширення «Календаря обов'язкових щеплень», а також розробки вакцин нового покоління з новітніми ад'ювантами й можливим перехресним захистом задля реалізації їх потенціалу повною мірою.

Література

- Karch, C. P., & Burkhard, P. (2016). Vaccine technologies: From whole organisms to rationally designed protein assemblies. *Biochemical pharmacology*, 120, 1—14. <https://doi.org/10.1016/j.bcp.2016.05.001>.
- Stanfield, B. A., Kousoulas, K. G., Fernandez, A., & Gershburg, E. (2021). Rational Design of Live-Attenuated Vaccines against Herpes Simplex Viruses. *Viruses*, 13(8), 1637. <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-4038-2>.
- Alareeki, A., Osman, A. M., Khandakji, M. N., Looker, K. J., ..., & Abu-Raddad, L. J. (2023). Epidemiology of herpes simplex virus type 2 in Europe: systematic review, meta-analyses, and meta-regressions. *The Lancet Regional Health-Europe*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.lanep.2022.100558>.
- O'Rourke, B., Oortwijn, W., & Schuller, T. (2020). The new definition of health technology assessment: A milestone in international collaboration. *International journal of technology assessment in health care*, 36(3), 187—190. <https://doi.org/10.1017/S0266462320000215>.
- Sampath, P. G. (2021). Market Shaping and Market Access in the Global Vaccines Market: *Approaches for the Future*. German International Agency (GIZ), (1), 3—21. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3945668>.
- Gennet, É., Mahalatchimy, A., Frischhut, M., Lau, P. L., ..., & Hawrot, T. (2022). *Health as a fundamental value*. Towards an inclusive and equitable pharmaceutical strategy for the European Union (Doctoral dissertation, European Health Policy Platform of the European Commission). <https://doi.org/10.1019/ST263452320000215>.
- Shah, R. R., Hassett, K. J., & Brito, L. A. (2017). Overview of vaccine adjuvants: introduction, history, and current status. *Vaccine Adjuvants: Methods and Protocols*, 1—13. <https://doi.org/10.1080/08998280.2005.11928028>.
- Mohan, T., Verma, P., & Rao, D. N. (2013). Novel adjuvants & delivery vehicles for vaccines development: a road ahead. *The Indian journal of medical research*, 138(5), 779. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2005.111211>.
- Facciola, A., Visalli, G., Laganà, A., & Di Pietro, A. (2022). An overview of vaccine adjuvants: current evidence and future perspectives. *Vaccines*, 10(5), 819. <https://doi.org/10.3390/vaccines10050819>.
- Вакцинація дорослих: що важливо знати під час війни. Поради щодо ефективного захисту від небезпечних хвороб.* (2023). Взято з <https://www.unicef.org/ukraine/stories/vaccination-for-grown-ups-during-war>.
- Calabro, G. E., Carini, E., Tognetto, A., Giacchetta, I., ..., & De Waure, C. (2022). The value (s) of vaccination: building the scientific evidence according to a value-based healthcare approach. *Frontiers in Public Health*, 10, 786662. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.786662>.
- Смілянська, М., Волянський, А., Дідоренко, Т., & Карлова, Т. (2024). Перспективи персоналіфікованої імунопрофілактики в Україні. *Scientific Collection «InterConf»*, (200), 169—173. <https://archive.interconf.center/index.php/conference-proceeding/article/view/6203>
- Watanabe, A. H., Veettil, S. K., Le, L. M., Bald, E., ..., & Chaiyakunapruk, N. (2023). Clinical and Economic Implications of Increasing Access to Herpes Zoster Vaccination Rate in Community Pharmacies. *Journal of the American Pharmacists Association*. <https://doi.org/10.1016/j.japh.2023.05.012>.
- O'Rourke, B., Oortwijn, W., & Schuller, T. (2020). The new definition of health technology assessment: A milestone in international collaboration. *International journal of technology assessment in health care*, 36(3), 187—190. <https://doi.org/10.1017/S0266462320000215>.
- Сенюта, І., Терешко, Х. *Вакцинація у запитаннях і відповідях: метод рекомендації. Національна асоціація адвокатів України, Комітет медичного права і фармацевтичного права та біоетики.* (2023). Вилучено з https://unba.org.ua/assets/uploads/77b7b540396ed691df9b_file.pdf.
- Щеплення, вакцини, профілактика інфекційних захворювань у дорослих.* (2023). Вилучено з <https://zdorovoepokolenie.dp.ua/uk/doroslym/vaktsynatsiia-shchepлення>.
- Beirne, P. V., Hennessy, S., Cadogan, S. L., Shiely, F., ..., & MacLeod, F. (2015). Needle size for vaccination procedures in children and adolescents. *Cochrane database of systematic reviews*, (6), 32—37. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD010720.pub2>.

Ong, G. H., Lian, B. S. X., Kawasaki, T., & Kawai, T. (2021). Exploration of pattern recognition receptor agonists as candidate adjuvants. *Frontiers in cellular and infection microbiology*, 968. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2021.745016>.

Zhao, T., Cai, Y., Jiang, Y., He, X., Wei, Y., Yu, Y., & Tian, X. (2023). Vaccine adjuvants: Mechanisms and platforms. *Signal transduction and targeted therapy*, 8(1), 283. <https://doi.org/10.1038/s41392-023-01557-7>.

Apostolico, J. D. S., Lunardelli, V. A. S., Coirada, F. C., Boscardin, S. B., & Rosa, D. S. (2016). Adjuvants: classification, modus operandi, and licensing. *Journal of immunology research*. <https://doi.org/10.1155/2016/1459394>.

Vanderslott, S., & Marks, T. (2021). Charting mandatory childhood vaccination policies worldwide. *Vaccine*, 39(30), 4054—4062. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2021.04.065>.

Malik, A., Gupta, M., Gupta, V., Gogoi, H., & Bhatnagar, R. (2018). Novel application of trimethyl chitosan as an adjuvant in vaccine delivery. *International Journal of Nanomedicine*, 7959—7970. <https://doi.org/10.2147/IJN.S165876>.

Brito, L. A., Malyala, P., & O'Hagan, D. T. (2013). Vaccine adjuvant formulations: A pharmaceutical perspective. In *Seminars in immunology* 25(2), 130—145. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.smim.2013.05.007>.

Pulendran, B. (2021). S Arunachalam P, O'Hagan DT. Emerging concepts in the science of vaccine adjuvants. *Nat Rev Drug Discov*, 20(6), 454—475. <https://doi.org/10.1038/s41573-021-00163-y>.

Гулянич, М., Недосеков, В., & Годовський, О. (2017). Ефективність вакцини, інактивованої проти інфекційного ринотрахеїту ВРХ. *Тваринництво України*, (3—4), 36—39. <https://doi.org/10.1080/08998882.2005.11238065>.

Powell, B. S., Andrianov, A. K., & Fusco, P. C. (2015). Polyionic vaccine adjuvants: another look at aluminum salts and polyelectrolytes. *Clinical and experimental vaccine research*, 4(1), 23—45. <https://doi.org/10.7774/cevr.2015.4.1.23>.

Ho, N. I., Huis in't Veld, L. G., Raaijmakers, T. K., & Adema, G. J. (2018). Adjuvants enhancing cross-presentation by dendritic cells: the key to more effective vaccines? *Frontiers in immunology*, 9, 2874. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2018.02874>.

Pulendran, B. S., Arunachalam, P., & O'Hagan, D. T. (2021). Emerging concepts in the science of vaccine adjuvants. *Nature Reviews Drug Discovery*, 20(6), 454—475. <https://doi.org/10.1038/s41573-021-00163-y>.

Rivas, E., Gómez-Arnáiz, M., Ricoy, J. R., Mateos, F., ..., & Cabello, A. (2005). Macrophagic myofasciitis in childhood: a controversial entity. *Pediatric neurology*, 33(5), 350—356. <https://doi.org/10.1016/j.pediatrneurol.2005.05.024>.

Gherardi, R. K., Coquet, M., Cherin, P., Belec, L., ..., & Authier, F. J. (2001). Macrophagic myofasciitis lesions assess long-term persistence of vaccine-derived aluminium hydroxide in muscle. *Brain*, 124(9), 1821—1831. <https://doi.org/10.1093/brain/124.9.1821>.

Principi, N., & Esposito, S. (2018). Aluminum in vaccines: Does it create a safety problem? *Vaccine*, 36(39), 5825—5831. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2018.08.036>.

Duwe, A., & Niedzwiecki, A. (2018). Aluminum toxicity in Alzheimer's disease, breast cancer and vaccine adjuvants. *Journal of Cellular Medicine and Natural Health*, 1—8. <https://jcmnh.org/2018/07/13/aluminum-toxicity-in-alzheimers-disease-breast-cancer-and-vaccine-adjuvants/>

Badran, G., Angrand, L., Masson, J. D., Crépeaux, G., & David, M. O. (2022). Physico-chemical properties of aluminum adjuvants in vaccines: Implications for toxicological evaluation. *Vaccine*, 40(33), 4881—4888. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2022.06.064>.

De Gregorio, E., & Rappuoli, R. (2014). From empiricism to rational design: a personal perspective of the evolution of vaccine development. *Nature Reviews Immunology*, 14(7), 505—514. <https://doi.org/10.1038/nri3694>.

Ong, G. H., Lian, B. S. X., Kawasaki, T., & Kawai, T. (2021). Exploration of pattern recognition receptor agonists as candidate adjuvants. *Frontiers in cellular and infection microbiology*, 11, 745016. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2021.745016>.

Hennessy, C., & McKernan, D. P. (2021). Anti-viral pattern recognition receptors as therapeutic targets. *Cells*, 10(9), 2258. <https://doi.org/10.3390/cells10092258>.

Mu, R., Dong, L., & Wang, C. (2023). Carbohydrates as putative pattern recognition receptor agonists in vaccine development. *Trends in Immunology*. <https://doi.org/10.1016/j.it.2023.08.006>.

Hao, L., Wu, Y., Zhang, Y., Zhou, Z., Lei, Q., Ullah, N., ..., & Fan, X. (2020). Combinational PRR agonists in liposomal adjuvant enhances immunogenicity and protective efficacy in a tuberculosis subunit vaccine. *Frontiers in immunology*, 11, 575504. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2020.575504>.

Mekonnen, D., Mengist, H. M., & Jin, T. (2022). SARS-CoV-2 subunit vaccine adjuvants and their signaling pathways. *Expert Review of Vaccines*, 21(1), 69—81. <https://doi.org/10.1080/14760584.2021.1991794>.

Kwissa, M., Nakaya, H. I., Oluoch, H., & Pulendran, B. (2012). Distinct TLR adjuvants differentially stimulate systemic and local innate immune responses in nonhuman primates. *Blood*. *The Journal of the American Society of Hematology*, 119(9), 2044—2055. <https://doi.org/10.1182/blood-2011-10-388579>.

Harandi, A. M. (2018). Systems analysis of human vaccine adjuvants. *In Seminars in immunology*, 39, 30—34. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.smim.2018.08.001>.

Cid, R., & Bolívar, J. (2021). Platforms for production of protein-based vaccines: From classical to next-generation strategies. *Biomolecules*, 11(8), 1072. <https://doi.org/10.3390/biom11081072>.

Malik, A., Gupta, M., Gupta, V., Gogoi, H., & Bhatnagar, R. (2018). Novel application of trimethyl chitosan as an adjuvant in vaccine delivery. *International Journal of Nanomedicine*, 7959—7970. <https://doi.org/10.2147/IJN.S165876>.

Beirne, P. V., Hennessy, S., Cadogan, S. L., Shiely, F., ..., & MacLeod, F. (2015). Needle size for vaccination procedures in children and adolescents. *Cochrane database of systematic reviews*, (6), 32—37. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD010720.pub2>.

Tadepalli, G., Konduru, B., Murali, H. S., & Batra, H. V. (2017). Intraperitoneal administration of a novel chimeric immunogen (rOP) elicits IFN- γ and IL-12p70 protective immune response in BALB/c mice against virulent Brucella. *Immunology Letters*, 192, 79—87. <https://doi.org/10.1016/j.imlet.2017.10.013>.

Galson, J. D., Trück, J., ..., & Kelly, D. F. Van der Most. (2016). Investigating the effect of AS03 adjuvant on the plasma cell repertoire following pH1N1 influenza vaccination. *Sci Rep*, 6, 37229. <https://doi.org/10.1038/srep37229>.

Yang, J., Zhang, J., Han, T., Liu, C., ..., & Yang, X. (2020). Effectiveness, immunogenicity, and safety of influenza vaccines with MF59 adjuvant in healthy people of different age groups: A systematic review and meta-analysis. *Medicine*, 99(7). <https://doi.org/10.1097/MD.0000000000019095>.

Clark, T. W., Pareek, M., Hoschler, K., Dillon, H., ..., & Stephenson, I. (2009). Trial of 2009 influenza A (H1N1) monovalent MF59-adjuvanted vaccine. *New England Journal of Medicine*, 361(25), 2424—2435. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa0907650>.

Desbien, A. L., Reed, S. J., Bailor, H. R., Cauwelaert, N. D., ..., & Duthie, M. S. (2015). Squalene emulsion potentiates the adjuvant activity of the TLR4 agonist, GLA, via inflammatory caspases, IL-18, and IFN- γ . *European journal of immunology*, 45(2), 407—417. <https://doi.org/10.1002/eji.201444543>.

Coler, R. N., Day, T. A., Ellis, R., Piazza, F. M., ..., & TBVPX-113 Study Team. (2018). The TLR-4 agonist adjuvant, GLA-SE, improves magnitude and quality of immune responses elicited by the ID93 tuberculosis vaccine: first-in-human trial. *npj Vaccines*, 3(1), 34. <https://doi.org/10.1038/s41541-018-0057-5>.

Reed, S. G., Bertholet, S., Coler, R. N., ..., & Friede, M. (2009). New horizons in adjuvants for vaccine development. *Trends in immunology*, 30(1), 23—32. <https://doi.org/10.1016/j.it.2008.09.006>.

Wimmers, F., Donato, M., Kuo, A., Ashuach, T., ..., & Pulendran, B. (2021). The single-cell epigenomic and transcriptional landscape of immunity to influenza vaccination. *Cell*, 184(15), 3915—3935. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2021.05.039>.

Arunachalam, P. S., Charles, T. P., Joag, V., Bollimpelli, V. S., ..., & Pulendran, B. (2020). T cell-inducing vaccine durably prevents mucosal SHIV infection even with lower neutralizing antibody titers. *Nature medicine*, 26(6), 932—940. <https://doi.org/10.1038/s41591-020-0858-8>.

Liang, F., Lindgren, G., Sandgren, K. J., Thompson, E. A., ..., & Loré, K. (2017). Vaccine priming is restricted to draining lymph nodes and controlled by adjuvant-mediated antigen uptake. *Science translational medicine*, 9(393), eaal2094. <https://doi.org/10.1126/scitranslmed.aal2094>.

Kasturi, S. P., Rasheed, M. A. U., Havenar-Daughton, C., Pham, M., ..., & Pulendran, B. (2020). 3M-052, a synthetic TLR-7/8 agonist, induces durable HIV-1 envelope-specific plasma cells and humoral immunity in nonhuman primates. *Science immunology*, 5(48), eabb1025. <https://doi.org/10.1126/sciimmunol.abb1025>.

Burny, W., Callegaro, A., Bechtold, V., Clement, F., ..., & ECR-002 Study Group. (2017). Different adjuvants induce common innate pathways that are associated with enhanced adaptive responses against a model antigen in humans. *Frontiers in immunology*, 8, 943. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2017.00943>.

Moni, S. S., Abdelwahab, S. I., Jabeen, A., Elmobark, M. E., Aqaili, D., Ghoal, G., ..., & Mohammad Alowayni, A. M. H. (2023). Advancements in Vaccine Adjuvants: The Journey from Alum to Nano Formulations. *Vaccines*, 11(11), 1704. <https://doi.org/10.3390/vaccines11111704>.

Vono, M., Taccone, M., Caccin, P., Gallotta, M., ..., & Seubert, A. (2013). The adjuvant MF59 induces ATP release from muscle that potentiates response to vaccination. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(52), 21095—21100. <https://doi.org/10.1073/pnas.1319784110>.

wen, A. M., Fults, J. B., Patil, N. K., Hernandez, A., & Bohannon, J. K. (2021). TLR agonists as mediators of trained immunity: mechanistic insight and immunotherapeutic potential to combat infection. *Frontiers in Immunology*, 11, 622614. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2020.622614>.

Lee, A., Scott, M. K., Wimmers, F., Arunachalam, P. S., ..., & Pulendran, B. (2022). A molecular atlas of innate immunity to adjuvanted and live attenuated vaccines, in mice. *Nature communications*, 13(1), 549. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28197-9>.

Parmaksız, S., Pekcan, M., Özkul, A., Türkmen, E., ..., & Şenel, S. (2023). In vivo evaluation of new adjuvant systems based on combination of Salmonella Typhi porins with particulate systems: Liposomes versus polymeric particles. *International Journal of Pharmaceutics*, 648, 123568. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2023.123568>.

Lee, D. H., Kim, S. H., Kang, W., Choi, Y. S., ..., & Shin, E. C. (2011). Adjuvant effect of bacterial outer membrane vesicles with penta-acylated lipopolysaccharide on antigen-specific T cell priming. *Vaccine*, 29(46), 8293—8301. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2011.08.102>.

Taleghani, N., Bozorg, A., Azimi, A., & Zamani, H. (2019). Immunogenicity of HPV and HBV vaccines: adjuvanticity of synthetic analogs of monophosphoryl lipid A combined with aluminum hydroxide. *Apmis*, 127(3), 150—157. <https://doi.org/10.1111/apm.12927>.

Hajam, I. A., Dar, P. A., Shah Nawaz, I., Jaume, J. C., & Lee, J. H. (2017). Bacterial flagellin-a potent immunomodulatory agent. *Experimental & molecular medicine*, 49(9), e373-e373. <https://doi.org/10.1038/emm.2017.172>.

Murthy, K. G., Deb, A., Goonesekera, S., Szabó, C., & Salzman, A. L. (2004). Identification of conserved domains in Salmonella muenchen flagellin that are essential for its ability to activate TLR5 and to induce an inflammatory response in vitro. *Journal of Biological Chemistry*, 279(7), 5667—5675. <https://doi.org/10.1074/jbc.M307759200>.

Bates, J. T., Uematsu, S., Akira, S., & Mizel, S. B. (2009). Direct stimulation of *tlr5*^{+/+} CD11c⁺ cells is necessary for the adjuvant activity of flagellin. *The Journal of Immunology*, 182(12), 7539—7547. <https://doi.org/10.4049/jimmunol.0804225>.

Huleatt, J. W., Nakaar, V., Desai, P., Huang, Y., ..., & Powell, T. J. (2008). Potent immunogenicity and efficacy of a universal influenza vaccine candidate comprising a recombinant fusion protein linking influenza M2e to the TLR5 ligand flagellin. *Vaccine*, 26(2), 201—214. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2007.10.062>.

Song, L., Zhang, Y., Yun, N. E., Poussard, A. L., ..., & Paessler, S. (2009). Superior efficacy of a recombinant flagellin: H5N1 HA globular head vaccine is determined by the placement of the globular head within flagellin. *Vaccine*, 27(42), 5875—5884. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2009.07.060>.

Delaney, K. N., Phipps, J. P., Johnson, J. B., & Mizel, S. B. (2010). A recombinant flagellin-poxvirus fusion protein vaccine elicits complement-dependent protection against respiratory challenge with vaccinia virus in mice. *Viral immunology*, 23(2), 201—210. <https://doi.org/10.1089/vim.2009.0107>.

Lin, K. H., Chang, L. S., Tian, C. Y., Yeh, Y. C., ..., & Leng, C. H. (2016). Carboxyl-terminal fusion of E7 into Flagellin shifts TLR5 activation to NLRC4/NAIP5 activation and induces TLR5-independent anti-tumor immunity. *Scientific reports*, 6(1), 24199. <https://doi.org/10.1038/srep24199>.

Treanor, J. J., Taylor, D. N., Tussey, L., Hay, C., ..., & Shaw, A. (2010). Safety and immunogenicity of a recombinant hemagglutinin influenza-flagellin fusion vaccine (VAX125) in healthy young adults. *Vaccine*, 28(52), 8268—8274. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2010.10.009>.

Daleke-Schermerhorn, M. H., Felix, T., Soprova, Z., ten Hagen-Jongman, C. M., ..., & Luirink, J. (2014). Decoration of outer membrane vesicles with multiple antigens by using an autotransporter approach. *Applied and environmental microbiology*, 80(18), 5854—5865. <https://doi.org/10.1128/AEM.01941-14>.

Zingl, F. G., Leitner, D. R., & Schild, S. (2020). Biogenesis of Gram-Negative OMVs. *Bacterial membrane vesicles: Biogenesis, functions and applications*, 23—46.

Krishnan, N., Kubiawicz, L. J., Holay, M., Zhou, J., ..., & Zhang, L. (2022). Bacterial membrane vesicles for vaccine applications. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 185, 114294. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2022.114294>.

Vader, P., Mol, E. A., Pasterkamp, G., ..., & Schifflers, R. M. (2016). Extracellular vesicles for drug delivery. *Advanced drug delivery reviews*, 106, 148—156. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.02.006>.

Elsharkasy, O. M., Nordin, J. Z., Hagey, D. W., de Jong, O. G., ..., & Vader, P. (2020). Extracellular vesicles as drug delivery systems: Why and how?. *Advanced drug delivery reviews*, 159, 332—343. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2020.04.004>.

Buschmann, D., Mussack, V., ..., & Byrd, J. B. (2021). Separation, characterization, and standardization of extracellular vesicles for drug delivery applications. *Advanced drug delivery reviews*, 174, 348-368. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2021.04.027>.

Mehanny, M., Lehr, C. M., & Fuhrmann, G. (2021). Extracellular vesicles as antigen carriers for novel vaccination avenues. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 173, 164—180. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2021.03.016>.

Masforrol, Y., Gil, J., García, D., Noda, J., ..., & González, L. J. (2017). A deeper mining on the protein composition of VA-MENGOC-BC®: An OMV-based vaccine against *N. meningitidis* serogroup B and C. *Human Vaccines & Immunotherapeutics*, 13(11), 2548—2560. <https://doi.org/10.1080/21645515.2017.1356961>.

Martiñón, S., Cisneros, A., Villicaña, S., Hernández-Miramontes, R., ..., & Calderón-Vargas, P. (2019). Chemical and immunological characteristics of aluminum-based, oil-water emulsion, and bacterial-origin adjuvants. *Journal of immunology research*, 1—9. <https://doi.org/10.1155/2019/3974127>.

Daleke-Schermerhorn, M. H., Felix, T., Soprova, Z., ten Hagen-Jongman, ..., & Luirink, J. (2014). Decoration of outer membrane vesicles with multiple antigens by using an autotransporter approach. *Applied and environmental microbiology*, 80(18), 5854-5865. <https://doi.org/10.1128/AEM.01941-14>.

Afrough, P., Karam, M. R. A., Vaziri, F., Behrouzi, A., & Siadat, S. D. (2020). Construction and assessment of the immunogenicity and bactericidal activity of fusion protein porin A from *Neisseria meningitidis* serogroups A and B admixed with OMV adjuvant as a novel vaccine candidate. *Iranian Journal of Basic Medical Sciences*, 23(6), 737. <https://doi.org/10.22038/ijbms.2020.40470.9>.

Gan, Y., Li, C., Peng, X., Wu, S., ..., & Ding, X. (2021). Fight bacteria with bacteria: Bacterial membrane vesicles as vaccines and delivery nanocarriers against bacterial infections. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, 35, 102398. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2021.102398>.

Acevedo, R., Fernández, S., Zayas, C., Acosta, A., ..., & Perez, J. L. (2014). Bacterial outer membrane vesicles and vaccine applications. *Frontiers in immunology*, 5, 121. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2014.00121>.

Semchenko, E. A., Tan, A., Borrow, R., & Seib, K. L. (2019). The serogroup B meningococcal vaccine Bexsero elicits antibodies to *Neisseria gonorrhoeae*. *Clinical Infectious Diseases*, 69(7), 1101—1111. <https://doi.org/10.1093/cid/ciy1061>.

Petousis-Harris, H., & Radcliff, F. J. (2019). Exploitation of *Neisseria meningitidis* group B OMV vaccines against *N. gonorrhoeae* to inform the development and deployment of effective gonorrhea vaccines. *Frontiers in immunology*, 10, 683. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2019.00683>.

Gnopo, Y. M., Watkins, H. C., Stevenson, T. C., DeLisa, M. P., ..., & Putnam, D. (2017). Designer outer membrane vesicles as immunomodulatory systems—Reprogramming bacteria for vaccine delivery. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 114, 132—142. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2017.05.003>.

Facchini, F. A., Minotti, A., Luraghi, A., Romerio, A., ..., & Peri, F. (2021). Synthetic glycolipids as molecular vaccine adjuvants: mechanism of action in human cells and in vivo activity. *Journal of medicinal chemistry*, 64(16), 12261—12272. <https://doi.org/10.1021/acs.jmedchem.1c00896>.

Kim, E. H., Woodruff, M. C., Grigoryan, L., Maier, B., ..., & Pulendran, B. (2020). Squalene emulsion-based vaccine adjuvants stimulate CD8 T cell, but not antibody responses, through a RIPK3-dependent pathway. *Elife*, 9, e52687. <https://doi.org/10.7554/eLife.52687>.

Mohan, T., Verma, P., & Rao, D. N. (2013). Novel adjuvants & delivery vehicles for vaccines development: a road ahead. *The Indian journal of medical research*, 138(5), 779.

SUBSTANTIATION OF THE PARAMETERS OF THE VALVE-TYPE FEEDER OF THE ADAPTRONIC MODULE FOR DOSING LIQUID PRODUCT

O. Gavva, L. Kryvoplias-Volodina, Y. Dolomakin, L. Martsynkevych, A. Kokhan
National University of Food Technologies

Key words:

Adaptronic functional module
Cone valve
Simulation model
Geometric parameters
Liquid products
Hydrodynamics
Consumer packaging

Article history:

Received 10.31.2024
Received in revised form 19.07.2024
Accepted 15.08.2024

Corresponding author:

O. Gavva
E-mail:
gavvaoleksandr@gmail.com

Citation: Гавва О. О., Криво-
вопляс-Володіна Л. О., До-
ломакін Ю. Ю., Марцин-
кевич Л. В., Кохан А. А.
(2024). Обґрунтування па-
раметрів живильника кла-
панного типу адаптронно-
го модуля дозування рід-
кої продукції. *Наукові пра-
ці НУХТ*, 30(4), 67—78.
DOI: 10.24263/2225-2924-
2024-30-4-7

ABSTRACT

r automatic machines that perform the function of packaging products in consumer containers, an important criterion of competitiveness is the accuracy of dose formation. Nowadays, there are various ways to increase the accuracy of product dosing. However, as practical experience shows, in the presence of modern computer technologies for managing technological processes, technical means, the best results can be achieved by applying the product weighing method. The process of dynamic weighing is typical for products characterized as a continuous medium. During dynamic weighing, it is important to ensure the desired law of change of the capacity of the feeder. In adaptronic modules for dosing liquid products, the flow is changed using valves, the movement of which is ensured by servo drives. The purpose of the study was to substantiate the geometric and hydrodynamic parameters of the feeder of the adaptronic module for dosing with a valve element for distributing the flow of liquid products.

The methodology for determining the rational values of the geometric and hydrodynamic parameters of the feeder of the adaptronic module for dosing liquid products into consumer containers is described in the article. The geometric parameters of the valve were determined taking into account the law of continuity of the flow of liquid products both in the measuring container and in the nozzle of the feeder.

Based on the results of the simulation, it was established that the rational values of the geometric parameters of cone valves are the angle at the base of the cone $\beta=60^\circ$ and the basic length of the nozzle seat $l_0=15$ mm. These values ensure the minimum geometric parameters of the feeder, the minimum mode of fluid movement, and the implementation of the given law of change of the throughput capacity of the feeder.

The results of simulation modelling of fluid movement in the intervalvular channel made it possible to recommend the use of a specified cone-spherical valve and a nozzle with elongated walls located at an angle β to the base of the cone.

ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЖИВИЛЬНИКА КЛАПАННОГО ТИПУ АДАПТРОННОГО МОДУЛЯ ДОЗУВАННЯ РІДКОЇ ПРОДУКЦІЇ

О. О. Гавва, Л. О. Кривопляс-Володіна, Ю. Ю. Доломакін,
Л. В. Марцинкевич, А. А. Кохан
Національний університет харчових технологій

Для машин-автоматів, що виконують функцію пакування продукції у споживчу тару, важливим критерієм конкурентоспроможності є точність формування дози. На сьогодні існують різні шляхи підвищення точності дозування продукції. Однак, як показує практичний досвід, за наявності сучасних комп'ютерних технологій керування технологічними процесами, технічних засобів, найкращих результатів можна досягти, застосувавши метод зважування продукції. Для продукції, що характеризується як суцільне середовище, характерним є процес динамічного зважування. Під час динамічного зважування важливо забезпечити потрібний закон зміни пропускної здатності живильника. В адаптронних модулях дозування рідкої продукції зміна потоку здійснюється за допомогою клапанів, переміщення яких забезпечується сервоприводами. Метою дослідження є обґрунтування геометричних і гідродинамічних параметрів живильника адаптронного модуля дозування з клапанним елементом розподілення потоку рідкої продукції.

У статті наведено методику визначення раціональних значень геометричних і гідродинамічних параметрів живильника адаптронного модуля дозування рідкої продукції у споживчу тару. Геометричні параметри клапана визначалися з урахуванням закону неперервності потоку рідкої продукції як в мірній ємкості, так і в насадці живильника.

За результатами імітаційного моделювання встановлено, що раціональними значеннями геометричних параметрів конусних клапанів є кут при основі конуса $\beta=60^\circ$ та базова довжина сідла насадки $l_0=15$ мм. Ці значення забезпечують мінімальні геометричні параметри живильника, ламінарний режим руху рідини та реалізацію заданого закону зміни пропускної здатності живильника.

Результати імітаційного моделювання руху рідини в міжклапанному каналі надали можливість рекомендувати використовувати зрізаний конусно-сферичний клапан і насадку з подовженими стінками, розташованими під кутом β до основи конуса.

Ключові слова: адаптронний функціональний модуль, конусний клапан, імітаційна модель, геометричні параметри, рідка продукція, гідродинаміка, споживча тара.

Постановка проблеми. Пакувальні машини-автомати сьогодення є багатофункціональним обладнанням із синергетично пов'язаними функціональними модулями, керування якими здійснюється централізовано адаптронними системами.

Для машин-автоматів, що виконують функцію пакування продукції у споживчу тару, важливим критерієм конкурентоспроможності є точність дозування. Похибка дозування, для значної частини різних видів харчових продуктів, залежить від способу формування дози та конструкції модулів дозування. Вимоги міжнародних і вітчизняних стандартів щодо забезпечення точності формування дози продукції постійно підвищуються, забезпечуючи вимоги споживача. Існують різні шляхи досягнення цих вимог, однак, як показує практичний досвід, за наявності сучасних технічних засобів і комп'ютерних технологій найкращих результатів можна досягти, застосувавши метод зважування продукції. У свою чергу, зважування умовно можна поділити на статичне та динамічне при формуванні дози як всієї величини, так і її частини (порції). В пакувальних машинах великої продуктивності для продукції, яку можна прийняти як суцільне середовище (рідка, в'язко-пластична продукція тощо), здебільшого застосовують ваговий спосіб дозування при формуванні дози всієї величини. За таких умов відбувається динамічне зважування (зміна маси і зусилля на зважувальну систему в часі). Під час динамічного зважування важливо обґрунтовано прийняти геометричні та кінематичні параметри елементів пристроїв живлення, за допомогою яких можна мінімізувати динамічну складову абсолютної похибки.

За умови необґрунтованого прийняття параметрів адаптронного модуля дозування похибка може перевищувати 5—7%, що недопустимо при пакуванні харчової продукції. А тому пошук раціональних значень параметрів адаптронних модулів дозування продукції, в тому числі і рідкої, є актуальним завданням, що потребує наукового вирішення й ефективної реалізації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розвиток комп'ютерних технологій керування технологічними процесами, створення адаптронних функціональних модулів призводять до того, що все частіше на ринку машин пакування харчових продуктів представлені машини з ваговим способом формування дози. Функціональні модулі, що реалізують ваговий спосіб дозування, мають структуру, що включає: пристрій живлення, зважувальну систему, блок контролю потоку продукції живильником і блок контролю сили, що діє на зважувальну систему. Формування дози продукції ваговим способом досліджено для легкоплинної сипкої продукції, яка за структурно-механічними властивостями наближена до ідеальної ньютонівської рідини (Badiru, & Omiaomu, 2023). Встановлено, що на динамічну складову сили зважування суттєво впливає режим потоку живлення. Для оптимізації операції дозування і фасування по її тривалості й точності формування дози важливо забезпечити відповідний закон зміни пропускної здатності живильника (Rangappa, 2020). Це завдання вирішують за допомогою регульованої клапанної системи, пневматикою, керованою запірною арматурою (Gavva, Kryvo-plias-Volodina, & Derenivska, 2021; Bauer, 2019). В існуючих конструкціях машин пакування рідкої продукції у споживчу тару широко використовують клапанну систему з індивідуальним приводом на клапані та мікропроцесорною системою керування переміщення клапана відносно сідла насадки (Гавва, & Криво-пліас-Володіна, 2023). З'ясовано, що ефективною геометричною формою клапана є конусна, тому що забезпечує достатній хід клапана для реалізації заданого закону

зміни пропускної здатності. Моделюванню подібних процесів приділяється значна увага (Vazquez-Santacruz, 2023). Однак існуючі методики не можуть забезпечити повноту розрахунку живильника.

Гідродинамічні процеси в кульовому крані чисельно досліджені за допомогою моделювання обчислювальної гідродинаміки (CFD) (Lu, Cao, & Qi, 2018; Yousaf, Qaisrani, & Tahir, 2022). При цьому розглядалися тільки кавітаційні явища в момент закриття та відкриття клапана. Експериментальні дослідження дросельних затворів (Kim, Yoon, & Shin, 2010) дали змогу провести порівняння ефективності виконання ними функцій. Однак ці результати досліджень не забезпечують регулювання величини пропускної здатності клапанних або кранових систем.

У (Tacose, 2022) розглядаються завдання багатокомпонентного дозування. Для вирішення таких завдань потрібно розглядати метод одночасного порційного дозування складових багатокомпонентних продуктів із заданим вмістом компонентів. У праці (Sukhareva, & Yakovlev, 2018) розглядаються відомі порційні дозувальні функціональні модулі. Результати цих досліджень також не направлені на формування потоку рідкої продукції заданої пропускної здатності. В працях (Vavrik, & Fusko, 2022; Furmann, 2017) автори зазначають, що при раціональному підборі живильника зважувальної системи дозування ваговим способом є більш точним і надійним порівняно з об'ємним. Наведені результати досліджень не надають кінцевих рекомендацій щодо конструкції живильника, методики регулювання потоком продукції. Проведений аналіз результатів виконаних досліджень підтвердив їх недостатність для створення нових зразків адаптронних модулів дозування рідкої продукції, в яких передбачено регулювання потоку продукції клапанним елементом.

Метою дослідження є обґрунтування геометричних і гідродинамічних параметрів живильника адаптронного модуля дозування з клапанним елементом розподілення потоку рідкої продукції.

Матеріали і методи. Об'єктом дослідження є живильник з клапанним елементом розподілу потоку рідкої продукції в адаптронному модулі дозування. Предметом дослідження є геометричні параметри живильника та гідродинамічні режими переміщення потоку продукції по каналах живильника.

Для встановлення функціональної залежності між геометричними параметрами живильника з клапанною системою розподілення потоку рідкої продукції та гідродинамічними характеристиками руху рідини в каналах живильника використано комплексний підхід, що базується на аналітичному та імітаційному моделюванні геометрії живильника й руху продукції в його каналах.

Основні припущення під час моделювання:

- рідка продукція за фізико-механічними властивостями наближена до ньютонівських рідин;
- під час переміщення рідини по каналах живильника потік є неперервним і описується основним рівнянням Нав'є-Стокса;
- клапанний елемент є достатньо жорстким, щоб під дією тиску продукції не змінювалися його геометричні параметри;
- геометрична форма клапана, прийнятого для досліджень, відповідає конусній поверхні.

Для досягнення сформульованої мети дослідження передбачено вирішення таких завдань:

- побудова розрахункової схеми й обґрунтування геометричних параметрів живильника з клапанними елементами розподілу потоку рідкої продукції;
- побудова графічної моделі живильника з клапанним елементом розподілу потоку рідкої продукції та розміщення її в систему Flow Simulation програми Solid-Works;
- прийняття вихідних даних гідродинамічної моделі в системі Flow Simulation і проведення імітаційного моделювання руху рідини в каналах живильника адаптронного модуля дозування;
- узагальнення результатів аналітичного та імітаційного моделювання раціональної конструкції живильника й руху рідини в ньому.

Викладення основних результатів дослідження. З точки зору ефективного регулювання потоку рідкої продукції в живильнику адаптронного модуля дозування є застосування клапана конічної форми.

Для забезпечення раціональних значень геометричних параметрів живильника, реалізації потрібної зміни пропускної здатності живильника, усунення нестаціонарних режимів переміщення продукції важливо визначити раціональні параметри клапана. Живильник для рідкої продукції адаптронного модуля з конусним клапаном складається з мірного циліндра 1, насадки 2 та клапана 3 (рис. 1). Клапан 3 через шток кінематично зв'язаний із короткоходовим сервоприводом (пнеумо, електропривод). Верхня внутрішня частина насадки виконує функцію сідла. Кут β при основі конусного сідла та довжина l_0 бази сідла є базовими при визначенні раціональних параметрів живильника.

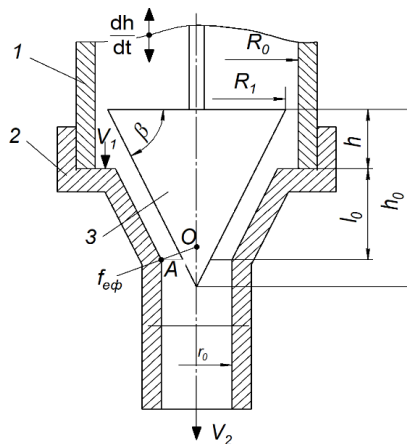


Рис. 1. Розрахункова схема живильника адаптронного модуля дозування з конусним клапаном регулювання потоку рідкої продукції: 1 — мірний циліндр; 2 — насадка; 3 — конусний клапан

Внутрішній діаметр насадки d_0 визначають з урахуванням рекомендацій: $v_{2max} \approx$ до 2 м/с для холодних рідин; $v_{2max} \approx 3$ м/с для гарячих рідин. А також за умови забезпечення продуктивності дозувального модуля, тобто забезпечення максимальної пропускної здатності Q_{max} :

$$d_0=2r_0=2(Q_{max}/\pi \cdot v_{2max})^{0,5}. \quad (1)$$

Геометричні параметри конусного клапана можна визначити за такими залежностями:

$$R_1=r_0+l_0/tg\beta; \quad (2)$$

$$h_0=r_0tg\beta+l_0, \quad (3)$$

де R_1 — радіус основи конусного клапана; h_0 — висота конусного клапана.

Мінімальне значення радіуса внутрішньої порожнини мірного циліндра R_0 визначимо з умови рівності пропускної здатності насадки і каналу між клапаном і внутрішньою поверхнею мірного циліндра:

$$R_{0min}=(r_0^2+R_1^2)^{0,5}. \quad (4)$$

Максимально необхідне переміщення конусного клапана визначимо з умови рівності пропускної здатності всіх каналів живильника:

$$h_{max}=r_0(tg\beta-\sin\beta). \quad (5)$$

Тобто хід конусного клапана знаходиться в межах $0 \leq h \leq h_{max}$.

Пропускна здатність клапанної системи визначається в перерізі клапанного каналу, де ефективна площа, за будь якого значення h , є найменшою. Відповідно до розрахункової схеми це площа в точці A по нормалі до поверхні конусного клапана.

Визначити цю площу можна за формулою:

$$f_{ef}=(\pi/\sin^2\beta) \cdot [r_0^2-(r_0tg\beta-h)^2/tg^2\beta]. \quad (6)$$

Графічна інтерпретація зміни f_{ef} від висоти переміщення клапана наведена на рис. 2.

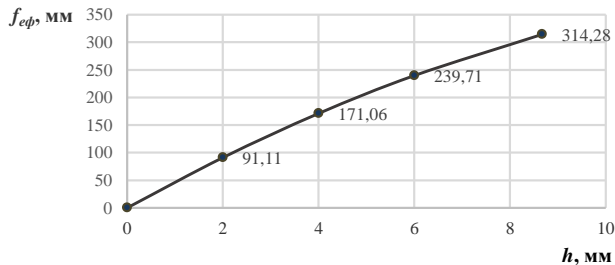


Рис. 2. Зміна ефективного площі поперечного перерізу рідинного каналу живильника з конусним клапаном ($\beta=60^\circ$; $r_0=10$ мм) від ходу переміщення клапана

За відомих значень ефективного площі перерізу каналу рідкої продукції та її середньої швидкості переміщення можна визначити пропускну здатність живильника при різних положеннях клапана:

$$Q_A=f_{ef}v_A=(\pi/\sin^2\beta) \cdot [r_0^2-(r_0tg\beta-h)^2/tg^2\beta]v_A. \quad (7)$$

Середня швидкість переміщення в каналах живильника визначається на основі розв'язку рівнянь гідродинаміки здебільшого числовими методами. Враховуючи складний профіль рідинного каналу між клапаном і сідлом насадки за середню швидкість приймаємо швидкість руху рідини по центру каналу.

Забезпечення високих показників точності дозування ваговим способом досягається зміною пропускної здатності живильника від Q_{max} до Q_{min} в часі. Закон зміни пропускної здатності живильника залежить від величини дози, конфігурації

споживчої упаковки, продуктивності машини-автомата або адаптронного модуля дозування, а також від фізико-механічних властивостей рідкої продукції.

За відомого закону зміни пропускної здатності живильника можна визначити закон зміни положення клапана відносно сідла, тобто

$$dQ_A/dt = d/dt[\pi \sin^2 \beta \cdot (r_0^2 - (r_0 \cdot g \beta - h)^2 / \tan^2 \beta)] \cdot v_A; \quad (8)$$

$$dh/dt = f(dQ_A/dt). \quad (9)$$

Вплив геометричних параметрів клапана β та сідла насадки l_0 на гідродинамічні характеристики руху рідини в живильнику при змінній величині h визначався за допомогою пакета програми SolidWorks в підпрограмі Flow Simulation. Для імітаційного моделювання руху рідини в міжклапанному каналі в цій же програмі виконано графічну модель живильника із змінними геометричними параметрами (β , R_1 , l_0 , R_0) та при сталому значенні r_0 . За вихідні дані розрахунків прийнято: рідина — вода столова; внутрішній діаметр насадки $d_0=20$ мм; витрати рідинної продукції живильником 1 000 000 мм³/с.

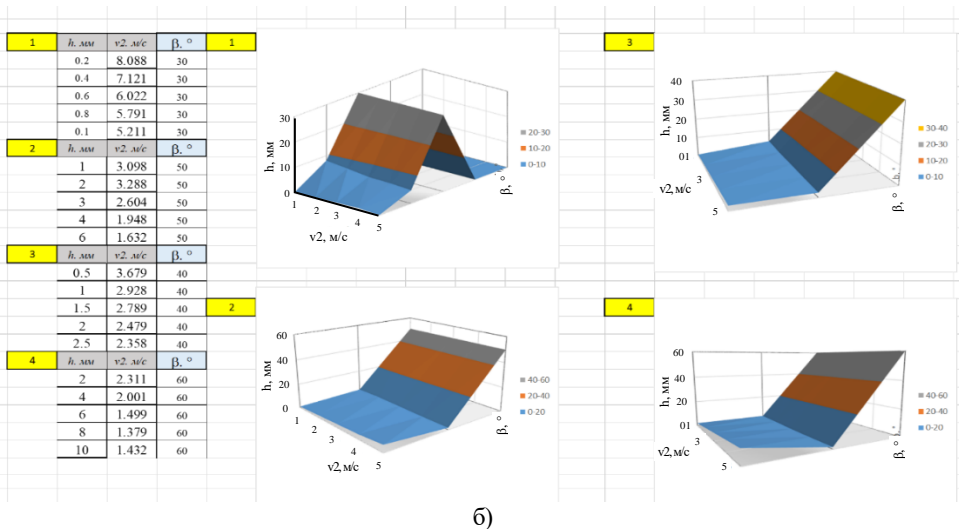
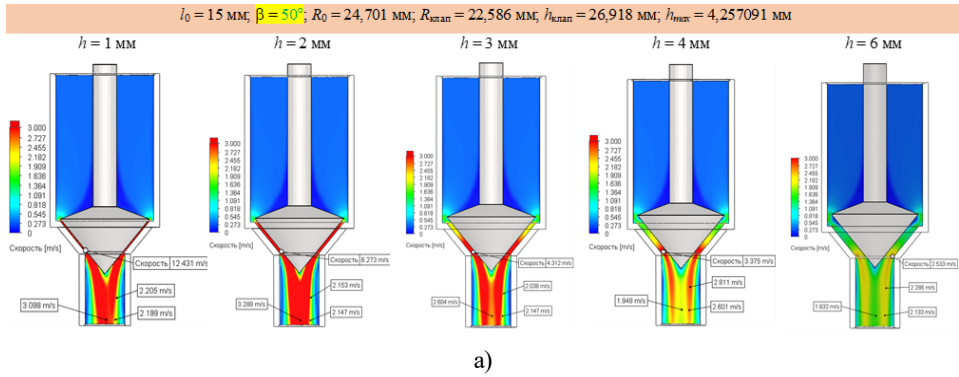


Рис. 3. Зміна поля векторів швидкості переміщення рідкої продукції в міжклапанному каналі живильника: а) результати комп'ютерних розрахунків при $\beta=50^\circ$, $l_0=15$ мм та змінному h ; б) графічна інтерпретація результатів імітаційного моделювання

Імітаційне моделювання руху рідини в міжклапанному каналі живильника виконано за таких умов:

- при сталому значенні $l_0=15$ мм кут β в основі конуса клапана змінювався в межах від 30° до 60° ;

- при сталому значенні $\beta=60^\circ$ змінювалася база сідла клапана l_0 від 5 мм до 25 мм.

Прийняті обмеження на параметри β та l_0 відповідають реально діючим конструкціям живильників.

Одержані результати розрахунків — це поле векторів швидкості переміщення рідкої продукції (рис. 3 та 4).

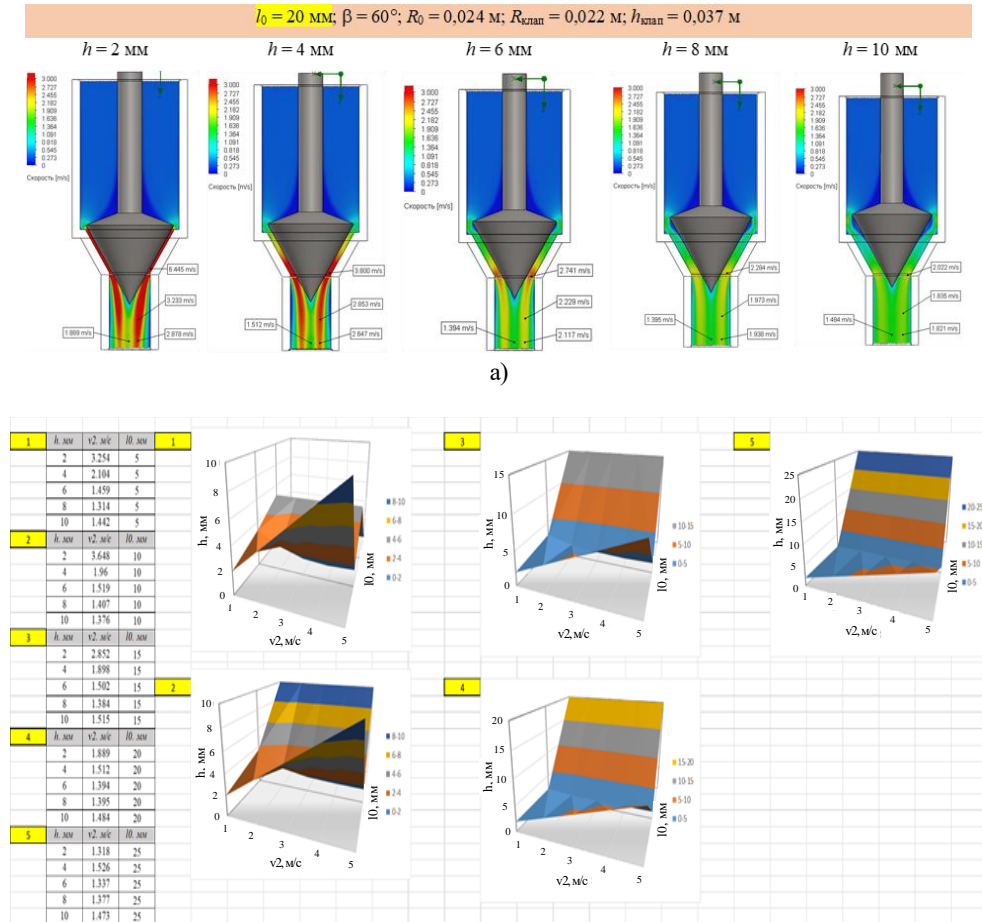


Рис. 4. Зміна поля векторів швидкості переміщення рідкої продукції в міжклапанному каналі живильника: а) результати комп'ютерних розрахунків при $\beta=60^\circ$, $l_0=20$ мм та змінному h ; б) графічна інтерпретація результатів імітаційного моделювання

За результатами імітаційного моделювання руху рідини в міжклапанному каналі встановлено, що раціональними значеннями геометричних розмірів клапана

$\epsilon: \beta=60^\circ$ та $l_0=15$ мм. За цих значень відносно найменші габарити живильника (забезпечують задану продуктивність адаптронного модуля) та при різних положеннях клапана $0 \leq h \leq h_{max}$ можна одержати ламінарний режим течії не тільки в насадці, але й у каналах. Забезпечення ламінарного режиму течії рідкої продукції надає можливість зменшити динамічну складову похибки дозування та мінімізувати піноутворення, захоплення рідиною повітря. За конкретних значень геометричних параметрів живильника та за графічною інтерпретацією результатів імітаційного моделювання можна визначити зміну швидкості руху рідини в клапанному каналі живильника. Ця залежність важлива при визначенні і реалізації закону руху клапана на різних стадіях формування дози.

Результати імітаційного моделювання руху рідини в живильнику надають можливість удосконалити конструкцію клапана. Так, на рис. 3 та 4 видно, що при виконанні основи клапана плоскою в місці його контакту зі штоком виникають зворотні потоки рідини. Для усунення цього явища поверхню основи конуса доречно виконувати або у вигляді зворотного конуса, або випуклої та увігнутої сфери (рис. 5).

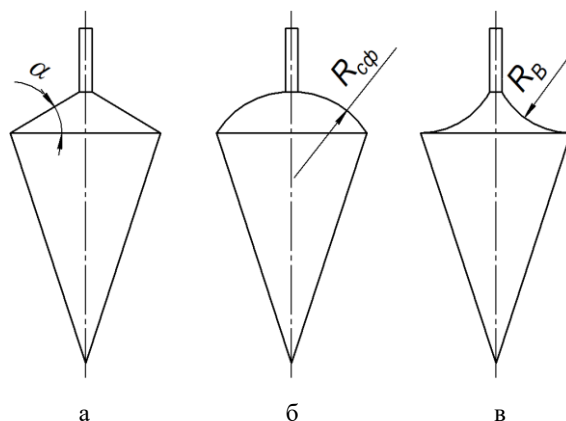


Рис. 5. Виконання основи конусного клапана із: а) зворотнім конусом; б) випуклою сферою; в) увігнутою сферою

Результати імітаційного моделювання руху рідини в живильнику, за наявності клапанів трьох видів (рис. 6), показали, що найкращий ефект усунення зворотних потоків можна одержати, коли основа клапана виконана у вигляді випуклої сфери, при цьому $R_{csf}=R_1$.

Поряд із цим на рис. 3 та 4 видно, що в місцях входження рідини в клапанний канал та виходу її з нього в насадку є ознаки формування перехідних або турбулентних режимів руху.

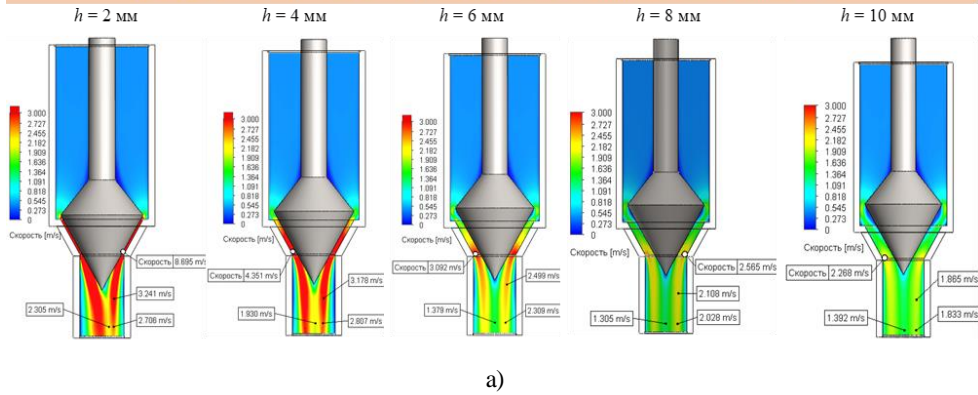
Для усунення цих явищ доречно (рис. 7):

- верхню частину сідла подовжити до контакту з внутрішньою поверхнею мірної ємкості живильника;

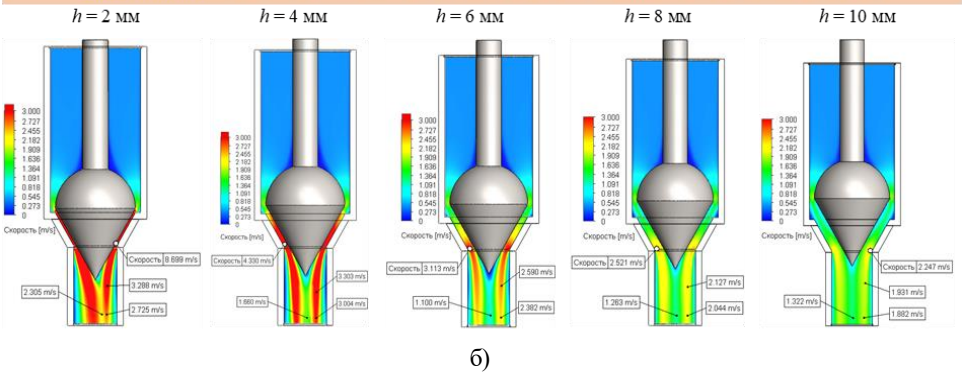
- конусний клапан виконати зрізаним, висоту якого можна визначити з умови:

$$h'_0=l_0+h_{max}=l_0+r_0(\operatorname{tg}\beta-\sin\beta). \quad (10)$$

$\alpha = 50^\circ$; $l_0 = 15$ мм; $\beta = 60^\circ$; $R_0 = 21,17$ мм; $R_{\text{клатп}} = 18,66$ мм; $h_{\text{клатп}} = 32,321$ мм; $h_{\text{мех}} = 8,66$ мм



$R_{\text{сф}} = 18,66$ мм; $l_0 = 15$ мм; $\beta = 60^\circ$; $R_0 = 21,17$ мм; $R_{\text{клатп}} = 18,66$ мм; $h_{\text{клатп}} = 32,321$ мм; $h_{\text{мех}} = 8,66$ мм



$R_{\text{в}} = 18,66$ мм; $l_0 = 15$ мм; $\beta = 60^\circ$; $R_0 = 21,17$ мм; $R_{\text{клатп}} = 18,66$ мм; $h_{\text{клатп}} = 32,321$ мм; $h_{\text{мех}} = 8,66$ мм

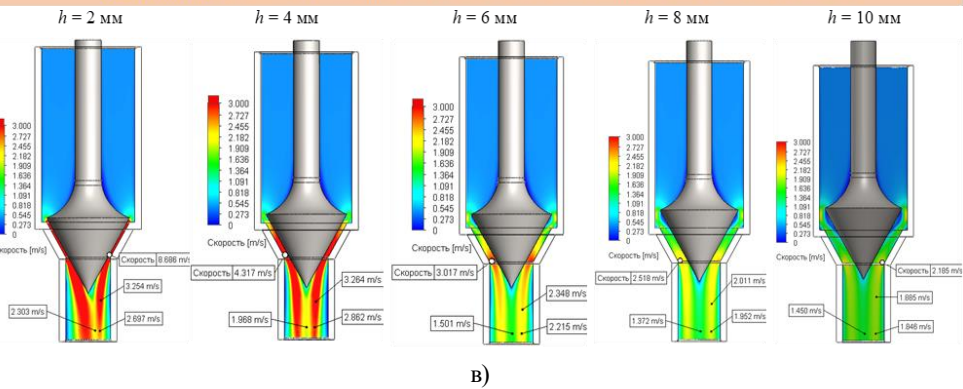


Рис. 6. Зміна поля векторів швидкості переміщення рідкої продукції в міжклапанному каналі живильника при виконанні основи конусного клапана у вигляді: а) зворотного конуса; б) випуклої сфери; в) увігнутої сфери

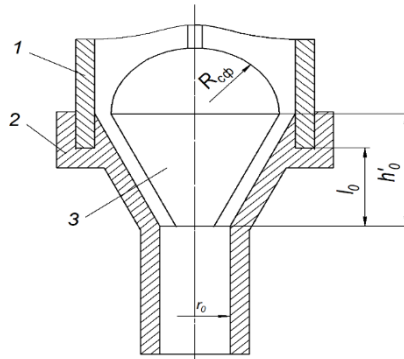


Рис. 7. Удосконалена конструкція живильника адаптронного модуля дозування рідкої продукції: 1 — мірна ємність; 2 — насадка; 3 — конусно-сферичний клапан

Висновки

1. На основі закону неперервності потоку рідкої продукції як у мірній ємності, так і в насадці живильника та прийнятої розрахункової схеми розроблені аналітичні залежності для визначення значень геометричних параметрів клапана конусного типу й максимального його переміщення для реалізації заданої зміни пропускної здатності міжклапанного каналу.

2. Розроблена геометрична модель клапанного живильника трансформована в підпрограму Flow Simulation програми SolidWorks для числового вирішення гідродинамічної задачі щодо переміщення рідкої продукції в клапанних каналах живильника. За вихідні дані прийнято: $d_0=20$ мм; β змінюється в межах $30^\circ \dots 60^\circ$; l_0 — в межах $5 \dots 25$ мм; досліджуваною рідиною є вода столова; пропускна здатність живильника — $1\,000\,000$ мм³/с. Прийняті для дослідження значення параметрів відповідають реальним конструкціям адаптронних модулів дозування рідкої продукції.

3. За результатами імітаційного моделювання встановлено, що раціональними значеннями геометричних параметрів конусних клапанів є $\beta=60^\circ$ та $l_0=15$ мм. Ці значення забезпечують мінімальні геометричні параметри живильника, ламінарний режим руху рідини, реалізацію заданого закону зміни пропускної здатності живильника.

4. Результати імітаційного моделювання виявили зони можливих турбулентностей потоку продукції, а тому запропоновано використовувати зрізаний конусно-сферичний клапан та насадку виготовляти з подовженими стінками, розташованими під кутом β до основи конуса.

5. У подальшому цей напрямок потребує розширення досліджень для рідкої харчової продукції з різними структурно-механічними властивостями.

Література

Гавва, О. О., Кривопляс-Володіна, Л. О. (2023). Обґрунтування режимів роботи адаптронних функціональних модулів дозування рідкої продукції ваговим способом. *Наукові праці НУХТ*, 29(5), 66—76. DOI: 10.24263/2225-2924-2023-29-5-7.

- Badiru, A. B., Omitaomu, O. A. (2023). *Systems 4.0: Systems Foundations for Industry 4.0* (1sted.). CRC Press. doi: <https://doi.org/10.1201/9781003312277>.
- Bilal Yousaf, Mumtaz A. Qaisrani, Muhammad Ijaz Khan, Muhammad Sana Ullah Sahar, Waqas Tahir. (2022). *Nonlinear Engineering*. <https://doi.org/10.1515/nleng-2021-0044>.
- Bauer, E. (2019). *Pharmaceutical Packaging Handbook* (2st ed.). CRC Press. doi: <https://doi.org/10.3109/9781420012736>.
- Gavva, O., Kryvoplias-Volodina, L., Blazhenko, S., Tokarchuk, S., Derenivska, A. (2021). Synthesis of a precision dosing system for liquid products based on electro-pneumatic complexes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* *this link is disabled*, 6(2—114), 125—135. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.247187>.
- Kim, C. K., Yoon, J. Y., Shin, M. S. (2010). *Experimental study for flow characteristics and performance evaluation of butterfly valves*. 25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 12, 012098 doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/12/1/012098>.
- Lu, S., Cao, G., Zheng, H., Li, D., Shi, M., Qi, J. (2018). Simulation and Experiment on Droplet Formation and Separation for Needle-Type Micro-Liquid Jetting Dispenser. *Micromachines*, 9(7), 330. doi: [10.3390/mi9070330](https://doi.org/10.3390/mi9070330).
- Radovan, Furmann (2017). Interactive Design of Reconfigurable Logistics Systems — Process Intensification. *Procedia Engineering*, 192, 207—212. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.036>.
- Rangappa, S. M., Parameswaranpillai, J., Thiagamani, S. M. K., Krishnasamy, S., Siengchin, S. (Eds.). (2020). *Food Packaging: Advanced Materials, Technologies, and Innovations*.
- Sukhareva, N., Yakovlev, F., (2018). *Polymers for Packaging and Containers in Food Industry*. doi: <https://doi.org/10.1201/b12240>.
- Tomoki, Takase (2022) Evaluating the safety and efficiency of robotic dispensing systems. *Journal of Pharmaceutical Health Care and Sciences*, 8(1). doi: <https://doi.org/10.1186/s40780-022-00255-w>.
- Vavrik, V., Fusko, M. (2022). Designing of Machine Backups in Reconfigurable Manufacturing Systems. *Appl. Sci.*, 12, 2338. doi: <https://doi.org/10.3390/app12052338>.
- Vazquez-Santacruz, J. A. (2023). *Towards an integrated design methodology for mechatronic systems*. Research in Engineering Design. Springer-Verlag London Ltd. doi: <https://doi.org/10.1007/s00163-023-00416-4>.

PARAMETRIC SYNTHESIS OF A MECHATRONIC SYSTEM FOR PNEUMATIC CONVEYING OF BULK PRODUCTS

O. Zaporozhets, S. Volodin

National University of Food Technologies

Key words:

*Pneumatic conveying
Bulk food products
Mathematical modelling
Physical modelling
Mechatronic module
Dynamic control
Performance*

Article history:

Received 09.07.2024
Received in revised form
25.07.2024
Accepted 15.08.2024

Corresponding author:

O. Zaporozhets
E-mail:
npnuht@ukr.net

Citation: Запорожець О. В., Володін С. О. (2024). Параметричний синтез мехатронної системи пневмотранспортування сипких продуктів. *Наукові праці НУХТ*, 30(4), 79—89. DOI: 10.24263/2225-2924-2024-30-4-8

ABSTRACT

Increased productivity and the introduction of integrated control systems for pneumatic conveying systems require the development of new mathematical models. Existing models often do not take into account particle migration, hydrodynamic and electrical forces, which causes inaccuracies. Therefore, there is a need to develop flexible pneumatic transport automation systems that provide dynamic control of the transport process, increasing its productivity and reducing costs.

The aim of the study is to develop a mathematical and physical model of the process of pneumatic conveying of bulk food products, formalise critical control modes of the mechatronic module, investigate real boundary conditions for geometric, kinematic and dynamic parameters, and determine the limits of ensuring the required compressed air pressure distribution at a given product pipeline capacity.

To achieve this goal, the following were developed: an experimental pneumatic conveying mechatronic module, physical and mathematical models of the pneumatic conveying process.

As part of the study, the rational parameters of pneumatic conveying and possible energy consumption, depending on the characteristics of the material, were determined. It has been established that the number of transported product particles reaches a maximum within 0.1—0.2 seconds after the compressed air is supplied through the product pipeline. The compressed air flow rate is within 80—160 Nl/min depending on the pressure in the pipeline: 0.1—0.3 MPa. Based on the results of the study, a new approach to modelling pneumatic conveying systems in general is proposed, which makes it possible to take into account various factors affecting the conveying process.

ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ ПНЕВМОТРАНСПОРТУВАННЯ СИПКИХ ПРОДУКТІВ

О. В. Запорожець, С. О. Володін

Національний університет харчових технологій

Зростання продуктивності та впровадження комплексних систем керування пневмотранспортними системами вимагають розроблення нових математичних моделей. Чинні моделі часто не враховують міграцію частинок, гідродинамічні та електричні сили, що обумовлює неточності, тому виникає потреба в розробці гнучких систем автоматизації пневмотранспорту, які забезпечують динамічне регулювання процесу транспортування, збільшуючи його продуктивність і зменшуючи витрати.

Метою дослідження є розробка математичної та фізичної моделі процесу пневмотранспортування сипких харчових продуктів, формалізація критичних режимів керування мехатронним модулем, дослідження реальних граничних умов для геометричних, кінематичних і динамічних параметрів, а також визначення меж забезпечення необхідного розподілу тиску стисненого повітря за заданої продуктивності продуктопроводу.

Для досягнення поставленої мети були розроблені: експериментальний пневмотранспортувальний мехатронний модуль, фізична і математична моделі процесу пневмотранспортування.

У межах дослідження було визначено раціональні параметри пневмотранспортування та можливі енергетичні витрати, що залежать від характеристик матеріалу. Встановлено, що кількість частинок продукту, що транспортуються, досягає максимуму протягом 0,1–0,2 секунди після подачі стисненого повітря продуктопроводом. Витрати стисненого повітря в межах 80–160 Нл/хв залежно від величини тиску в магістралі: 0,1–0,3 МПа. На основі результатів дослідження запропоновано новий підхід до моделювання пневмотранспортних систем загалом, що дає змогу враховувати різні фактори, які впливають на процес транспортування.

Ключові слова: *пневмотранспорт, сипкі харчові продукти, математичне моделювання, фізичне моделювання, мехатронний модуль, динамічне регулювання, продуктивність.*

Постановка проблеми. Сучасні пневмотранспортні системи для сипких харчових продуктів мають особливості, пов'язані з їх проектуванням, експлуатацією й оптимізацією. Зростання продуктивності, впровадження комплексних систем керування потребують нових математичних моделей, які б формалізували реальні умови роботи. Наявні моделі часто не враховують міграцію частинок, гідродинамічні й електричні сили, що призводить до їх неточності. Актуальним завданням є розроблення гнучких систем автоматизації пневмотранспорту, які забезпечують динамічне регулювання процесу транспортування, збільшуючи його продуктивність і зменшуючи витрати.

Одним із перспективних напрямків досліджень є створення універсальної розрахункової моделі потоків під час пневмотранспортування до дозувально-фасувальних модулів обладнання, яка б враховувала властивості різних харчових продуктів.

Удосконалення пневмотранспортних систем потребує не лише розробки нових математичних моделей і систем керування, але й оптимізації параметрів мехатронних модулів. Обґрунтування цієї задачі пов'язане зі зростанням продуктивності пневмотранспорту, впровадженням комплексних систем керування та різними групами сипких харчових продуктів. Наукове вирішення та подальша ефективна реалізація параметричного синтезу мехатронної системи пневмотранспортування передбачає дослідження окремих функціональних модулів з урахуванням впливу різних факторів, використанням наукових методів аналізу й синтезу. Впровадження результатів дослідження дасть змогу підвищити продуктивність пневмотранспортних систем, надійність і безпечність роботи, зменшити енергоспоживання. Дослідження параметрів мехатронних модулів пневмотранспорту сипкої продукції є актуальним науковим завданням, вирішення якого сприятиме підвищенню ефективності обладнання харчової та пакувальної галузі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Кожна група продуктів має певні властивості, тому під час їх транспортування в пневматичній магістралі продуктопроводом необхідні відповідні параметри. А саме: геометрія робочих трубопроводів і режим обробки, який багато в чому залежить і від системи управління за тиском. Різноманітність пневмотранспортного обладнання на ринку зумовлена специфічними властивостями різних груп продуктів, які потребують відповідних параметрів транспортування. Відомі випадки, коли навіть найсучасніші пневматичні продуктопроводи, розроблені для певної групи дрібноштучних продуктів, не забезпечують необхідну продуктивність після заміни виробника. Цей фактор підкреслює важливість моделювання процесів роботи пневмотранспортних установок, якому приділяється значна увага протягом багатьох десятиліть (Orozovica, & Lavrineca, 2020). У сучасних машинах для пакування харчових продуктів у споживчу тару поширене застосування клапанної системи з індивідуальним приводом на кожен клапан і мікропроцесорною системою налаштування оптимальних режимів технологічного процесу (Гавва, & Кривопляс-Володіна, 2023). Результатами досліджень встановлено, що застосування емпіричних методик не забезпечує повного розрахунку установок пневмотранспортування, включно зі зміною характеристик двокомпонентного потоку за умови різних режимів роботи (Ghafoori, 2018). Застосування універсального теоретичного опису процесу пневмотранспортування ускладнюється складною системою диференціальних рівнянь, що робить пряме їх розв'язання вельми проблематичним. Невирішеними залишаються питання, пов'язані з аналітичним описом взаємодій між частинками під час транспортування та зі стінками каналу. Це підкреслює важливість використання методів фізичного моделювання для розв'язання складних задач такого типу (Zhang, & Bénard, 2012). У праці (Golmač, & Prvulović, 2017) автори розширили результати досліджень щодо процесу перероблення зерна в пневмотранспортній системі. Окрім кількісної ілюстрації процесу транспортування, вони описали режими перепадку тисків на вході та виході продуктопроводу, а також вплив абразивного зно-

су трубопроводу та проточних елементів моделі. Дослідження пневмотранспортування з використанням стандартного обладнання та серійного компресора підвищення тиску (Mošorinski, & Prvulović, 2017) демонструють недолік моделей відкритого та закритого типів, оскільки вони не враховують критичну швидкість у вертикальних ділянках транспортного каналу. Дослідження (Shishkin, & Shishkin, 2020) також застосовують універсальну залежність Зенца в логарифмічному масштабі для випадку транспортування суміші. Експерименти з пшеницею, висівками та гранульованими дріжджами підтвердили загальну закономірність режиму пневмотранспортування. Забезпечення транспортування обґрунтоване повітряною швидкістю, що в 1,5—1,8 раза перевищує розрахункову. Хоча це важливо для розрахунку продуктивності, загального споживання стисненого повітря та стабільності подачі продукту, такий підхід може призвести до значних похибок. (El-Kholy, & Kamel Reham, 2021).

У (Gan, & Yu, 2016) описано математичну модель двофазної течії сипучого матеріалу в нагнітальному пневмоприводі, яка враховує звуження, розширення та повороти пневмотраси за допомогою різних коефіцієнтів гідравлічного опору. Експерименти та чисельні розрахунки (Wang, & Cheng, 2023), проведені з використанням запропонованої моделі, продемонстрували типовий розподіл швидкості перенесення маси частинок і тиску вздовж траси. Однак частинка розглядалася як матеріальна точка, без урахування впливу змін навколишнього середовища (Li, & Tang, 2023).

Пояснення явищ, що відбуваються під час руху аеросумішей у пневмотранспортному трубопроводі, може слугувати методом подолання проблем, пов'язаних з пневмотранспортуванням (Sethi, & Rawat, 2022). Описаний підхід (Shijo, & Behera, 2023) дав змогу сформулювати та реалізувати ряд нових технічних рішень щодо вдосконалення пневмотранспорту сипких матеріалів, але заснованих виключно на використанні структурованих режимів руху аеросумішей.

Наведені результати досліджень не дають остаточних рекомендацій щодо оптимальних режимів пневмотранспортування та методики регулювання потоком продукції. Проведений аналіз результатів виконаних досліджень підтвердив їх недостатність для створення нових зразків пневмотранспортувальних мехатронно-керованих модулів для сипкої харчової продукції, в яких передбачено регулювання потоку продукції клапанним елементом.

Метою дослідження є математичне та фізичне моделювання процесу пневмотранспортування сипких харчових продуктів, а також формалізація критичних режимів керування мехатронним модулем.

Для досягнення сформульованої мети дослідження передбачено вирішення **таких завдань:**

- розробити експериментальний пневмотранспортувальний мехатронний модуль з дослідження режимів пневмотранспортування сипких харчових продуктів;
- дослідити реальні граничні умови для геометричних, кінематичних і динамічних параметрів;
- узагальнити раціональні параметри під час дослідження процесу транспортування сипких продуктів у робочому пневмопродуктопроводі для забезпечення етапу фізичного моделювання;

- визначити межі забезпечення необхідного розподілу тиску стисненого повітря за заданої продуктивності продуктопроводу.

Матеріали і методи. Як матеріали дослідження обрано пневмотранспортувальний технологічний мехатронний модуль. Предметом дослідження є процеси пневмотранспортування сипучих харчових продуктів (гречана крупа) у робочому пневмопродуктопроводі. За гранулометричним складом (Panasiewicz, 1995) гречана крупа відноситься до класу незв'язних дрібнодисперсних сухих сипучих продуктів, другої групи (розмір частинки у межах 3—5 мм), здатних до гідравлічного витікання через отвори, які незначно (у 5—7 разів) перевищують діаметр частинок.

Методи дослідження ґрунтуються на фундаментальних законах гідродинаміки сипких середовищ у пневмотранспорті (Modrzewski, & Wodziński, 2004; Molenda, & Stasiak, 2021) та теорії вирішення звичайних диференціальних рівнянь. В рамках дослідження враховано статичні та динамічні характеристики керуючої системи мехатронного модуля підведення стисненого повітря у продуктопровід (Olszewski, 1995; Panasiewicz, 1999). З метою поліпшення метрологічних характеристик системи автоматизованого дозування проведено вибір конструктивних параметрів модуля.

Основними припущеннями під час моделювання (Schmidt, 1997; Wewer, 2000) є: сипка харчова продукція за фізико-механічними властивостями наближена до моделі псевдозрідженого шару; процес обертання частинок у газовому потоці пов'язаний з відсутністю сферичності форми, наявністю ударної взаємодії між частинками й стінкою продуктопроводу, а також наявністю ефекту закручування частинок окремими дрібними турбулентними вихорами.

Викладення основних результатів дослідження. Для проведення досліджень розроблено системи управління потоком, які дають змогу реалізовувати різні закони пневмотранспортування сипкого продукту.

Для встановлення функціональної залежності між геометричними параметрами пневмотранспортного продуктопроводу, мехатронною системою розподілення потоку сипучої продукції та гідродинамічними характеристиками руху стисненого повітря в трубопроводі запропоновано комплексний підхід. Він ґрунтується на аналітичному та фізичному моделюванні режимів керування й руху продукції в каналах продуктопроводу. Процес пневмотранспортування, керований імпульсами стисненого повітря, що обумовлюють робочі режими мехатронного модуля.

Потік стисненого повітря формується на вході в каналі продуктопроводу, за допомогою пневмоклапана, який керується генерацією струму відповідно функції Хевісайда. Значення струму (з роздільною здатністю 0,001 мА) кероване в межах $I_{\max}, I_{\min}=4...20$ мА, із робочими діапазонами 4,1 мА...19,9 мА; 12 мА...19,9 мА. Витратна характеристика пневмоклапана мехатронного модуля — 180 Нл/хв. Тривалість періоду функції керування до 0,3 с.

Для керування потоком стисненого повітря у вертикальному каналі обрано комбінацію системи керування зі зворотним зв'язком у форматі струмової петлі 4...20 мА. Мехатронний модуль (рис. 1) дає змогу динамічно регулювати подачу повітря, забезпечуючи оптимальні умови пневмотранспортування сипкої продукції. Система містить контролер із сигналами зворотного зв'язку від датчика тиску повітря і витратоміра. За сигналом датчика, контролер генерує сигнал, що подається на електромагнітний клапан. Електромагнітний клапан регулює подачу повітря до пневмотранспортної системи. Система керування, представлена на рис. 1,

сформована на елементах Камоцці, складається із драйверів серії 130 для керування пропорційними розподільниками клапанного типу AP (2/2); електронного датчика/реле тиску серії SWCN для вимірювання та контролю тиску повітря; бустера 40M2L100A120MC02 для підсилення тиску повітря. ШІМ-сигнал, генерований драйвером, подається на котушку соленоїда електромагнітного клапана для подачі стисненого повітря в систему вертикального каналу продуктопроводу. Частота сигналу може досягати 500 Гц, а напруга живлення в ланцюзі керування становить 24VDC ($\pm 10\%$), що відповідає параметрам пропорційного розподільника AP.

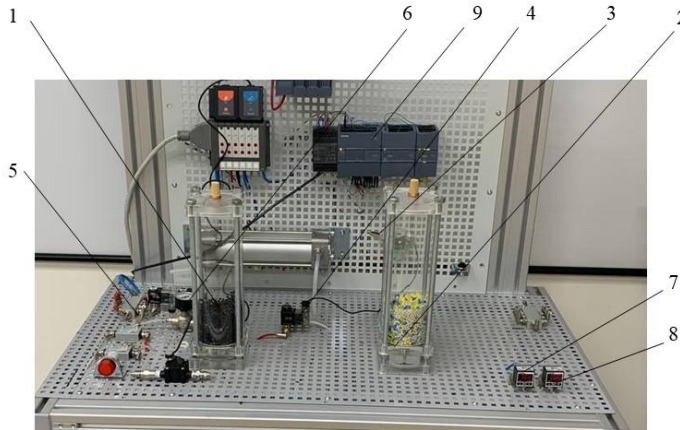


Рис. 1. Вид експериментального пневмотранспортувального мехатронного модуля для дослідження режимів пневмотранспортування сипких харчових продуктів: 1, 2 — вертикальні транспортувальні канали; 3, 5 — драйвери з пропорційним відтворенням імпульсу стисненого повітря; 4, 6 — 2/2 пропорційні розподільники прямої дії; 7, 8 — аналогові електронні реле (вакуум/тиск); 9 — пристрій формування закону зміни струмового сигналу

Узагальнені витрати стисненого повітря залежать від величини вхідного магістрального тиску P (0,1...0,3 МПа) у межах 80...160 (Нл/хв). В основі автоматизації пневмотранспортних систем лежить математична модель, яка описує рух частинок сипкої продукції в нерозривному потоці щільної фази. Для керування потоком стисненого повітря у вертикальному каналі було обрано комбінацію системи керування зі зворотним зв'язком у форматі струмової петлі 4..20 мА. Ця система дає змогу динамічно регулювати подачу повітря, забезпечуючи оптимальні умови пневмотранспортування сипкої продукції. Система містить (рис. 1) контролер, який отримує сигнал зворотного зв'язку від датчика тиску повітря. На основі цього сигналу контролер генерує керуючий сигнал, який подається на електромагнітний клапан. Електромагнітний клапан регулює подачу повітря до пневмотранспортної системи. Важливою характеристикою системи є можливість регулювання керуючого сигналу за струмом на керуючому соленоїді протягом 0,5 с. Це дозволяє контролеру швидко реагувати на зміни умов транспортування та забезпечувати точне регулювання потоку повітря.

Під час зіткнення частинок (рис. 2) та стінки трубопроводу розраховується швидкість після відскоку від поверхні. При цьому враховуються можливі траєкторії руху частинки. Кінематичні параметри частинок після ударного імпульсу з поверхнею продуктопроводу обчислено з радіусом сферичної частинки $r=d/2$. У моделі всі параметри, враховані після удару, мають позначення (*).

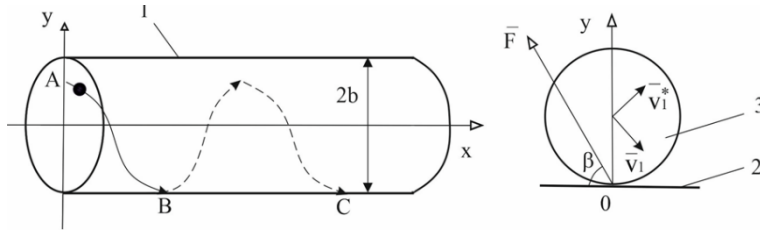


Рис. 2. Розрахункова схема кінематичних характеристик частинки для досліджуваного режиму пневмотранспортування: 1 — робочий трубопровід, 2 — внутрішня поверхня трубопроводу, 3 — частинка сипучого продукту

Математичне моделювання ґрунтується на формалізації руху сферичної частинки в турбулентному повітряному потоці радіусом r' , густиною ρ' . Вхідні параметри моделювання струменевого потоку в продуктопроводі: газ, потік стаціонарний, в'язкість кінематична $\nu = \mu / \rho$ (μ — в'язкість динамічна, ρ — густина. Опір руху частинки відносно повітря (газу) описано за нелінійним законом. Частинка в рульолі знаходиться під впливом сили тяжіння $G = \rho' g'(H)$, де g' — вектор прискорення сили тяжіння. Для конкретизації результатів моделювання приймаємо: $g = 9,81$ (м·с⁻²); $\rho' = 1,25 \cdot 10^{-3}$ (кг·м⁻³); $r' = 3 \cdot 10^{-3}$ (м); $\rho = 1,24 \cdot 10^{-3}$ (кг·м⁻³); потік повітря рухається із швидкістю $v_m = 20$ (м·с⁻¹); $\mu = 1,82 \cdot 10^{-5}$ кг/(м·с); продуктопровід радіусом $b = 0,05$ м. Під дією стисненого повітря, частинка продукту формує обертальний рух, який описано рівнянням (1)—(2) за схемою (рис. 2):

$$\frac{\pi}{6} (2 \cdot r')^3 \rho' \frac{du_i}{dt} = D'(v_i - u_i) + G_i + F_s, \quad (1)$$

де $i = x, y, z$; v_i — вектор швидкості (проекція) \bar{v} стисненого повітря, u_i — вектор швидкості (проекція) \bar{u} продукту відносно до нерухомої системи координат x, y, z . F_i — проекція вектора сили Рубінова-Келлера, що діє на сферичну поверхню частинки з боку стисненого повітря під час обертання. G_i — проекція вектора сили тяжіння на частинку продукту. Опис руху частинки у повітрі із впливом зовнішніх чинників наведено у рівнянні (2):

$$D' = 6\pi\mu r' \left(1 + 0,065 \left(\frac{2}{\mu} r' \rho' (\sqrt{u - \bar{v}}) \right) \right)^{\frac{3}{2}}. \quad (2)$$

Спільний опис рівняння для визначення обертального руху частинок та рівняння руху наведено рівнянням (3):

$$\begin{cases} \frac{4}{3} \pi \cdot r'^3 \cdot \rho' \cdot \frac{du_x}{dt} = D'(v_x - u_x) + G_x + F_x, \\ \frac{4}{3} \pi \cdot r'^3 \cdot \rho' \cdot \frac{du_y}{dt} = D'(v_y - u_y) + G_y + F_y, \\ J \cdot \frac{d\omega}{dt} = -\pi\mu (2 \cdot r')^3 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\partial v_x}{\partial y} - \omega \right). \end{cases} \quad (3)$$

де $\omega = \omega_z$ — проекція осі z для вектора від кутової швидкості обертання частинки;

J — момент інерції частинки відносно центральної осі, паралельної до Oz :

$$J = \left\{ \pi \cdot (2 \cdot r')^5 \rho' \right\} / 60.$$

Значення проєкцій вектора швидкості на координаті осі u_x, u_y у початковий момент руху опишемо за рівняннями (4):

$$u_x = \frac{dx}{dt}; \quad u_y = \frac{dy}{dt}; \quad (4)$$

Спроектувавши сили на осі координат (5)—(6), у прямокутній системі координат x, y , де вісь Ox спрямована вздовж потоку по стінці труби, визначальна система рівнянь руху частинки матиме характеристики:

$$G_y = -\frac{1}{6} \pi \cdot (2 \cdot r')^3 \rho' g, \quad G_x = 0, \quad (5)$$

$$F_x = \frac{\pi}{8} (2 \cdot r')^3 \rho' \omega (v_y - u_y), \quad F_y = -\frac{\pi}{8} (2 \cdot r')^3 \rho' \omega (v_x - u_x). \quad (6)$$

Після підстановки (4)—(6) у систему (3) отримаємо перетворення системи рівняннями (7)—(9) для опису моменту інерції частинки відносно її центральної осі, паралельної Oz :

$$\begin{aligned} \frac{4}{3} \pi \cdot r'^3 \rho' \frac{d^2 x}{dt^2} = 6 \cdot \pi \mu r' \cdot \left[1 + 0,065 \cdot \left(\frac{2}{\mu} r' \rho' \cdot \sqrt{\left(\frac{dx}{dt} - v_x \right)^2 + \left(\frac{dy}{dt} - v_y \right)^2} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{3}{2}} \times \dots \\ \dots \times \left(v_x - \frac{dx}{dt} \right) + \frac{\pi}{8} \cdot \rho' (2 \cdot r')^3 \cdot \omega \cdot \left(v_y - \frac{dy}{dt} \right), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{4}{3} \pi \cdot r'^3 \rho' \frac{d^2 y}{dt^2} = 6 \cdot \pi \mu r' \cdot \left[1 + 0,065 \cdot \left(\frac{2}{\mu} r' \rho' \cdot \sqrt{\left(\frac{dx}{dt} - v_x \right)^2 + \left(\frac{dy}{dt} - v_y \right)^2} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{3}{2}} \times \dots \\ \dots \times \left(v_y - \frac{dy}{dt} \right) - \frac{1}{6} \cdot \pi \rho' \cdot g (2 \cdot r')^3 - \frac{\pi}{8} \cdot \rho' \omega (2 \cdot r')^3 \cdot \left(v_x - \frac{dx}{dt} \right), \end{aligned} \quad (8)$$

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = -\pi \mu (2 \cdot r')^3 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\partial v_x}{\partial y} - \omega \right), \quad (9)$$

де b — радіус труби продуктопроводу (м); v_m — для турбулентної течії у шарі, за рівнянням (10)—(11), де $u \in [0, 2b]$, $0 \leq y \leq b$:

$$v_x = v_m \left(\frac{y}{b} \right)^{\frac{1}{7}}; \quad v_y = 0; \quad \frac{\partial v_x}{\partial v_y} = \frac{1}{7} v_m \left(\frac{1}{by^6} \right)^{\frac{1}{7}}. \quad (10)$$

Якщо $b \leq y \leq 2b$:

$$v_x = v_m \left(\frac{2b-y}{b} \right)^{\frac{1}{7}}; \quad v_y = 0; \quad \frac{\partial v_x}{\partial v_y} = \frac{1}{7} v_m \frac{1}{b} \left(\frac{b}{2b-y} \right)^{\frac{6}{7}}. \quad (11)$$

Система рівнянь (3) буде описана як:

$$\begin{aligned} \frac{4}{3} \pi \cdot r'^3 \rho' \frac{d^2 y}{dt^2} = -6 \cdot \pi \mu r' \cdot \left(1 + 0,065 \cdot \left(\frac{2}{\mu} r' \rho' \cdot \sqrt{\left(\frac{dx}{dt} - v_x \right)^2 + \left(\frac{dy}{dt} \right)^2} \right)^{\frac{2}{3}} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{dy}{dt} - \dots \\ \dots - \frac{4}{3} \pi \cdot \rho' (r')^3 - \pi \cdot \rho' (r')^3 \cdot \omega \cdot \left(v_x - \frac{dx}{dt} \right), \end{aligned} \quad (12)$$

Остаточне рівняння (13) опису дії в точці зіткнення частинки зі стінкою, наприклад, у точці В труби, слід обчислити швидкості u та ω після відскоку частинки від стінки, прийнявши за початкові умови для руху частинки на ділянці ВС, за (рис. 2), для траєкторії частинки:

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = -\pi \mu (2 \cdot r')^3 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\partial v_x}{\partial y} - \omega \right). \quad (13)$$

Для визначення п'яти довільних констант інтегрування в системі рівнянь динаміки частинки, що рухається в полі сил Рубінова-Келлера, використовуються такі початкові умови:

- координати частинки в початковий момент часу $x(0)=x_0$, де x_0 — початкова координата частинки по осі X; $y(0)=y_0$, де y_0 — початкова координата частинки по осі Y;

- проєкції вектора швидкості частинки в початковий момент часу: $x(0)=Vx_0$, де Vx_0 — початкова проєкція вектора швидкості частинки на вісь X; $Vy(0)=Vy_0$, де Vy_0 — початкова проєкція вектора швидкості частинки на вісь Y;

- кутова швидкість обертання частинки в початковий момент часу: $\omega(0)=\omega_0$, де ω_0 — початкова кутова швидкість обертання частинки.

Початкове значення кутового прискорення: $\alpha(0)=\alpha_0$, де α_0 — початкове значення кутового прискорення.

Результати розрахунку запропонованої математичної моделі наведено на рис. 3. Перший етап: вихід установки на стаціонарний режим пневмотранспортування. Накопичення повітря в подавальному ресивері (рис.1) призводить до зростання його швидкості й тиску (рис. 3, а). Стаціонарний режим характеризується постійними значеннями швидкості й тиску повітря протягом роботи установки з урахуванням режиму транспортування. Швидкість і тиск повітря на вході є ключовими факторами для початку транспортування продукту.

Другий етап: сталий режим транспортування продукту. Розгін матеріалу відбувається протягом 0,1...0,3 с і залежить від попередньо встановлених режимів управління подачі стисненого повітря. На рис. 3, б чітко видно розподіли лінійної швидкості переміщення сипкого продукту під час руху в каналі продуктопроводу під тиском. Це підтверджує результати моделювання щодо впливу місцевих опорів на підвищення питомих втрат тиску.

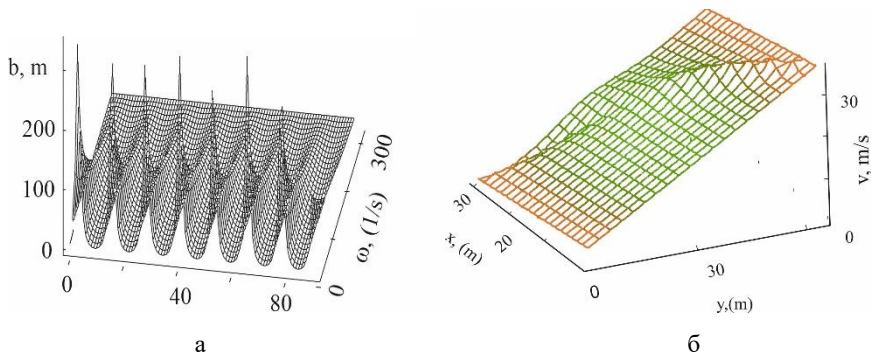


Рис. 3. Характеристика параметрів транспортування сипкого продукту у продуктопроводі: а — кутова швидкість ω руху частинки після зіткнення із стінкою трубопроводу; б — лінійна швидкість переміщення сипкого продукту v за час руху у каналі під тиском

Висновки

1. Розроблено фізичну модель експериментального пневмотранспортного мехатронного модуля з дослідження режимів пневмотранспортування сипких харчових продуктів, що забезпечує роботу схеми передавання керувального сигналу для імпульсної подачі стисненого повітря у вертикальному трубопроводі з урахуванням впровадження елементної пропорційної пневматичної техніки.

2. Опрацьована математична модель процесу транспортування сипучих харчових продуктів. Модель базується на диференціальних рівняннях руху окремих частинок у повітряному потоці, а також враховує поведінку частинок у процесі зіткнення за прийнятими граничними умовами. Граничні умови сформовані з урахуванням впливу режимів транспортування сипких харчових продуктів і геометрії каналів продуктопроводу. В ході теоретичних досліджень визначено раціональні параметри важливі для процесу керування і пневмотранспортування продукту. Радіус частинки сипкого продукту $r' = 3 \cdot 10^{-3}$ (м); густина окремої частинки сипкого продукту $\rho' = 1,25 \cdot 10^{-3}$ (кг·м⁻³); густина енергоносія (повітря) $\rho = 1,24 \cdot 10^{-3}$ (кг·м⁻³); максимальна швидкість потоку $v_m = 20$ (м·с⁻¹); динамічна в'язкість $\mu = 1,82 \cdot 10^{-5}$ кг/(м·с); радіус продуктопроводу $b = 0,05$ м.

3. Аналіз результатів моделювання довів, що загальні втрати тиску в трубопроводі пневмотранспортування складаються з таких чинників: втрат тиску, обумовлених фрикційними взаємодіями між потоком повітря та стінками трубопроводу; ударами частинок об стінки, втрат тиску на підтримання матеріалу, що транспортується у зваженому стані на вертикальній ділянці; втрат тиску на розгін частинок під час їх руху у пневмотранспортний канал.

Література

Гавва, О. О., Кривошляк-Володіна, Л. О. (2023). Обґрунтування режимів роботи адаптронних функціональних модулів дозування рідкої продукції ваговим способом. *Наукові праці НУХТ*, 29(5), 66—76. doi:10.24263/2225-2924-2023-29-5-7.

El-Kholy, M. M., Kamel, R. M. (2021). Development and Evaluation of an Innovative Grain Cart with a Pneumatic Conveyor. *Heliyon*, 33, 17—31. doi:10.1016/j.heliyon.2021.e08461.

- Gan, J. Q., Yu, A. B. (2016). A GPU-based DEM approach for modelling of articulate systems. *Powder Technology*, 301, 1172—1182. doi:10.1016/j.powtec.2016.07.072.
- Ghafari, H. (2018). Numerical and experimental study of an innovative pipeline design in a granular pneumatic-conveying system. *Particuology*, 38, 196—203. doi:10.1016/j.partic.2017.07.007.
- Li, J., Tang, Z. (2023). Deep learning-based tomographic imaging of ECT for characterizing particle distribution in circulating fluidized bed. *AIChE Journal*, 69. doi:10.1002/aic.18055.
- Modrzewski, P., Wodziński, P. (2004). Circling-and-revolving screen, various design versions. *Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej. Inżynieria chemiczna i procesowa*, 27, 205—213.
- Molenda, M., Stasiak, M. (2021). Influence of seeds shape and internal structure of the sample on angle of internal friction. *Acta Agrophysica*, 2003(82), 131—137.
- Mošorinski, P., Prvulović, S. (2017). Improving the characteristics of pneumatic transport of grain. *Journal of Agricultural Engineering Science*, 15(3), 433, 218—224. doi:10.5937/jaes15-12734.
- Mošorinski, P., Prvulovic, S., Palinkaš, I. (2017). Improving the characteristics of pneumatic transport of grain. *Journal of Applied Engineering Science*, 15(3). doi:10.5937/jaes15-12734.
- Olszewski, A. (1995). Pneumatic transport in the mill. *Przegląd Zbożowo-Młynarski*, 7, 22—29.
- Orozovica, A., Lavrineca, A. (2020). Transport boundaries and prediction of the slug velocity and layer fraction in horizontal slug flow pneumatic conveying. *Chemical Engineering Science*, 227, 247—257. doi:10.1016/j.ces.2020.115916.
- Panasiewicz, M. (1995). Pneumatic separation process of leaves made from lupine seed disintegration process. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 424, 297—302.
- Panasiewicz, M. (1999). Analysis of the pneumatic separation process of agricultural materials. *International agrophysics*, 13(2), 233—239.
- Schmidt, P. (1997). Das Siebklassiren. *Chem. Ing. Tech.*, 56, 12, 38—57.
- Sethi, A. K., Rawat, A. (2022). Artificial neural network models for wall parameters on plug-1 flow characteristics through pipelines. *Journal of Engineering Research*, 10. doi:10.36909/jer.ICMET.17203.
- Shijo, J. S., Behera, N. (2023). Prediction of flow mode transition in pneumatic conveying of fine particles using CFD. *Particulate Science and Technology*, 41, 297—310. doi:10.1080/02726351.2022.2081828.
- Shishkin, S., Shishkin, A. (2020). Calculation of Pressure Losses During Pneumatic Transport. *Refractories and Industrial Ceramics*, 60. doi:10.1007/s11148-020-00419-x.
- Wang, Y., Cheng, X. Z. (2023). A gas-solid flow pattern identification algorithm based on cross-rod electrostatic sensor array. *Measurement Science and Technology*, 34(1). doi:10.1145/3208854.3208892.
- Wewer, M. (2000). Wilgotność procesu fl uidyzacji w sortowaniu płodów rolnych. *Prz. Tech. Rol.*, 3, 28—37.
- Zhang, P., Roberts, R. M., Bénard, A. (2012). Computational guidelines and an empirical model for particle deposition in curved pipes using an Eulerian-Lagrangian approach. *Journal of Aerosol Science*, 53, 1—20. doi: 10.1016/j.jaerosci.2012.05.007.

DETERMINATION OF RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF BREAD CRUMB FOR CALCULATING THE PARAMETERS OF VACUUM COOLING PROCESS

O. Kozak, Y. Telychkun, V. Telychkun
National University of Food Technologies

Key words:

Bakery products
Pressure vacuum cooling
Rheological properties
Operational parameters

Article history:

Received 11.07.2024
Received in revised form
30.07.2024
Accepted 16.08.2024

Corresponding author:

O. Kozak

E-mail:

oleksandrkozak2@gmail.com

Citation: Козак О. С., Теличкун Ю. С., Теличкун В. І. (2024). Визначення реологічних характеристик м'якушки батона для розрахунку параметрів процесу вакуумного охолодження. *Наукові праці НУХТ*, 30(4), 90—99.
DOI: 10.24263/2225-2924-2024-30-4-9

ABSTRACT

Cooling of bakery products is an important final and the longest stage of their production (approximately 3 hours), performed to ensure the necessary rheological characteristics required for slicing and packaging operations. After baking, hot products can deform and lose their shape, structure, and porosity due to mechanical impact. Vacuum cooling is considered the fastest and most efficient method among those used in production, but additional research is needed for its successful implementation in continuous production. This is necessary to determine the optimal parameters for each type of product to avoid deformation and damage.

We conducted a study of the rheological characteristics of baton crumb under production conditions. The baton was prepared in a tunnel-type oven BN 25 from premium wheat flour with a mass of 0.5 kg. The studies were carried out using a penetrometer AP 4/1 with a flat indenter, employing the methodology we developed.

As a result of the studies, we established that the quality of the finished and vacuum-cooled bakery products is determined by the operating parameters of the vacuum cooling process. These parameters significantly depend on the rheological properties of the bakery product crumb. The study results showed that these properties change depending on the crumb temperature: the higher the temperature of the finished bakery product, the lower the yield strength of the crumb.

The yield strength of the baton crumb changes linearly depending on the temperature. At a temperature of 100 °C, the yield strength is 1500 Pa, and at 30 °C, it is 3600 Pa. This dependence can be expressed by the equation:

$$\sigma = 30t + 4500,$$

where t — is the temperature of the baton crumb (°C); σ — is the yield strength of the baton crumb (Pa).

ВИЗНАЧЕННЯ РЕОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК М'ЯКУШКИ БАТОНА ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ВАКУУМНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ

О. С. Козак, Ю. С. Теличкун, В. І. Теличкун
Національний університет харчових технологій

Охолодження хлібобулочних виробів є важливим завершальним і найдовшим етапом їх виробництва (близько 3 год), що забезпечує необхідні реологічні характеристики, які потрібні для виконання операцій нарізання і пакування. Після випікання гарячі вироби можуть деформуватися та втратити форму, структуру і пористість через механічний вплив. Вакуумне охолодження вважається найшвидшим і найефективнішим способом серед тих, що використовуються на виробництві, але для його успішного впровадження у потокове виробництво необхідно провести додаткові дослідження. Це потрібно для визначення оптимальних параметрів для кожного сорту виробу, щоб уникнути його деформації та пошкодження.

Дослідження реологічних характеристик м'якушки батона проводилось у виробничих умовах. Батон був приготований у печі тунельного типу БН 25 з пшеничного борошна вищого ґатунку масою 0,5 кг. Дослідження проводилися за допомогою пенетрометра АП 4/1 з плоским індентором.

У результаті проведених досліджень встановлено, що якість готових і охолоджених за допомогою вакуумного способу хлібобулочних виробів визначається режими параметрами процесу вакуумного охолодження. Ці параметри значною мірою залежать від реологічних властивостей м'якушки хлібобулочного виробу. Результати досліджень показали, що ці властивості змінюються залежно від температури м'якушки: чим вища температура готового хлібобулочного виробу, тим менші показники границі міцності м'якушки.

Значення границі міцності м'якушки батона змінюється лінійно залежно від температури. За температури 100 °С границя міцності становить 1500 Па, а 30 °С — 3600 Па. Цю залежність можна виразити рівнянням:

$$\sigma = 30t + 4500,$$

де t — температура м'якушки батона (°С); σ — границя міцності м'якушки батона (Па).

Ключові слова: хлібобулочні вироби, тиск, вакуумне охолодження, реологічні властивості, режимні параметри.

Постановка проблеми. Процес охолодження хлібобулочних виробів є завершальним етапом виробництва, який виконується з метою забезпечення таких реологічних характеристик, що дають змогу проводити операції нарізання та пакування. Необхідність охолодження викликана тим, що щойно випечені гарячі хлібобулочні вироби під впливом механічних сил можуть зазнавати деформації, втрачати форму, структуру та пористість, а також викликати появу конденсату в упаковці (Everington, 2003; Gao, Wang, Dong, & Zhou, 2018; Zhang та ін., 2014).

Процес вакуумного охолодження хлібобулочних виробів відбувається за рахунок відбору тепла через адіабатне кипіння вологи, яка знаходиться всередині гарячого хлібобулочного виробу (Primo-Martín, Beukelaer, Hamer, & Vliet, 2008; Peng, Cheng, 2017; Zhu, Li, Sun, & Wang, 2019).

Протягом тривалого часу дослідження процесу вакуумного охолодження хлібобулочних виробів проводяться багатьма іноземними та вітчизняними науковцями. Однак впровадження вакуумного способу охолодження хлібобулочних виробів вимагає удосконалення як теорії (Everington, 2003; McDonald, 2001; Ajani, Zhu, & Sun, 2023), так і параметрів процесу (Primo-Martín, Beukelaer, Hamer, & Vliet, 2008; Peng, & Cheng, 2017).

Наприклад, занадто інтенсивне зниження тиску у вакуумній камері викликає градієнт тиску між парою у виробі, що охолоджується, та навколишнім середовищем. Це призводить до розтріскування скоринки батона (рис. 1) та відриву м'якушки від нижньої скоринки (рис. 2) (Ajani, Zhu, & Sun, 2023; Kinner та ін., 2021).



Рис. 1. Розтріскування скоринки батона в результаті занадто інтенсивного зниження тиску у вакуум-камері



Рис. 2 Руйнування подового хліба: 1 — зразок за правильно підібраним режимом вакуумного охолодження; 2, 3 — зразки за занадто інтенсивного режиму вакуумного охолодження

Під час наших досліджень режимних параметрів вакуумного охолодження батона було виявлено, що утворена під час випічки скоринка має великий опір, що

перешкоджає дифузії водяної пари з середини батона в навколишнє середовище. У такому випадку інтенсивність охолодження обмежується газопроникністю скоринки та реологічними властивостями м'якушки батона (Козак, & Теличкун, 2023).

Також на експериментальній установці був встановлений оптимальний режим охолодження батона до температури 30 °С, який представлений на графіку (рис. 3, крива 1). Криві 2 і 3 на рис. 3 відповідають зразкам 2 і 3 на рис. 2, і при таких режимах виявлено, що відбувається розрив м'якушки досліджуваного зразка, що не відповідає встановленим вимогам якості (Козак, & Теличкун, 2023).

При режимі, що представлений кривою 1 на рис. 3, час охолодження батона масою 0,5 кг складає 2 хв, а максимальна швидкість утворення розрідження не перевищує 4,5 кПа/с.

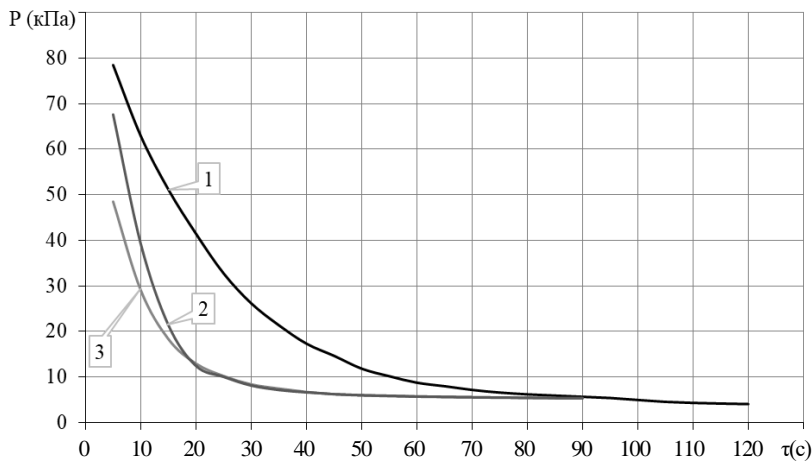


Рис. 3. Криві створення розрідження у вакуум-камері

З метою оптимізації процесу вакуумного охолодження було визначено пропускну здатність скоринки батона ($lF=0,32 \text{ (м}^3\text{/(м}^2\cdot\text{с))}$), розраховано площу поверхні батона ($F=0,091 \text{ м}^2$), а також визначено час, за який утворена в процесі вакуумного охолодження пара ($V=0,444 \text{ м}^3$) може пройти через скоринку батона ($\tau = 21 \text{ с}$) (Козак, & Теличкун, 2023).

Отримані в результаті досліджень і розрахунків дані свідчать, що експериментально знайдений режим вакуумного охолодження батона (рис. 3 крива 1) можливо інтенсифікувати. Але для розрахунку такого режиму, за якого можна максимально швидко охолодити батон вакуумним способом, не зіпсувавши його, необхідно визначити реологічні властивості м'якушки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наукова спільнота приділяє значну увагу проблематиці вакуумного охолодження харчової продукції, що відображено у великій кількості наукових досліджень, проведених протягом декількох десятиліть. Холодильна промисловість часто використовує метод охолодження за рахунок випаровування рідини (Gao, Wang, Dong, & Zhou, 2018). Температура про-

дукту знижується під час вакуумного охолодження за рахунок випаровування вологи з нього, яка переходить у паровий стан. (Everington, 2003). Зазвичай, вода закипає за температури 100 °С та атмосферного тиску (101,325 кПа), під час переходу з рідкого агрегатного стану в газоподібний. Під час цього процесу вода поглинає таку кількість тепла, що не дає їй підвищити температуру вище зазначеної (Primo-Martín, Beukelaer, Hamer, & Vliet, 2008; Zhu, Li, Sun, & Wang, 2019). Зниження тиску у вакуумній камері зменшує температуру кипіння вологи в продукті, що, у свою чергу, сприяє ефекту охолодження. Це призводить до скорочення тривалості процесу охолодження, але збільшує відсоток усихання готового продукту приблизно в 1,5—2 рази (Ajani, Zhu, & Sun, 2023; Клапатюк, Ковальов, & Федорів, 2014). У фармацевтичній промисловості вакуумвипарний апарат застосовують для концентрування розчинів, що киплять за високої температури, з метою економії енергоносіїв і зменшення часу проведення технологічного процесу (Gao, Wang, Dong, & Zhou, 2018).

Вакуумний спосіб охолодження широко використовують для шойно зібраної на полі зелені та свіжих овочів у США, Європі та Китаї (Zhu, Li, Sun, & Wang, 2019; Zhu, Li, & Sun, 2021). Унаслідок відбору тепла випаровуванням вологи за низького тиску температура шойно зібраної продукції може бути ефективно знижена з 28 °С до 2 °С. Процес охолодження проводять порційно, тривалість охолодження однієї порції 15—30 хв, причому типове обладнання здатне обробити за раз кілька тонн продукту, розміщеного, як правило, на піддонах або візках (Guo, Song, & Liu, 2018).

Втрата вологи на рівні 1% призводить до охолодження продукту на 6 °С. Для вакуумного способу охолодження продукт поміщають у сталеву камеру, і вакуумні насоси знижують тиск до 0,6 кПа (Guo, Song, Song, & Liu, 2018). Вода закипає в умовах тиску від 2,6 до 4 кПа залежно від початкової температури. Це призводить до швидкого випаровування вологи та швидкого охолодження. У кінці циклу охолодження тиск дорівнює 0,6 кПа, а волога кипить за температури 0 °С (Peng, Cheng, 2017).

Якщо продукт витримується за такого тиску досить довго, він може охолонути до 0 °С. Втрати маси продукту, що охолоджується, становить від 2 до 4% ваги залежно від початкової температури. Обприскування водою до початку охолодження зменшує втрати вологи продуктом (Zhang та ін., 2014).

Мета дослідження: визначення реологічних властивостей м'якушки батона з метою розрахунку й обґрунтування режимних параметрів вакуумного охолодження батона з пшеничного борошна вищого ґатунку масою 0,5 кг.

Матеріали і методи. Досліджували м'якушку батона з пшеничного борошна вищого ґатунку масою 0,5 кг. Для визначення реологічних властивостей м'якушки використовували напівавтоматичний пенетрометр марки АП 4/1 з плоским індентором (рис. 4).

Дослідження проводились в умовах виробництва зі свіжовипеченим батонном, взятим з поду печі, дотримуючись таких кроків: за допомогою ножа з батона вирізали зразок м'якушки розмірами 30 мм у висоту, ширину та довжину. Цей зразок розміщували на платформі та піднімали до поверхні індентора за допомогою піднімального гвинта. Під час досліджень стало очевидно, що реологічні характеристики м'якушки значною мірою залежать від температури. Для кожного значення

температури м'якушки брали по три зразки, і для кожного дослідю використовувався новий зразок.

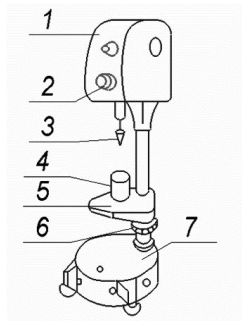


Рис. 4. Пенетромтр моделі АП 4/1: 1 — вимірювальна головка; 2 — показчик шкали; 3 — індентор; 4 — зразок; 5 — платформа для зразка; 6 — гайка для підведення платформи із зразком до індентора; 7 — основа

Аналіз отриманих дослідних даних виконували, спираючись на наукові праці П. А. Ребіндера та інших дослідників, які вивчали реологічні властивості низькомодульних матеріалів компресійним методом. На відрізьку OA (рис. 5), матеріал підкоряється закону Гука. Це означає, що деформація матеріалу пропорційна прикладеному напруженню.

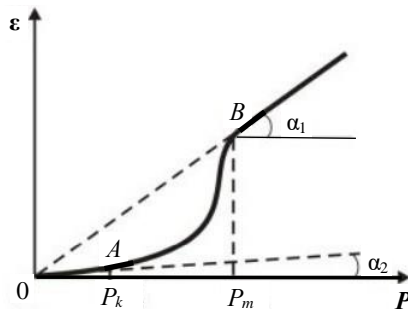


Рис. 5. Узагальнений графік деформування низькомодульних матеріалів під час компресійних досліджень реологічних властивостей

Напруження P_k вказує на початок руйнування структури. За подальшого зростання напруження на ділянці AB (рис. 5) крива втрачає лінійний характер, що вказує на часткове руйнування структури та появу пластичної деформації. У точці B кривої деформації структура системи практично повністю руйнується. Напруження, що відповідає цій точці, називається граничним напруженням зсуву P_m (границею міцності матеріалу). За P_m , коли структура руйнується, матеріал деформується відповідно до закону Гука.

Для наближеного розрахунку тиску, що утворюється всередині батона під час процесу вакуумного охолодження, було використано газовий закон Бойля-Маріотта, згідно з яким за постійної кількості газу його тиск і об'єм зворотно пропорційні:

$$P_1V_1=P_2V_2, \quad (1)$$

де P_1 — початковий тиск всередині батона (Па); V_1 — початковий об'єм газу в середині батона (м^3); P_2 — тиск всередині батона під час вакуумного охолодження (Па); V_2 — об'єм газу всередині батона під час вакуумного охолодження (м^3).

Потік газу через скоринку батона описується рівнянням:

$$J=(PD)/L, \quad (2)$$

де J — потік газу через скоринку батона ($\text{м}^3/\text{с}$); P — різниця тиску між внутрішнім і зовнішнім середовищами (тобто $P=P_1-P_2$); D — газопроникність скоринки батона ($\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$); L — товщина скоринки батона (м).

Тоді градієнт тиску між середовищем всередині батона та середовищем вакуум-камери P_2 .

З рівняння проникності-концентрації ми можемо виразити різницю тисків P :

$$P=(JL)/D. \quad (3)$$

Підставляючи це значення різниці тисків P у закон Бойля-Маріотта, отримуємо:

$$P_1V_1=(P_1-P)V_2 \quad (4)$$

Звідки отримуємо:

$$P_1V_1=(P_1-(JL)/D)V_2. \quad (5)$$

Оскільки об'єм газу всередині батона не змінюється під час вакуумного охолодження, то можна припустити, що $V_1 \approx V_2$. Тоді рівняння спрощується до:

$$P_1 \approx P_2 + (JL)/D. \quad (6)$$

Звідси ми можемо вивести значення тиску в батоні P_2 , що виникає під час вакуумного охолодження:

$$P_2 = P_1 - (JL)/D. \quad (7)$$

Викладення основних результатів дослідження. В результаті проведених досліджень з визначення реологічних властивостей м'якушки батона було отримано типові криві залежності деформації зразка від прикладеного напруження при визначенні реологічних властивостей матеріалів компресійним методом (Ajani, Zhu, & Sun, 2022).

Деформаційні криві зразків було оброблено таким чином: всі точки, отримані за відповідної температури, були впорядковані в точкові діаграми, після чого була побудована лінія тренду (рис. 6). За допомогою описаної вище методики визначення реологічних властивостей матеріалу компресійним методом була встановлена границя міцності м'якушки батона при відповідних температурах.

Під час подальшого аналізу дослідних даних на основі попередніх результатів ми побудували графік, що відображає залежність границі міцності від температури, та виявили відповідну закономірність (рис. 7).

Аналізуючи графік на рис. 7, можна стверджувати, що значення границі міцності м'якушки батона прямо пропорційна температурі.

За 100°C границя міцності складає 1500 Па, тоді як за 30°C вона має значення 3600 Па. Ця залежність може бути виражена у вигляді рівняння:

$$\sigma = 30t + 4500, \quad (8)$$

де t — температура в ($^\circ\text{C}$); σ — границя міцності м'якушки батона в (Па).

На основі отриманих даних з дослідження реологічних властивостей м'якушки батона та наших досліджень процесу вакуумного охолодження батона і досліджень газової проникності скоринки батона ми розрахували режим вакуумного охолодження батона, за якого градієнт тиску між середовищем всередині батона

та середовищем у вакуумній камері не перевищує границі міцності м'якушки батона (рис. 8).

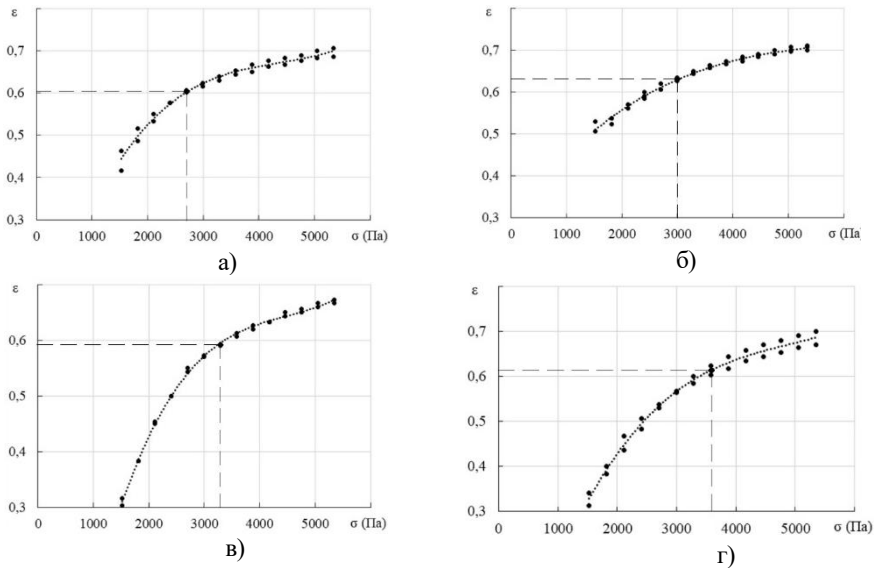


Рис. 6. Криві залежності деформації зразка від прикладеного напруження отримані в ході опрацювання досліджень реологічних властивостей м'якушки батона: а) за температури зразка 60 °С, границя міцності 2700 Па; б) за температури зразка 50 °С, границя міцності 3000 Па; в) за температури зразка 40 °С, границя міцності 3300 Па; г) за температури зразка 30 °С, границя міцності 3600 Па

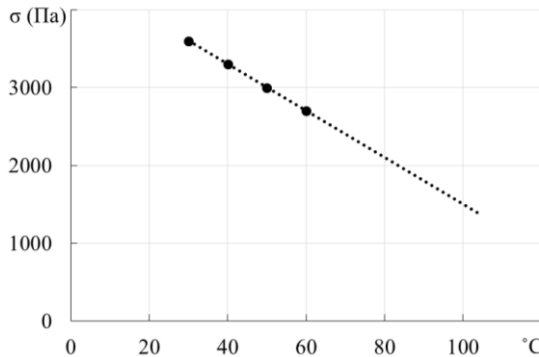


Рис. 7. Графік залежності границі міцності від температури

Опираючись на дослідні дані, можна стверджувати, що максимальна швидкість 4,5 кПа/с є оптимальною. Реологічні властивості та газова проникність скоринки ($0,32 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$) дають змогу скоротити час охолодження батона з декількох годин до 66 с (рис. 8, крива 2). Збільшення швидкості зниження тиску у вакуумній камері є недоцільним, оскільки це призведе до утворення надлишкового градієнту тиску між середовищем всередині батона та середовищем у вакуумній камері, який

перевищить границю міцності м'якушки. Це, у свою чергу, призведе до відриву м'якушки від нижньої скоринки, що не відповідає вимогам якості згідно з ДСТУ.

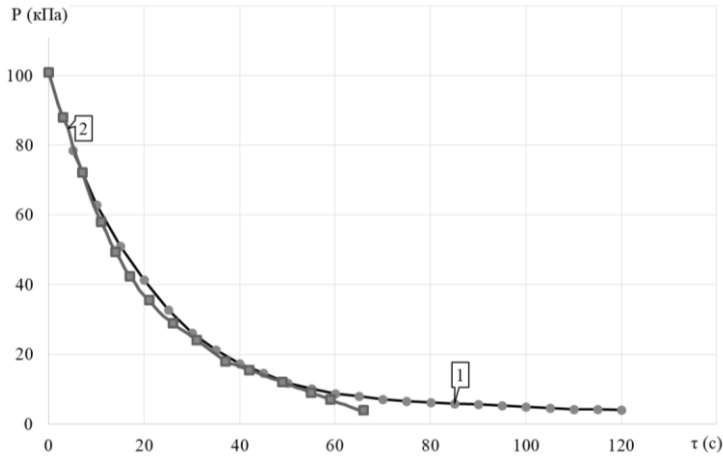


Рис. 8. Криві створення розрідження у вакуум-камері: 1 — режим вакуумного способу охолодження батона, знайдений дослідним шляхом; 2 — розрахунковий режим вакуумного способу охолодження батона

Висновки

1. Розроблено методику проведення досліджень з визначення реологічних властивостей м'якушки хлібобулочних виробів.

2. Визначено значення границі міцності м'якушки батона та залежність зміни її значення від температури. При температурі 100 °С границя міцності становить 1500 Па, а при 30 °С — 3600 Па. Цю залежність можна виразити у вигляді рівняння: $\sigma = 30t + 4500$, де t — температура (°С); σ — границя міцності м'якушки батона (Па).

3. Розраховано режим зміни тиску в часі у вакуум-камері, при якому градієнт тиску між парою у виробі, що охолоджується, та навколишнім середовищем не перевищує значення границі міцності при відповідній температурі. Максимальна швидкість зміни тиску в часі дорівнює 4,5 кПа/с, а тривалість процесу вакуумного охолодження батона за такого режиму складає 66 с.

Література

Козак, О. С., Теличкун, В. І. (2023). Визначення газової проникності скоринки та м'якушки батона в процесі вакуумного охолодження. *Харчова промисловість*, 33—34, 62—70. Взято з: <https://dspace.nuft.edu.ua/items/d7802b3b-c9a8-4ac2-8888-e1899063439d>.

Клапатюк, М., Ковальов, О., Федорів, В. (2014). Зеовас вакуумне охолодження — технологія майбутнього. *Наукові здобутки молоді — вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: 80 Міжнародна наукова конференція молодих учених, аспірантів і студентів, 10—11 квітня К.: НУХТ, 2014. Ч. 2. С. 28—30. Взято з https://dspace.nuft.edu.ua/bitstream/123456789/22290/2/80_2.pdf.*

Ajani, C. K., Zhu, Z., & Sun, D. W. (2022). In situ investigation of cellular water transport and morphological changes during vacuum cooling of steamed breads. *Food Chemistry*, 381, 132211. Взято з: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132211>.

Ajani, C. K., Zhu, Z., & Sun, D. W. (2023). Shrinkage during vacuum cooling of porous foods: Conjugate mechanistic modelling and experimental validation. *Journal of Food Engineering*, 337, 111220. Взято з: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111220>.

Everington, D. (2003). Vacuum technology for food processing. *Food Technology International Europe*, 5, 71—74.

Gao, J., Wang, Y., Dong, Z., & Zhou, W. (2018). Structural and mechanical characteristics of bread and their impact on oral processing: a review. *International Journal of Food Science and Technology*, 53, 858—872. Взято з: <https://doi.org/10.1111/ijfs.13671>.

Guo, Z., Song X., Song, Z., Liu, B. (2018). An improved method of immersion vacuum cooling for small cooked pork: Bubbling Vacuum Cooling. *International Journal of Food Science and Technology*, 53, 2748—2753. Взято з: https://login.research4life.org/tacsgr1doi_org/10.1111/ijfs.13918.

Kinner, M., Rüegg, R., Weber, C., Buchli, J., Durrer, L., Müller, N. (2021). Impact of selected baking and vacuum cooling parameters on the quality of toast bread. *J. Food Sci. Technol.*, 58, 4578—4586. Взято з: <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04945-x>.

McDonald, K. (2001). The formation of pores and their effects in a cooked beef product on the efficiency of vacuum cooling. *Journal of Food Engineering*, 47, 175—183. Взято з: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00111-4](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00111-4).

Primo-Martin, C., Beukelaer, H., Hamer, R. J., Vliet, T. (2008). Fracture behaviour of bread crust: Effect of bread cooling conditions. *Journal of Food Engineering*, 89, 285—290. Взято з: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.05.005>.

Peng, Y., Cheng, W. (2017). Experimental investigation on the effect of heat transfer enhancement of vacuum spray flash evaporation cooling using Al₂O₃-water nanofluid. *Energy Procedia*, 142, 3766—3773. Взято з: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.274>.

Wang, N., Kan, A., Huang, Z., Lu, J. (2020). CFD simulation of heat and mass transfer through cylindrical *Zizania latifolia* during vacuum cooling. *Heat Mass Transfer*, 56, 627—637. Взято з: <https://doi.org/10.1007/s00231-019-02736-5>.

Zhu, Z., Li, Y., Sun, D. W., & Wang, H. W. (2018). Developments of mathematical models for simulating vacuum cooling processes for food products — a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(5), 715—727. Взято з: https://login.research4life.org/tacsgr1doi_org/10.1080/10408398.2018.1490696.

Zhang, Z., Zhang, Y., Su, T., Zhang, W., Zhao, L., Li, X. (2014). Heat and Mass Transfer of Vacuum Cooling for Porous Foods-Parameter Sensitivity Analysis. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 8 pages. Взято з: <https://doi.org/10.1155/2014/613028>.

Zhu, Z., Li, T., & Sun, D. W. (2020). Pressure-related cooling and freezing techniques for the food industry: fundamentals and applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(17), 2793—2808. Взято з: https://login.research4life.org/tacsgr1doi_org/10.1080/10408398.2020.1841729.

USE OF VEGETABLE RAW MATERIALS IN THE TECHNOLOGY OF FLOUR CONFECTIONERY PRODUCTS IN RESTAURANT INDUSTRY

O. Kyrpichenkova, T. Sylchuk, I. Sylka

National University of Food Technologies

Key words:

*Flour confectionery
Buttery whipped cookies
Organoleptic indicators
Structural and mechanical properties
Vegetable raw materials
Dietary fibers
Emulsifiers
Pectin*

ABSTRACT

One of the directions for improving the technology of flour confectionery products is to increase the nutritional value, expand the assortment, improve the quality of finished products and extend the shelf life. For this purpose, it is effective to use vegetable raw materials, in particular hydrolyzed carrot puree, together with a complex mixture of emulsifiers "Ester M 02" in the technology of butter whipped cookies.

The influence of technological factors on the formation of the structural and mechanical properties of the emulsion was studied so as to establish the optimal parameters of the technological process of dough preparation using carrot puree. Food fibers of carrot puree give the foam film increased structural viscosity and mechanical strength. So that to increase the stability of the emulsion, to stabilize it during the period of possible downtime, it is proposed to introduce into the composition of the emulsion surface-active substances as part of the complex mixture of emulsifiers "Ester M 02".

It was determined that the optimal dosage of hydrolyzed carrot puree is 10—15% by mass of the emulsion. The introduction of this amount of additive helps to increase the density of the emulsion by 2.9—4.4% and to reduce the loss of the volume of the emulsion mass during the aging period.

Forms of moisture bonding in the tested cookie samples were investigated. The amount of osmotically and adsorptively bound moisture increases by 44 and 14.5%, respectively.

As a result of the combined use of hydrolyzed carrot puree and a complex mixture of emulsifiers "Ester M 02", the structural and mechanical properties of the emulsion, finished products, organoleptic quality indicators and nutritional value of the finished products are improved, the shelf life of the products is extended.

Article history:

Received 09.07.2024

Received in revised form
23.07.2024

Accepted 07.08.2024

Corresponding author:

O. Kyrpichenkova

E-mail:

oknikir@gmail.com

Citation: Кирпиченкова О. М., Сильчук Т. А., Силка І. М. (2024). Використання рослинної сировини в технології борошняних кондитерських виробів у закладах ресторанного господарства. *Наукові праці НУХТ*, 30(4), 100—110.

DOI: 10.24263/2225-2924-2024-30-4-10

ВИКОРИСТАННЯ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ В ТЕХНОЛОГІЇ БОРОШНЯНИХ КОНДИТЕРСЬКИХ ВИРОБІВ У ЗАКЛАДАХ РЕСТОРАННОГО ГОСПОДАРСТВА

О. М. Кирпіченкова, Т. А. Сильчук, І. М. Силка

Національний університет харчових технологій

Одним із напрямків удосконалення технології борошняних кондитерських виробів є підвищення харчової цінності, розширення асортименту, покращення якості готових виробів і подовження термінів зберігання. Ефективним є використання рослинної сировини, зокрема гідролізованого морквяного пюре, разом з комплексною сумішшю емульгаторів «Естер М 02» в технології здобного збивного печива.

У статті досліджено вплив технологічних факторів на формування структурно-механічних властивостей емульсії для встановлення оптимальних параметрів технологічного процесу приготування тіста з використанням морквяного гідролізованого пюре. Харчові волокна морквяного пюре певною мірою надають пльвіці піни підвищену структурну в'язкість і механічну міцність. Для збільшення стійкості емульсії, стабілізації її в період можливого простою запропоновано введення до складу емульсії поверхнево-активних речовин у складі комплексної суміші емульгаторів «Естер М 02».

Визначено, що оптимальне дозування морквяного гідролізованого пюре складає 10—15% до маси емульсії. Внесення такої кількості добавки сприяє збільшенню густини емульсії на 2,9—4,4% та зменшенню втрати об'єму маси емульсії протягом періоду витримки. Проаналізовано форми зв'язку вологи у досліджуваних зразках печива. Кількість осмотично та адсорбційно зв'язаної вологи зростає на 44 і 14,5% відповідно.

Унаслідок сумісного використання морквяного гідролізованого пюре та комплексної суміші емульгаторів «Естер М 02» покращуються структурно-механічні властивості емульсії, готових виробів, органолептичні показники якості та харчова цінність готових виробів, подовжується термін зберігання виробів.

Ключові слова: *борошняні кондитерські вироби, здобне збивне печиво, органолептичні показники, структурно-механічні властивості, рослинна сировина, харчові волокна, емульгатори, пектин.*

Постановка проблеми. Комбіноване здобне збивне печиво з різноманітними оздоблювальними напівфабрикатами є популярним у гостей закладів ресторанного господарства, оскільки надає можливість створювати широкий асортимент виробів за рахунок використання різних варіантів начинок і покриттів виробів. За рецептурним складом і технологічним процесом виробництва здобне збивне печиво відноситься до виробів з проміжною вологістю. До цієї ж групи виробів відносяться пряники, кекси тощо. Борошняні кондитерські вироби з проміжною

вологістю (від 12 до 30%) хоча й користуються стабільним попитом, проте ця група виробів має недоліки: обмежений термін зберігання, низьку харчову та біологічну цінність. Тому актуальним є питання підвищення харчової цінності, покращення їх якості та подовження термінів зберігання, що дасть змогу збільшити привабливість виробів для виробників і споживачів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо, що в раціон харчування людини мають бути включені харчові волокна — целюлоза, геміцелюлози, пектин, які є фізіологічно важливими компонентами їжі, що запобігають виникненню багатьох хвороб людини. Цей полісахаридний комплекс сприяє профілактиці хронічних інтоксикацій, виводить з організму важкі і токсичні елементи, залишкові пестициди, радіонукліди, нітрати, нітрити і таким чином очищує організм, зокрема знижує вміст холестерину. Потреба населення в харчових волокнах складає 25...30 г/добу, причому задовольняється вона лише на 30...35% за рахунок вживання борошна грубого помелу, крупів, овочів і фруктів (Курпиченкова та ін., 2023).

У сучасних умовах рослинна, плодоовочева сировина використовується у рецептурах борошняних кондитерських виробів (БКВ) для поліпшення споживчих властивостей виробів, підвищення їх харчової і біологічної цінності, подовження термінів зберігання, розширення асортименту продукції. Останнім часом особливий інтерес викликає розроблення нових видів виробів з використанням рослинної сировини, збагачених харчовими волокнами (Кирпиченкова, Іванов, & Ганущак, 2021; Ertas, & Aslan, 2020). Продукти переробки овочевої сировини є концентратами вихідної сировини, містять цілий комплекс надзвичайно корисних для людини речовин і виступають як джерела харчових волокон, вітамінів, мінеральних речовин. Цю групу сировини використовують для виробництва хлібобулочних виробів (Шевченко, Літвинчук, & Дробот, 2022).

Відомі способи приготування борошняних кондитерських виробів оздоровчої, лікувально-профілактичної дії, показано можливість використання при виготовленні БКВ як добавок пюре і соку з моркви, β -каротину, порошоків з дикорослих ягід (Дорохович, 2020; Іщенко, & Мацук, 2016).

Науковцями проведено аналіз шляхів подовження терміну зберігання БКВ, для яких домінуючим фактором у процесі зберігання є десорбційні процеси. Надано рекомендації, зокрема додавання вологоутримуючих компонентів (гідроколоїдів, продуктів із рослинної сировини, що багаті пектинами та клітковиною); застосування емульгаторів (Пилипенко, & Кохан, 2023).

Досліджено властивості овочевих напівфабрикатів, зокрема гарбузових цукатів, підварок і порошоків, і бісквітних виробів з їх використанням. Розроблений новий бісквітний напівфабрикат, що має високу харчову цінність і функціональні властивості. Зроблено висновки, що поєднання білків і поліцукрів гарбузової сировини надає можливість отримати композиційні структуроутворювачі, що характеризуються широким спектром технологічних властивостей (Філь, 2011). Досліджено властивості печива з суміші пшеничного, мигдального борошна та морквяного порошоків при зберіганні в сухих і вологих умовах. Визначено, що погіршення умов зберігання не вплинуло на вміст вітамінів та якість печива протягом семи тижнів зберігання завдяки антиоксидантним властивостям складових сировини (Dinnah, Guyih, & Eke, 2020).

Дослідники також розглядали використання пюре з авокадо як заміника жиру у виробництві печива та кексів для збагачення виробів харчовими волокнами. Визначено вплив пюре з авокадо на структурно-механічні властивості виробів та їх харчову цінність. Зроблено висновки, що розроблені вироби мають кращі органолептичні показники, набухання, більший вміст харчових волокон (Adeyeye, Bolaji, & Emun, 2022; Pokatong, & Nathalie, 2021).

Для сповільнення черствіння борошняних кондитерських виробів, покращення їх текстури використовують емульгатори і фосфати. Лецитини і фосфатидні концентрати, моно- і дигліцериди жирних кислот, утворюючи і стабілізуючи емульсію, також зв'язують воду, не даючи їй випаровуватися в атмосферу. Як наслідок, зберігається консистенція вихідного виробу і подовжується його свіжість. Як вологоутримуючий агент для борошняних кондитерських виробів виробники використовують гліцерин, сорбіт, такі гідроколоїди, як агар, альгінати, пектини, особливо низькомоетаксильовані, різноманітні марки карбоксиметилцелюлози (Оболкіна, Олексієнко, & Федюнок, 2019).

Поверхнево-активні речовини широко використовуються у виробництві борошняних кондитерських виробів — печива, крекерів, вафель, бісквітів, кексів, праників та інших виробів. Як ПАР використовуються природні речовини: білки тваринного та рослинного походження (ячний, молочний, соєвий білок, желатин), сапоніни, лецитини, деякі поліцукриди, а також продукти хімічної модифікації природних речовин і синтетичні емульгатори (Оболкіна, Букшина, & Гурєєва, 2019).

На підставі аналізу останніх публікацій можна зробити висновок про доцільність застосування овочевої пектиновмісної сировини та комплексних сумішей емульгаторів з метою стабілізації структури здобного печива, покращення його якісних показників і подовження термінів зберігання.

Мета статті: дослідження ефективності використання морквяного гідролізованого пюре та комплексної суміші емульгаторів «Естер М 02» в технології здобного збивного печива для підвищення харчової цінності, покращення якості та подовження терміну зберігання виробів.

Матеріали і методи. Об'єктом дослідження була технологія здобного збивного печива. Предметом дослідження обрано морквяне гідролізоване пюре (МПП) (Крапивницька, 2012), комплексна суміш емульгаторів «Естер М 02», яку виробляє науково-виробниче підприємство «Електрогазхім».

Паста для кондитерських виробів «Естер М 02» являє собою однорідний, в'язкий, білий кремоподібний гель з масовою часткою води 65%. Це водна дисперсія ПАР із загущеним дисперсійним середовищем. Вона складається з Е475 (ефіри полігліцерина і жирних кислот), Е477 (ефіри пропіленгліколя і жирних кислот), Е1520 (пропіленгліколь), Е471 (моно- і дигліцериди жирних кислот), Е470 (солі жирних кислот (алюмінію, кальцію, натрію, магнію, калію, амонію)), Е330 (лимонна кислота), цукор, вода. Дозування її становить від 1,5 до 3,0% до загальної маси виробу. Використовують при виробництві кексів та печива (Оболкіна, & Букшина, 2012; Шебунько, 2012).

Стійкість емульсії визначали методом центрифугування при частоті обертів 3000 об/хв протягом 5 хв за кількістю видалення водної фази до загальної маси зразка, % та згідно з методикою за допомогою мірного циліндра ємністю 25 або

50 см³, спостерігаючи за швидкістю відшарування жиру протягом 1,5—2 год (Дорохович, & Ковбаса, 2015).

Густину маси визначали волюмометрично шляхом зважування маси у тарувальному стаканчику об'ємом 31,43 см³ при температурі 25 °С. Форми зв'язку вологи у досліджуваних зразках визначали методом термогравіметричного аналізу на приладі «Дериватограф Q-1500» За зміною швидкості видалення вологи та величин теплових ефектів аналізували характер процесів, які відбувалися при прогріві досліджуваних зразків.

Для визначення кількості вологи з різними формами зв'язку застосовували метод диференційованого термічного аналізу. Аналіз проводили за методикою проф. Острякова у вигляді логарифмічної залежності ступеня перетворення α (відношення виділеної вологи до її загальної кількості) — залежність — $\lg\alpha$, до величини оберненої температури — $10^3/T$.

Енергію активації, що показує надлишкову кількість енергії, якою повинна володіти молекула, щоб розпочалось хімічне перетворення обраховували за такою формулою:

$$E=R(b/a), \quad (1)$$

де R — універсальна газова стала, рівна 0,0083 кДж/моль К.

Викладення основних результатів дослідження. Сучасна тенденція до зменшення калорійності та підвищення харчової цінності кондитерських виробів потребує удосконалення технології здобного збивного печива за рахунок застосування нетрадиційної сировини з підвищеним вмістом БАР і комплексних поліпшувачів. З метою підвищення харчової цінності та стабілізації структури тістових напівфабрикатів для БКВ доцільно до їх рецептурного складу додавати овочеві пюре з підвищеним вмістом пектину, зокрема МГП (Йовбак, Кирпіченкова, & Крапивницька, 2013).

Популярністю у гостей закладів ресторанного господарства користуються вироби на основі бісквітного та пісочного напівфабрикатів з вмістом цукру 20—30% та жиру 25—35% (у пісочному напівфабрикаті), 8—15% (у бісквітно-масляному напівфабрикаті). Для бісквітних напівфабрикатів характерний обмежений термін зберігання, що пов'язано зі швидкою зміною структури внаслідок втрати вологи.

Технологія приготування тіста для здобного бісквітного печива відіграє важливу роль в утворенні структури напівфабрикатів і готових виробів. Проведено комплекс досліджень з впливу технологічних факторів на властивості тістових напівфабрикатів для здобного печива з додаванням МГП та на якість готових виробів.

Аналіз уніфікованих рецептур на здобне печиво показав, що для нового покоління відсаджувальних машин рецептури потребують удосконалення. Як контрольний зразок була обрана рецептура напівфабрикату типу «масляний бісквіт», яка містить зменшену кількість жиру порівняно зі здобним пісочно-відсадним печивом «Ромашка» та зменшену кількість меланжу порівняно зі здобним бісквітно-збивним печивом «Квіточка» (табл. 1).

При приготуванні тіста для збивного печива з використанням нової рослинної сировини частку меланжу замінювали на МГП (по сухих речовинах) та збивали з цукром до отримання стійкої піноподібної емульсії.

Таблиця 1. Рецептурний склад здобного пісочного, бісквітно-збивного та бісквітно-масляного печива

Найменування сировини	Кількість сировини до рецептурного складу, кг		
	Здобне пісочно-відсадне печиво «Ромашка»	Здобне бісквітно-збивне печиво «Квіточка»	Бісквітно-масляний напівфабрикат
Борошно пшеничне, в/с	43,5	39,4	43,5
Цукрова пудра	25,3	34,2	25,3
Меланж	8,5	26,2	20,2
Маргарин	22,4	—	10,6
Ароматизатор	0,2	0,2	0,2
Сода харчова	0,1	—	0,2
Всього:	100,00	100,00	100,00

Здобне збивне печиво відноситься до групи кондитерських виробів з проміжною вологістю, для яких притаманні десорбційні процеси під час зберігання (Дорохович та ін., 2012). Тому при створенні нової технології здобного комбінованого печива були застосовані технологічні прийоми і сировинні компоненти, що сприяють утриманню вологи у зв'язаному стані у тістовому напівфабрикаті. Для перевірки ефективності заходів щодо уповільнення процесу черствіння здобного печива був проведений комплекс досліджень з визначення змін структурно-механічних властивостей виробів у процесі їх зберігання.

Оцінку органолептичних показників якості збивного здобного печива з додаванням МГП здійснювали за такими показниками: флейвор, колір, структура. Встановлено, що оптимальне дозування морквяного гідрозізованого поре, при якому досягається поліпшення споживчих властивостей виробу, складає 5—10%, при внесенні МГП більше, ніж 15% з'являється специфічний морквяний присмак, погіршується структура.

Бісквітне тісто з ПАР має в два рази більшу в'язкість порівняно з тістом без ПАР. Це пояснюється тим, що ПАР знижують поверхнєве натягання на межі розділу двох фаз, дають змогу виробляти велику кількість повітря за короткий час і більш рівномірно диспергувати його. Крім того, дисперсність повітря в тісті, приготованому з ПАР, значно більша. Так, вміст повітряних бульбашок розміром від 20 до 100 мкм в тісті, приготованому на ПАР, в 1,3 раза більше порівняно з тістом без ПАР, а повітряні бульбашки розміром більше 200 мкм відсутні. Попередні дослідження вченими питання тиксотропного відновлення бісквітного тіста підтверджують, що тісто, приготоване з ПАР, стійкіше до механічних дій (перемішування, перекачування) порівняно з тістом, приготованим за уніфікованою рецептурою без ПАР. Тож процес приготування тіста легше здійснити у разі його приготування з ПАР, оскільки таке тісто характеризується міцнішою структурою (Оболкіна, Букшина, & Гуреєва, 2019).

Важливою технологічною властивістю для бісквітного тіста як піни є в'язкість, оскільки вона виконує роль структурно-механічного бар'єра при утворенні та руйнуванні піноподібної структури, зумовлює її щільність і тривалість існування, стабільність. При недостатньо високій в'язкості утворення пухирців повітря в об'ємі тіста при його збиванні відбувається швидко і при малих затратах енергії,

однак при цьому плівки дисперсійного середовища легко руйнуються надлишковим тиском повітря. Надлишкова ж в'язкість погіршує транспортування та знижує розвиток внутрішньої поверхні системи в бісквітному тісті і його підйом при випіканні.

Фіксація піноподібної структури бісквітного тіста відбувається на стадії випікання. При випіканні тістової маси спостерігається розвиток пористої структури та зниження щільності виробу, зниження вологості виробу та змінення забарвлення поверхні. Під час випікання відбувається денатурація білків, підігрівання та клейстеризація крохмалю; розширення пухирців повітряної фази, розрив і злиття частини цих пухирців; втрата вологи з поверхні виробу за рахунок випаровування з міграцією вологи до поверхні та подальшим виходом в атмосферу печі.

Ряд факторів впливає на стійкість і стабілізацію піни, а саме: концентрація і природа піноутворювача, температура, в'язкість дисперсійного середовища, рН середовища, поверхневий натяг розчинів. Стійкість піни визначається механічними властивостями адсорбційних шарів, що утворюються на поверхні їх пухирців. Ці шари, додаючи плівці піни високу структурну в'язкість і механічну міцність, створюють пружний каркас, який надає піні визначені фізико-механічні властивості твердого тіла. Тобто для одержання стабільної піни необхідні дві умови: наявність поверхнево-активних речовин і підведення необхідної кількості енергії.

Тісто для здобного збивного печива являє собою складну дисперсну систему, реологічні властивості якої визначаються властивостями дисперсійного середовища — емульсії та показників якості пшеничного борошна. Якість тістового напівфабрикату залежить від структурно-механічних властивостей емульсії — в'язкості, відносної густини та стійкості піни. Були проведені дослідження впливу технологічних факторів на формування структурно-механічних властивостей емульсії-піни для збивного печива для встановлення оптимальних параметрів технологічного процесу приготування тіста з використанням морквяного гідролізованого поре (табл. 2).

Таблиця 2. Параметри технологічного процесу приготування емульсії

Показник	Контроль (без добавок)	5 % пектиновмісного поре	10 % пектиновмісного поре
Вологість емульсії, %	30,1	31,1	32,3
Тривалість витримки, хв	60	60	60
Густина емульсії (після збивання), кг/м ³	520	535 (+2,9%)	543 (+4,4%)
Зниження об'єму маси за 60 хвилин, %	30,0	10,0 (-66%)	6,0 (-80%)

Найбільш імовірно, що збільшення густини емульсії відбувається внаслідок збільшенням її в'язкості завдяки зв'язуванню вільної вологи емульсії харчовими волокнами МГП — низькоетерифікованим пектином і клітковиною.

Стійкість піни визначається структурно-механічними властивостями адсорбційних шарів, що утворюються на поверхні пухирців. Харчові волокна, що знаходяться у МГП, надають плівці піни підвищену структурну в'язкість і механічну

міцність, тобто створюють пружний каркас.

У сучасних умовах з нестабільним електропостачанням іноді трапляються несподівані перерви в технологічному процесі. Для того, щоб зробити піну емульсії більш стійкою, стабілізувати її в період простою, необхідно ввести до складу плівки, що огортає повітряні кульки, поверхнево-активні речовини.

Комплексна суміш емульгаторів «Естер М 02» містить моно- і дигліцериди жирних кислот, які мають підвищену піноутворювальну здатність. Оптимальним є дозування 2,5% до маси емульсії. Збільшення дозування емульгаторів призводить до збільшення густини емульсії.

Експериментальним шляхом відпрацьовано та сформовано ключові стадії виробництва здобного збивного печива, обґрунтовано технологічні режими його приготування та розроблена рецептура виробів (табл. 3).

Таблиця 3. Рецептурний склад здобного збивного печива

Найменування сировини	Вміст сухих речовин, %	Витрати сировини, кг
Борошно пшеничне, в/с	85,5	43,5
Цукрова пудра	99,85	25,3
Меланж	27,0	9,2
Морквяне гідролізоване пюре	15,0	11,0
КСЕ «Естер М 02»	75,0	2,5
Маргарин	86,0	8,1
Ароматизатор	—	0,2
Сода харчова	50,0	0,2
Всього:		100,0

Тісто для здобного збивного печива готується у дві стадії. При приготуванні піноподібної емульсії меланж збивається з цукровою пудрою, морквяним пюре, емульгатором протягом 18,5±0,5 хв. До збитої маси додається розтоплений маргарин з температурою 38—40 °С і обережно перемішується протягом 1—1,5 хв, в останню чергу додається пшеничне борошно та змішується з емульсією протягом 1—2 хв МЧВ — 24,5 %. Тістові заготовки формуються методом відсаджування, випікаються при температурі 200—220 °С протягом 10—12 хв, охолоджуються та перешаровуються желейної начинкою. МЧВ випеченого БМН — 14,5 %.

У процесі зберігання здобного збивного печива швидкість видалення вологи залежить від форм зв'язку вологи, тому проведено дослідження з визначення стану вологи у здобному печиві з додаванням гідролізованого морквяного пюре в поєднанні з КСЕ «Естер М 02».

Аналіз експериментальних даних (рис.1) показав, що в печиві з МГП і комплексною сумішшю емульгаторів «Естер М 02» міститься більше осмотично і адсорбційно зв'язаної вологи.

У зразку з КСЕ «Естер М 02» і МГП осмотичної вологи більше, ніж у контролі на 44%, адсорбційної вологи полімолекулярних шарів — на 14,5%.

Отже, аналіз дериватограм здобного збивного печива дає підстави зробити висновки, що використання МГП сприяє зростанню кількості більш міцно зв'язаної вологи порівняно з контролем, що забезпечує якість виробів протягом зберігання.

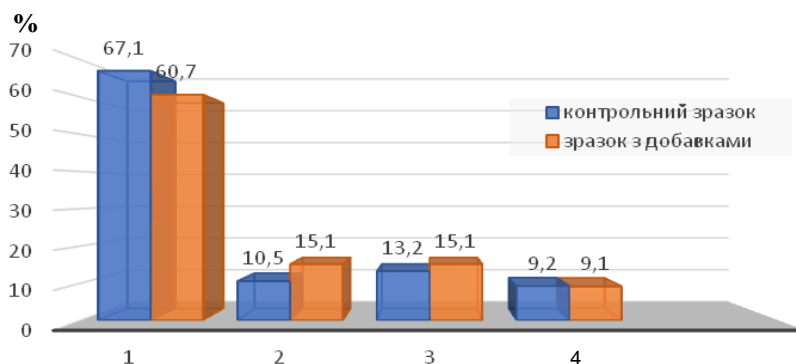


Рис. 1. Вміст вологи в зразках збивного здобного печива: 1 — вільна волога, %; 2 — осмотично зв'язана волога, %; 3 — волога адсорбційна полімолекулярних шарів, %; 4 — волога адсорбційна мономолекулярних шарів, %

Втрата вологи протягом трьох місяців зберігання здобного печива з додаванням МГП та КСЕ «Естер М 02» становить 2,4%, тобто до його рівноважного стану, що корелює з попередніми даними.

Аналіз харчової цінності розробленого печива наведено в табл. 4

Таблиця 4. Аналіз харчової цінності здобного збивного печива

Назва показників	Одиниці вимірювання	Значення показників якості		Відхилення, ±%
		Контрольний зразок	Печиво з МГП та КСЕ	
Вміст білка	г/100 г	7,95	6,72	-15,47
Вміст жиру	г/100 г	12,92	11,63	-9,98
Вміст вуглеводів	г/100 г	62,6	61,03	-2,51
Вміст пектину	мг/100 г	0	0,24	+240
Вміст клітковини	мг/100 г	0,05	0,26	+80
Калорійність	ккал/100 г	398,0	376,0	5,5

Розроблене печиво має калорійність меншу на 5,5%, збільшений вміст пектину та клітковини.

Висновки

Обґрунтовано технологію здобного збивного печива з використанням морквяного гідролізованого поре та комплексної суміші емульгаторів «Естер М 02».

Доведено, що додавання МГП та комплексної суміші емульгаторів «Естер М 02» збільшує стійкість емульсії-піни завдяки створенню пружного каркасу адсорбційних шарів на поверхні пухирців повітря, який надає пливці піни підвищену структурну в'язкість і механічну міцність.

На підставі термографічного аналізу визначено, що додавання МГП та комплексної суміші емульгаторів «Естер М 02» сприяє збільшенню осмотично і адсорбційно зв'язаної вологи у БМН для комбінованого здобного печива у 1,35 раза та збільшує енергію її активації у 1,15 раза, ніж у контрольному зразку.

Розроблено рецептуру бісквітно-масляного напівфабрикату для комбінованого здобного печива з підвищеною харчовою цінністю, поліпшеними органолептичними показниками, подовженим терміном зберігання. Його впровадження у виробництво сприятиме розширенню асортименту борошняних кондитерських виробів покращеного нутрієнтного складу у закладах ресторанного господарства.

Література

Дорохович, А. М., Дорохович, В. В., Бадрук, В. В., Мурзін, А. В., Абрамова, А. Г., & Естремська, Я. С. (2012). Дослідження сорбційних та десорбційних властивостей цукрів і цукрозамінників, прогнозування їхнього впливу на процеси під час зберігання кондитерських виробів. *Обладнання та технології харчових виробництв: темат. зб. наук. пр. Донецького національного університету економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського*, 29, 276—284.

Дорохович, В. В. (2020). *Доцільність застосування продуктів переробки моркви для надання функціональних властивостей діабетичним бісквітам і кексам*. Харчові добавки. Харчування здорової та хворої людини: матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції. Прага.

Дорохович, В. В., & Ковбаса, В. М. (Ред.) *Технологія та лабораторний практикум кондитерських виробів і харчових концентратів*: навч. посіб. Київ: Фірма «Інкос». (2015).

Іщенко, Н. В., & Мацук, Ю. А. (2016). Використання дикорослої сировини у виробництві бісквітних напівфабрикатів. *Науковий вісник Полтавського університету економіки і торгівлі*, 1(78), 36—44.

Йовбак, У. С., Кирпиченкова, О. М., Оболкіна, В. І., & Крапивницька, І. О. (2013). Застосування пектиновмісної овочевої сировини при виробництві комбінованих борошняних кондитерських виробів. *Обладнання та технології харчових виробництв: тематич. збірник наук. праць*, 30, 69—75.

Кирпиченкова, О. М., Іванов, Т. В., & Ганущак, В. В. (2021). Розробка борошняного напівфабрикату оздоровчого призначення для закусок. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*. 2. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2021-2-6882>.

Лебеденко, Т. Є., Соколова, Н. Ю., & Кожевнікова, В. О. (2014). Ефективність використання пектинвмісної дикорослої сировини у хлібопеченні. *Зб. наук. пр. ОНАХТ*, 46 (1), 121—127.

Оболкіна, В. І., Букшина, Л. С., & Гурєєва, В. С. (2019). Комплексні суміші емульгаторів і стабілізаторів для кондитерських виробництв. *Пекарня та кондитерська*, 1—2, 8—9.

Оболкіна, В. І., Олексієнко, Н. В., Крапивницька, І. О., & Федонюк, А. В. (2019). Як подовжити строк придатності борошняних, кондитерських виробів. *Світ продуктів*, 2, 26—28.

Пилипенко, А. Ф., & Кохан, О. О. (2023) Тривалість зберігання, як складова частина конкurentоспроможності кондитерської продукції. *Світ упаковки*, 1, 28—31.

Шебунько, С. (2012). Інгрєдєнти і технології від «Електрогазохіму». *Всеукраїнська галузева газета Харчовик*, 10(159), 1—5.

Шевченко, А. О., Літвинчук, С. І., & Дробот, В. І. (2022). *Конформаційні перетворення в тісті з борошном з насіння гарбуза для хлібобулочних виробів з пшеничного борошна*. Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті Євроінтеграції: ХІ Міжнародна науково-технічна конференція. Київ: НУХТ.

Філь, М. І. (2011). *Формування якості гарбузових напівфабрикатів і готових бісквітних виробів з їх використанням*. (Дис. канд. техн. наук). Львівська комерційна академія. Львів.

Adeyeye, S. A. O., Bolaji, O. T., Abegunde, T. A., & Emun, H. O. (2022). Quality evaluation and acceptability of cookies produced from wheat (*Triticum aestivum*) flour substituted with avocado puree as fat substitute. *Nutrition & Food Science*, 53(4).

Dinnah, A., Guyih, M. D., & Eke, O. M. (2020). Vitamin Content and Storage Studies of Cookies Produced from Wheat, Almond and Carrot Flour Blends. *Asian Food Science Journal*, 15(3), 31—41. <https://doi.org/10.9734/afsj/2020/v15i330154>.

Ertas, N., & Aslan, M. (2020). Antioxidant and physicochemical properties of cookies containing raw and roasted hemp flour. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*, 19(2), 177—184. doi:10.17306/j.afs.0795.

Kyrpichenkova, O., Sylchuk, T., Zuiko, V., Nazar, M., Tsyrunnikova, V., Tyshchenko, O., Bortnichuk, O. (2023). Implementation of new technology of confectionery products in restaurant establishments. *Journal of Hygienic Engineering and Design*, 44, 3—7.

Pokatong, W. D. R., & Nathalie, T. (2021). Partial Substitution of Margarine with Avocado Fruit Puree for Healthy Pound Cake Preparation using Various Flour Types and Baking Methods. *Reaktor. Chemical Engineering Journal*, 21(1), 15—26. doi:10.9734/afsj/2020/v15i330154.

APPLICATION OF FLAX SOURDOUGH SPONTANEOUS FERMENTATION IN RUSTIC BREAD PRODUCTION

Ie. Godunko, A. Zabroda, Yu. Bondarenko, O. Bilyk

National University of Food Technologies

Key words:

*Rustic bread,
Flax sourdough
Lactic acid bacteria
Spontaneous fermentation
Dough
Flax seeds*

Article history:

Received 03.07.2024
Received in revised form
19.07.2024
Accepted 13.08.2024

Corresponding author:

O. Bilyk
E-mail:
bilyklena@gmail.com

Citation: Годунко Є. В.,
Заброда А. В., Бондарен-
ко Ю. В., Білик О. А.
(2024). Застосування лян-
ної закваски спонтанного
бродиння у виробництві
рустикального хліба. *Нау-
кові праці НУХТ*, 30(4),
111—131.
DOI: 10.24263/2225-2924-
2024-30-4-11

ABSTRACT

The growing consumer interest in rustic bakery products, as well as the desire of industrial manufacturers to produce products with exclusive taste and aromatic profiles, leads to an increased use of spontaneous fermentation sourdoughs in bread production.

In this study, crushed flax seeds of the "Svitlozir" variety were used to create a spontaneous fermentation sourdough. It was found that the cycle for creating flax sourdough with a moisture content of 65—67% and acidity of 8—10 degrees took 72 hours and included three refreshments with a nutrient mixture. The main nutrient substrate for the microflora of the flax sourdough was the carbohydrate complex of flax, represented by water-soluble polysaccharides (neutral arabinoxylan and acidic rhamnogalacturonan). It was established that spontaneous flax sourdough did not have leavening power and in the dough system functioned as a sourdough acidifier, carrier of flavor and aromatic compounds. There are also physiologically functional ingredients in it contained in flax.

In the production cycle of spontaneous flax sourdough, it is recommended to refresh 50% of the mature sourdough with an equivalent amount of a nutrient mixture made of crushed flax and water every 24 hours of fermentation. The recommended dosage of spontaneous flax sourdough for wheat bread production is up to 20% of the flour weight.

Adding crushed flax seeds as part of the sourdough contributed to obtaining products with more intense flavor and aromatic properties, improved crumb elasticity and structure, and caused better shape stability of the products. The use of flax sourdough helped reduce crumb crumbliness during storage.

The application of 20% flax sourdough and 5% flax seeds to the flour weight in the production of rustic bread allows the products to gain functional properties and meet 47% of the daily requirement for polyunsaturated fatty acids and 36% of the daily requirement for dietary fiber when consuming the daily norm of bread in Ukraine — 277 g.

ЗАСТОСУВАННЯ ЛЛЯНОЇ ЗАКВАСКИ СПОНТАННОГО БРОДІННЯ У ВИРОБНИЦТВІ РУСТИКАЛЬНОГО ХЛІБА

Є. В. Годунко, А. В. Заброда, Ю. В. Бондаренко, О. А. Білик
Національний університет харчових технологій

Зростання інтересу споживачів до рустикальних хлібобулочних виробів, а також прагнення індустриальних виробників до освоєння випуску продукції, що має ексклюзивні смакові та ароматичні профілі, призводять до збільшення застосування заквасок спонтанного бродіння у виробництві хліба.

Для виведення закваски спонтанного бродіння використано подрібнене насіння льону сорту «Світлозір». Встановлено, що цикл розведення лляної закваски вологістю 65—67% та кислотністю 8—10 град становить 72 год та передбачає три поновлення поживною сумішшю. Основним живильним субстратом для мікрофлори лляної закваски є вуглеводний комплекс льону, представлений водорозчинними полісахаридами (нейтральний арабіноксилан та кислий рамногалактуронан). Встановлено, що спонтанна лляна закваска у тістовій системі виконуватиме функції закваски-підкислювача, носія смакових та ароматичних сполук, а також фізіологічно-функціональних інгредієнтів, що містяться в льоні.

У виробничому циклі введення спонтанної лляної закваски передбачено здійснювати поновлення 50% стиглої закваски еквівалентною кількістю поживної суміші з подрібненого льону та води кожні 24 год ферментації. Рекомендоване дозування лляної закваски спонтанного бродіння для виробництва пшеничного хліба становить до 20% до маси борошна.

Внесення подрібненого насіння льону у складі закваски сприяє отриманню виробів з більш інтенсивними смако-ароматичними властивостями, покращеною еластичністю та структурою м'якушки, формостійкістю виробів. Застосування лляної закваски сприяє зменшенню кришкуватості м'якушки під час зберігання.

Застосування у виробництві рустикального хліба 20% до маси борошна лляної закваски та 5% лляного насіння надає виробам функціональних властивостей і задовольняє добову потребу в поліненасичених жирних кислотах на 47% та харчових волокнах на 36% при споживанні добової норми хліба в Україні — 277 грам.

Ключові слова: рустикальний хліб, лляна закваска, молочнокислі бактерії, спонтанне бродіння, тісто, насіння льону.

Постановка проблеми. Тенденція споживання корисних і здорових харчових продуктів, що відзначається в сучасному суспільстві, дала поштовх активному розвитку виробництва рустикальних хлібобулочних виробів. Поняття «рустикальний хліб» об'єднує такі вироби, як ремісничі, артизанські (сільські), домашні, виготовлені вручну. За уявленнями споживачів такий хліб більш корисний, безпечний і смачний (Kumar, Talwar, Murphy, Kaur, & Dhir, 2021; Aprile, Caputo, & Nayga Jr., 2016; Lingham, Hill, & Manning, 2022; Maurice, Saint-Eve, Pernin, Leroy, & Souchon, 2022).

У приготуванні тіста для рустикальних хлібобулочних виробів переважно використовують закваски. При цьому розрізняють закваски, що мають високу бродильну активність і виконують функції біологічного розпушувача для тіста без рецептурного внесення дріжджів, та закваски, що не мають бродильної активності, тому їх застосовують у рецептурі дріжджових хлібобулочних виробів для підвищення кислотності тіста та як носій смакових та ароматичних речовин (De Vuyst, Vrancken, Ravvts, Rimaux, & Weckx, 2009).

Традиційно у виробництві хлібобулочних виробів застосовують закваски з пшеничного і житнього борошна, однак зростаючий інтерес до виробів, що виготовленні з додаванням інших видів борошна, призвів до диверсифікації ринку хлібобулочних виробів і необхідності застосування заквасок з нетрадиційної для хлібопекарського виробництва сировини, адже відомо, що закваски, виготовлені з інших видів борошна, є ефективним технологічним заходом для покращання й урізноманітнення сенсорних характеристик хлібобулочних виробів.

Одним із видів нетрадиційної сировини, який включають до рецептур хлібобулочних виробів з підвищеною харчовою цінністю та функціональними властивостями, є насіння льону.

Відомо, що ціле насіння льону (сухе, гідратоване, пророщене), а також продукти його переробки (борошно, шрот, подрібнене насіння різних фракцій) застосовують у виробництві широкого асортименту хлібобулочних виробів (Bondarenko та ін., 2019; Бондаренко, Білик, Кочубей-Литвиненко, & Андронович, 2020; Дробот, Іжевська, Тесля, & Бондаренко, 2016; Краєвська, & Піддубний, 2023; Jiang, Wang, & Zhou, 2022; Codina & Mironeasa, 2016; Marpalle, Sonawane, & Arya, 2014). Поряд з цим актуальним є проведення досліджень щодо використання насіння льону як сировини для отримання закваски спонтанного бродіння для виготовлення рустикального хліба.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Виробництво рустикальних хлібобулочних виробів, зазвичай, організують у пекарнях, однак, зважаючи на зростаючий попит на такі вироби, в останні роки їх потокове виробництво налагоджують також на потужних індустріальних підприємствах завдяки встановленню спеціалізованих ліній.

Характерними ознаками рустикального хліба є хрустка, жорстка, добре забарвлена скоринка, нерівномірно пориста м'якушка, неідеальна форма. Рустикальні хлібобулочні вироби відрізняються від традиційних виробів промислового виробництва своєю унікальністю смаку, аромату й текстурою м'якушки. Поверхня таких виробів може бути оздоблена різними видами посипок або мати надрізи як прості, так і у вигляді більш складних візерунків. Випікання рустикальних виробів традиційно здійснюють у печах з кам'яним подом, а технологія базується на довготривалому процесі бродіння тіста або застосуванні заквасок (Hamelman, 2021; Лебеденко, Новічкова, Соколова, Місержи, & Тулейбич, 2011).

Застосування закваски у виробництві хлібобулочних виробів є давнім технологічним заходом для розпушення тіста та надання особливого смаку й аромату виробам.

Закваска — це напівфабрикат хлібопекарського виробництва, який отримують зброджуванням суміші з борошна та води молочнокислими бактеріями й дріжджами (De Vuyst та ін., 2014). Під дією цих мікроорганізмів у напівфабрикатах

відбувається процес спиртового і молочнокислого бродіння. У результаті утворюються такі продукти, як етиловий спирт, діоксид вуглецю (забезпечують розпушення тіста), органічні кислоти (зумовлюють підкислення тіста та запобігають мікробіологічному псуванню виробів), а також інші сполуки, що сприяють формуванню еластичної м'якучки, сповільнюють черствіння та забезпечують неповторний насичений аромат готових виробів (Gänzle, 2014).

До ХХ ст. закваску використовували як єдиний розпушувач тіста для отримання хліба з розвинуеною м'якучкою. Однак розвиток в кінці ХІХ ст. промислового виробництва хлібопекарських дріжджів зумовив їх впровадження у виготовлення хлібобулочних виробів як розпушувача тіста, що сприяло спрощенню технологічного процесу виробництва хлібобулочних виробів. До середини ХХ ст. хлібопекарські дріжджі як біологічний розпушувач тістових напівфабрикатів замінюють закваску у промисловому виробництві хліба, за винятком виробів з житнього борошна, для яких підкислення тіста закваскою є технологічною необхідністю для інгібування амілаз, а також виробів, що випікали в дрібних кустарних пекарнях (Cappelle, Guylaine, Gänzle, & Gobetti, 2023; Gänzle, & Zheng, 2019).

Останніми десятиліттями хлібобулочні вироби, виготовленні з використанням заквасок, набувають популярності серед споживачів і тому зараз їх випікання здійснюється не тільки в умовах ремісничих виробництв, а й у масштабах індустріальних підприємств від малої до великої потужності. Наприклад, в європейських країнах від 30 до 50% від всього обсягу виробленого хліба припадає на вироби, виготовлені з використанням заквасок (Gobetti, Minervini, Pontonio, Di Cagno, & De Angelis, 2016). Однією з причин цього є те, що сьогодні закваску розглядають не тільки з позиції її біотехнологічних властивостей як розпушувача та підкислювача тіста, а також з позиції виявлених у ній функціональних властивостей покращувача харчової та фізіологічної цінності хлібобулочних виробів. Використання заквасок сприяє зниженню глікемічного індексу готових виробів, покращанню біодоступності основних нутрієнтів, синтезу нових корисних речовин (вітамінів, пептидів, похідних амінокислот, *екзополісахаридів*), підвищенню засвоєння мінеральних речовин, зниженню вмісту антихарчових речовин. Науковці відзначають, що засвоюваність хліба, виготовленого на заквасці, підвищується на 16%, порівняно з хлібом, виготовленим на хлібопекарських дріжджах (*Saccharomyces cerevisiae*) (D'Amico та ін., 2023; Kulathunga, Whitney, & Simsek, 2023; Fernández-Peláez, Paesani, & Gómez, 2020).

Вивчення заквасок з мікробіологічної точки зору почалося лише сто років тому. Сьогодні, за протоколом біотехнології отримання заквасок, їх, зазвичай, поділяють на три типи: закваски першого типу — це закваски, отримані внаслідок спонтанного самовільного бродіння, зумовленого мікрофлорою сировини, з якою замішаний напівфабрикат. Виведення закваски цього типу потребує щоденного поновлення напівфабрикату, що спонтанно забродив, живильним середовищем з борошна та води для підтримання активного метаболічного стану мікроорганізмів для досягнення закваскою прийнятних для випікання хліба органолептичних і фізико-хімічних показників. Процес виведення такої закваски залежить від виду сировини та параметрів навколишнього середовища і, зазвичай, триває 4—15 днів. Закваски цього типу застосовувалися у хлібопеченні до ХХ століття. Сьогодні такі

закваски готують у пекарнях малої потужності для крафтового виробництва хлібобулочних виробів. Недоліком закваски цього типу є те, що спонтанна мікробіота закваски не завжди може забезпечити контрольований перебіг бродіння напівфабрикатів. Закваски другого типу — це закваски, виготовлені з використанням ідентифікованих чистих культур молочнокислих бактерій і штамів дріжджів. За цього способу закваску виводять за розробленими технологічними інструкціями, що дає змогу отримати закваску зі стабільними прогнозованими та контрольованими показниками якості. Процес виведення заквасок цього типу триває 24—120 год. Ці закваски застосовують у промисловому виробництві хлібобулочних виробів. Закваски третього типу виробляють сушінням заквасок першого і другого типу, що надає можливість зберігати їх тривалий час і забезпечує зручність їх транспортування (Arora, 2021; Arslan-Tontul, Çetin-Babaoğlu, Aslan, & Tontul, 2024).

В Україні в традиційному промисловому виробництві хліба застосовують закваски, які готують з пшеничного й житнього борошна з використанням чистих культур молочнокислих бактерій і дріжджів. При цьому потрібно відзначити, що основною метою використання заквасок з пшеничного борошна (концентровані молочнокислі закваски, мезофільні молочнокислі закваски тощо) є підвищення кислотності тіста, надання більшої еластичності м'якушці (вона стає більш вологою на дотик), створення більш вираженого молочнокислого смаку й аромату хліба, розпушення тіста, зниження криштоватості та уповільнення черствіння виробів, запобігання ураження хліба картопляною хворобою. Житні закваски використовують для підвищення кислотності тіста із суміші житнього і пшеничного борошна, що є технологічно обґрунтованим для зниження активності амілолітичних і протеолітичних ферментів, які є активними в житньому тісті; для розпушення тіста (повного або часткового), формування реологічних властивостей тіста, створення смаку й аромату хліба та подовження термінів свіжості виробів (Mukhonik, & Hetman, 2022).

Сьогодні ринкові тенденції щодо розширення асортименту хлібобулочних виробів з покращеною харчовою цінністю, смаком і ароматом та/або з автентичними ознаками розширює застосування заквасок у виробництві хліба. Якщо раніше основною функцією заквасок було забезпечення процесів бродіння в тісті, то зараз закваски розглядаються як носій ароматичних і смакових сполук, а також поживних речовин, корисних для здоров'я, та як підкислювач, а процеси бродіння в тісті за їх використання будуть забезпечені рецептурним внесенням хлібопекарських дріжджів. Нині закваски використовуються в більшості європейських хлібобулочних виробів з першочерговою метою покращання якості хліба та його функціональних властивостей (Gänzle, & Zheng, 2019). Завдяки такому підходу в практиці хлібопечення та науковій літературі для виготовлення виробів з особливим смаком, високою поживною цінністю, збагачених фізіологічно-функціональними інгредієнтами, рекомендують використовувати закваску, отриману з нетрадиційної для хлібопекарського виробництва сировини (Rizzello, Coda, & Gobbetti, 2016). Такі закваски, як правило, застосовуються у виробництві хліба на пекарнях малої потужності, на яких перевага надається закваскам спонтанного бродіння внаслідок того, що процес її виведення не потребує купівлі чистих культур мікроорганізмів, а також забезпечується дискретність виробництва, економію виробничих площ і устаткування. Закваски спонтанного бродіння широко застосовують для

національних хлібобулочних виробів, виготовлених за автентичними технологіями. Наприклад, технологія традиційного італійського хліба Altamura базується на використанні закваски спонтанного бродіння з борошна твердих сортів пшениці, процес виведення якої передбачає не менше трьох поновлень, а в її складі ідентифіковано гетероферментативні молочнокислі бактерії *L. plantarum*, *L. Casei* і *paracasei*. Автентичний португальський хліб Broa виготовляють на заквасці спонтанного бродіння з суміші житнього та кукурудзяного борошна. В країнах Балтії, Скандинавії, Німеччині поширеним у хлібопеченні є застосування заквасок спонтанного бродіння з житнього борошна, а у Франції — з пшеничного борошна (Arora, 2021; Rocha, & Malcata, 2012; Ricciardi, Parente, Piraino, Paraggio, & Romano, 2005).

Протягом останнього десятиліття науковцями розкрито потенціал широкого переліку нетрадиційних для хлібопекарського виробництва видів сировини для виведення заквасок спонтанного бродіння та їх застосування у виготовленні хліба. Хороші результати отримано за використання у складі заквасок спонтанного бродіння зернових культур (ячмінне, вівсяне, рисове, просяне, кукурудзяне, соргове та тефове борошно), псевдозернових (борошно гречки, амаранту, кіноа), бобових (квасолеве, горохове, нутове, сочевичне, люпинове борошно), олійних культур (конопляне борошно) (De Vuyst, Comasio, & Kerrebroeck, 2021). Поряд з цим відзначено, що в літературі обмаль інформації щодо застосування в біотехнології закваски такої цінної з точки зору вмісту фізіологічно-функціональних інгредієнтів олійної культури як насіння льону.

Останнім часом насіння льону набуло значної популярності серед споживачів завдяки доведеній позитивній дії його складових (α -ліноленової кислоти, лігнану, водорозчинних харчових волокон, токоферолу) у профілактиці серцево-судинних, онкологічних захворювань, діабету тощо або для покращання стану здоров'я при цих захворюваннях (Goyal, Sharma, Upadhyay, Gill, & Sihag, 2014; Mueed, Shibli, Jahangir, Jabbar, & Deng, 2023; Li та ін., 2023; Hirst, Dibrov, Hirst, & Pierce, 2023).

У заквасках спонтанного бродіння із злакових і псевдозлакових культур основним живильним субстратом для спонтанної мікробіоти є вуглеводна складова, представлена крохмалем і продуктами його гідролізу. Насіння льону відноситься до олійних культур і особливістю його вуглеводного складу є те, що він практично не містить крохмаль, а представлений в основному водорозчинним полісахаридним комплексом, що складається з нейтрального арабіноксилану (75%), що містить переважно ксилозу, арабінозу, галактозу, та кислого рамногалактуронану (25%), що складається з рамнози, галактози, галактуренової кислоти (Bernacchia, Preti, & Vinci, 2014).

Мета дослідження: дослідити процес виведення закваски спонтанного бродіння з подрібненого насіння льону та її використання у виготовленні хліба.

Матеріали і методи. Для досліджень використано жовтонасінневий льон сорту «Світлозір» отриманий від Інституту олійних культур (Україна). Насіння льону мало вологість 10% та олійність 48%, при цьому в олії вміст α -ліноленової поліненасиченої жирної кислоти становив 68—70%. Насіння льону перед використанням подрібнювали в лабораторному млині ЛЗМ-1 (Україна), який призначений

для подрібнення лабораторних проб зерна сільськогосподарських культур та інших твердих харчових продуктів вологістю не вище 18%.

На всіх етапах ведення закваски (цикл розведення і виробничий) оцінювали її кислотність (5 г закваски розтирають з 50 см³ дистильованої води до однорідної суспензії в порцеляновій ступці, куди додають 3—5 краплин 1% спиртового розчину фенолфталеїну та титрують розчином NaOH 0,1 моль/дм³ до появи світло-рожевого забарвлення, що не зникає 20—30 с) (Alkay, Alkay, Dertli, Kökten, & Durak, 2023), підймальну силу (відважують 10 г закваски, додають до неї 10 г борошна пшеничного 2 сорту, замішують тісто, яке поділяють на 2 шматки по 10 г, які заковують у кульки та опускають у стакан з водою температурою 35 °С, який поміщають у термостат з такою ж температурою; фіксують час у момент опускання кульок у стакан і в момент їх спливання. Цей проміжок часу у хвилинах і є підйальною силою напівфабрикату; розбіжність між паралельними визначеннями не повинна перевищувати 2 хв та органолептичні властивості (смак та запах).

У готовій заквасці визначали активність молочнокислих бактерій: 20 г закваски змішують із 40 см³ води, нагрітої до температури 40 °С. Із суміші відбирають у дві пробірки по 10 см³. В одну пробірку (дослідну) додають 1 см³ 0,00-відсоткового водного розчину метиленового синього. Друга пробірка є контролем. Пробірки поміщають у термостат за температури 40 °С. Активність молочнокислих бактерій встановлюють за часом, необхідним для знебарвлення проби.

Проводили дві серії випікань хліба з лляною закваскою спонтанного бродіння: 1 — для встановлення рекомендованого дозування лляної закваски для отримання виробів належної якості; 2 — для встановлення ефективності внесення до складу хліба подрібненого насіння льону у складі закваски порівняно з використанням у рецептурі хліба подрібненого насіння льону, що не піддавалося ферментативній обробці.

Для встановлення рекомендованого дозування лляної закваски спонтанного бродіння у виробництві хліба проводили пробне лабораторне випікання. Зразки тіста замішували за такою рецептурою: борошно пшеничне вищого сорту 1000 г, дріжджі пресовані 30 г, сіль кухонна харчова 15 г. Контрольним був зразок без внесення закваски, у дослідні зразки додавали лляну закваску спонтанного бродіння у кількості 10%, 20%, 30% та 40% до маси борошна. Обраний діапазон дозування закваски є найбільш поширеним у разі застосування заквасок різних видів у виробництві хліба (Агога, 2021).

Для встановлення порівняльного впливу на якість хліба подрібненого насіння льону в ферментованому та неферментованому вигляді проводили замішування дослідного зразка тіста з дозуванням лляної закваски 20% до маси борошна (встановлено в першій серії випікань) та контрольного зразка з внесенням 7% до маси борошна подрібненого насіння льону (таке дозування подрібненого насіння льону відповідає його вмісту у 20% закваски та встановлено розрахунковим методом).

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 25—26 °С. Тісто залишали на бродіння протягом 90 хв (з однією обминкою через 60 хв) за температури 30—32 °С. Після бродіння тісто ділили на

шматки масою по 250 г, з яких формували тістові заготовки для 2 формових виробів та 1 подового, які поміщали на вистоювання у шафу вистоювання Sveba Dahlin AB DC-21 (Швеція) за температури 35—38 °С. Кінець вистоювання встановлювали органолептично. Вистояні тістові заготовки випікали у секційній печі Sveba Dahlin AB DC-21 (Швеція) при подачі пару (8 сек) за температури 200—220 °С протягом 28—32 хв (Бондаренко, Андронович, Білик, & Кочубей-Литвиненко, 2022).

Дослідження процесу бродіння у тісті проводили за аналізом динаміки виділення вуглекислого газу зі 100 г тіста за температури 30 °С протягом періоду, що включає тривалість бродіння тіста та вистоювання тістових заготовок. Для визначення цього показника користувалися волюмометричним методом контролю виділеного CO₂ за постійних температури й тиску (Verheyen, Albrecht, Elgeti, Jekle, & Becker, 2015; Munteanu та ін., 2019; Shevchenko, Drobot, & Galenko, 2022).

Готовий хліб аналізували через 3 год після випікання за органолептичними (стан поверхні, правильність форми, структуру пористості, еластичність, колір і розжовуваність м'якучки, аромат та смак) та фізико-хімічними показниками (питомий об'єм хліба, кислотність — арбітражним методом, пористість — методом аналізу цифрового зображення зрізу хліба) (Zhu, Sakulnak, & Wang, 2016; Hetman, Mykhonik, Kuzmin, & Shevchenko, 2021; Mannuramath, Yenagi, & Orsat, 2015; Петруша, Дащинська, & Шуліка, 2017).

Достовірність отриманих результатів забезпечувалася повторенням експериментів тричі. Отримані та представлені результати враховують середньоквадратичне відхилення; графічне представлення експериментальних даних проводили з використанням стандартних програм статистичної обробки — Microsoft Excel 2010.

Результати і обговорення. Технологія ведення будь-якої закваски передбачає цикл розведення та виробничий цикл. У циклі розведення закваски подрібнене насіння льону змішували з водою у співвідношенні 1:2. Вологість отриманої маси становила 65—67%. У заквасці спонтанного бродіння процес бродіння запускається спонтанною мікрофлорою, що потрапляє разом з сировиною, тому замішаний напівфабрикат залишали для ферментації в умовах приміщення за температури 23±2 °С та кожні 24 год до неї додавали поживну суміш з 50 г подрібненого насіння льону та 100 см³ води. Поновлення закваски здійснювали для накопичення її біомаси та вимивання з неї «дикої» мікрофлори, продукти життєдіяльності якої надають заквасці гіркий присмак і неприємний кислий запах. Цикл розведення тривав 72 години.

У виробничому циклі лляної закваски спонтанного бродіння кожні 24 год на поновлення залишали 50% стиглої закваски і додавали еквівалентну кількість поживної суміші з подрібненого насіння льону та води. Ферментацію проводили в умовах приміщення за температури 23±2 °С.

Схема виведення закваски спонтанного бродіння та її органолептичні й біотехнологічні показники наведено в табл. 1. Встановлено, що замішаний для отримання закваски спонтанного бродіння напівфабрикат з подрібненого насіння льону та води мав початкову кислотність 0,4 град. Через 24 год ферментації внаслідок процесів бродіння, зумовлених бродильною мікрофлорою, що спонтанно потрапила з подрібненим насінням льону, кислотність напівфабрикату підвищилася на

1,2 град. Після додавання до нього нової порції поживної суміші та 24 год бродіння підвищення кислотності спостерігалось на 4,4 град, на цій стадії відзначається найвищий стрибок кислотності, що свідчить про активний розвиток молочнокислих бактерій. Додавання нової порції поживної суміші та ще 24 год бродіння зумовили зростання кислотності закваски на 2—4 град.

Таблиця 1. Цикл розведення лляної закваски спонтанного бродіння та показники її якості (n=3, p≥0,95, δ=3...5%)

Стадія	Біотехнологічні показники	Органолептичні показники
1. Замішування фази 1: подрібнене насіння льону — 50 г вода — 100 г	Кислотність — 0,4 град Вологість — 65—67%	Запах — лляний Смак — властивий подрібненому льону
2. Через 24 год ферментації до фази 1 додають: подрібнене насіння льону — 50 г вода — 100 г	Через 24 год бродіння: Кислотність — 1,6 град Вологість — 65—67% Підймальна сила — відсутня	Запах — помірно лляний Смак — властивий подрібненому льону злегка кислуватий
3. Через 48 год ферментації до фази 2 додають: подрібнене насіння льону — 50 г вода — 100 г	Через 48 год бродіння: кислотність — 6,0 град Вологість — 65—67% Підймальна сила — відсутня	Запах — приємний молочний, злегка кислуватий Смак — помірно молочно-кислий
4. Через 72 год ферментації до фази 3 додають: подрібнене насіння льону — 50 г вода — 100 г	Через 72 год бродіння: Кислотність — 8—10 град Вологість — 65—67% Підймальна сила — відсутня	Запах — молочно-кислий, приємний Смак — виражений молочно-кислий кефірний

Органолептично закваска не значно збільшувалася в об'ємі, але на 48 та 72 год ферментації візуально мала вигляд розпушеної маси. Встановлено, що на всіх стадіях виведення закваски не відзначено формування неприємного присмаку та запаху, навпаки, спостерігалася позитивна динаміка: на першій стадії смак і запах були властиві льону подрібненому, на кожній наступній стадії ферментації проявлявся більш молочний присмак і запах. Закваска через 72 год ферментації мала приємний молочнокислий кефірний смак і запах.

З кожним підживленням закваски спонтанного бродіння покращується її склад, інтенсифікується життєдіяльність молочнокислих бактерій, що зумовлює підвищення кислотності закваски, пригнічується розвиток сторонньої мікрофлори, покращуються органолептичні показники якості закваски.

Зважаючи на хороші органолептичні показники якості закваски через 72 год бродіння та її кислотність 8—10 град подальший процес її виведення не проводили, адже це зумовлювало б зростання кислотності, що, у свою чергу, обмежувало б її дозування для випікання пшеничного хліба як носія фізіологічно-функціональних інгредієнтів.

За результатами досліджень виявлено, що спонтанна лляна закваска не здатна піднімати кульку тіста, що свідчить про низьку активність у ній дріжджової мікрофлори, тому вона не може виконувати функцію біологічного розпушувача тіста. Підвищення кислотності в заквасці вказує на активний розвиток у ній молочнокислих бактерій. Визначення активності молочнокислих бактерій на 72 год ферментації закваски показало, що знебарвлення проби лляної закваски у пробірці відбулося через 68 хвилин. Це свідчить про середню активність молочнокислих бактерій у лляній заквасці, що характерно для заквасок, які отримано без застосування чистих культур молочнокислих бактерій.

Можна припустити, що у складі мікрофлори закваски присутні молочнокислі бактерії видів *L. plantarum* і *L. brevis* як такі, що домінують у мікробіоті заквасок спонтанного бродіння (Agora та ін., 2021). *L. plantarum* є активним продуцентом молочної кислоти і невеликої кількості (до 10%) летких кислот. Крім того, *L. Plantarum* є інгібітором *B. subtilis*, які зумовлюють розвиток картопляної хвороби хліба. Молочнокислі бактерії *L. brevis*, порівняно з *L. plantarum*, продукують менше молочної кислоти і значно більше (до 30%) летких кислот, а також діоксид вуглецю, який бере участь у розпушуванні тістових напівфабрикатів (Ventimiglia та ін., 2015). Оскільки лляна закваска не виявляла підйімальної сили, але візуально розпушувалася, можливо, це відбувалося завдяки бактеріям *L. brevis*, але накопиченого ними вуглекислого газу було недостатньо для формування підйімальної сили закваски. Зважаючи на приємні запах та смакові властивості закваски — кислий молочно-кефірний, ймовірно, у складі молочнокислих бактерій переважають *L. plantarum*.

Під час приготування закваски внаслідок контакту подрібненого насіння льону з водою та протягом всього періоду ферментації водорозчинні полісахариди насіння льону екстрагуються у рідку фазу закваски і використовуються спонтанною мікрофлорою як джерело живлення. Відомо, що *L. plantarum* здатні метаболізувати пентози (ксилозу і арабінозу) і гексози (глюкоза, галактоза і рамноза) з утворенням молочної кислоти та невеликої кількості оцтової, які обумовлюють формування кислотності закваски та її ароматичного комплексу. Тому солюбілізація водорозчинних полісахаридів у заквасці із насіння льону та їх ферментативний і кислотний гідроліз сприяють забезпеченню умов для активного розвитку молочнокислих бактерій і швидкого накопичення біомаси закваски (Maidana та ін., 2020).

Отже, отримана лляна закваска не здатна виконувати функції біологічного розпушувача тістової системи для заміни в рецептурі пресованих дріжджів, але може застосовуватися як закваска-підкислювач. У дослідженнях (Bartkiene та ін., 2014) було відзначено, що лляна закваска, отримана із застосуванням чистих культур молочнокислих бактерій *P. acidilactici*, *P. pentosaceus*, *L. sakei*, характеризується значним накопиченням молочної та оцтової кислот, тому рекомендована для використання у виробництві дріжджового пшеничного хліба як підкислювач тіста, а не біологічний розпушувач.

Постійне підтримання виробничої кількості лляної закваски спонтанного бродіння здійснюється у виробничому циклі її виготовлення. Встановлено, що у виробничому циклі при поновленні 50% стиглої лляної закваски еквівалентною кіль-

кістю поживної суміші з подрібненого насіння льону та води, накопичення кислотності, встановленої для стиглої закваски 8—10 град, та формування приємних смакових та ароматичних властивостей досягається протягом 24 год ферментації (табл. 2).

Такий режим поновлення закваски підтримує мікрофлору закваски в активному метаболічному стані та раціональний для застосування на підприємствах малої потужності, що працюють в одну зміну.

Таблиця 2. Показники якості лляної закваски спонтанного бродіння у виробничому циклі (n=3, p≥0,95, δ=3...5%)

Стадія	Біотехнологічні показники	Органолептичні показники
Поновлення закваски: стигла закваска —150 г подрібнене насіння льону — 50 г вода — 100 г	Кислотність — 3,6—4,6 град Вологість — 65—67% Підймальна сила — відсутня	Запах — приємний лляний ледь кислуватий Смак — прісний лляний з легкою кислинкою
Через 24 год ферментації	Кислотність — 8—10 град Вологість — 65—67 % Підймальна сила — відсутня	Запах — молочно- кислий, приємний Смак — виражений молочно-кислий кефірний

Для проведення пробних лабораторних випікань хліба з лляною закваскою спонтанного бродіння використовували закваску, отриману у виробничому циклі з такими показниками якості: вологість 67%, кислотність 9,5 град.

Результати пробного лабораторного випікання щодо застосування лляної закваски спонтанного бродіння для випікання хліба наведено в табл. 3, фото готових виробів — на рис. 1.

Таблиця 3. Показники технологічного процесу та якості готових виробів (n=3, p≥0,95, δ=3...5%)

Найменування показника	Контроль	Дозування закваски, % до маси борошна			
		10	20	30	40
Тісто					
Тривалість бродіння, хв		90			
Вологість тіста, %	42,5	42,8	42,5	42,7	42,5
Кінцева кислотність тіста, град.	1,6	2,2	3,0	3,4	4,5
Тривалість вистоювання тістових заготовок, хв	60	53	50	45	45

Готові вироби					
Зовнішній вигляд	Форма правильна, гладка				
Колір скоринки	Світло-жовтий		Золотисто-жовтий з вкрапленнями частинок льону		
Колір м'якушки	Світла		Світла з кремовим відтінком		
Смак та аромат	Властивий пшеничному хлібу	Властивий пшеничному хлібу з легким присмаком льону	Властивий пшеничному хлібу з легким присмаком льону	Властивий пшеничному хлібу з відчутним присмаком льону, легкою кислотною	Властивий пшеничному хлібу з сильно вираженим присмаком льону та кислоти
Стан м'якушки	Еластична, не липка	Дуже еластична, не липка, ледь помітні вкраплення льону	Дуже еластична, не липка, ледь помітні вкраплення льону	Еластична, більш пружна, не липка, ледь помітні вкраплення льону	Еластична, більше пружна, не липка, ледь помітні вкраплення льону
Стан пористості	Середня, тонкостінна	Середня, тонкостінна	Середня, середня за товщиною стінки	Середня, середня за товщиною стінки	Крупна, товстостінна
Формостійкість, Н/Д	0,41	0,40	0,44	0,46	0,44
Питомий об'єм, см ³ /г	2,72	2,66	2,60	2,53	2,45
Пористість, %	74,0	74,0	73,0	72,0	71,0
Кислотність м'якушки, град.	1,3	2,0	2,4	3,0	3,4



Контроль 10 % 20 % 30 % 40 %

а



б

Рис. 1. Фото формового (а) та подового (б) хліба з лляною закваскою спонтанного бродіння

Під час проведення дослідження встановлено, що внесення лляної закваски зумовлює підвищення кінцевої кислотності тіста на 0,6—2,9 град відповідно до збільшення дозування закваски. Тривалість вистоювання тістових заготовок прискорюється на 7 та 10 хв за дозування закваски 10% та 20 % до маси борошна, на 15 хв за дозування 30% та 40% до маси борошна.

Внесення закваски, завдяки активній молочнокислій мікробіоті та підвищенню кислотності, прискорює процеси дозрівання тіста та вистоювання тістових заготовок.

Аналіз органолептичних показників якості хліба показав, що додавання лляної закваски сприяє значному покращанню еластичності м'якушки за дозування 10 та 20% до маси борошна, а збільшення дозування закваски зумовлює появу у м'якушці більш пружних властивостей. Поряд з цим відзначено, що внесення закваски зумовлює зміну структури пористості виробів, порівняно з контролем, вона стає середньою за товщиною пор при 20 та 30% до маси борошна закваски та крупною і товстостінною за дозування закваски 40% до маси борошна. У структурі м'якушки виробів із закваскою ледь помітні вкраплення частинок льону, внаслідок чого за її дозування 20% до маси борошна і більше м'якушка хліба набуває кремового відтінку.

Смакові властивості й аромат виробів з легким присмаком льону були властиві виробам за дозування 10 та 20% закваски, при збільшенні закваски до 30% вироби мали приємний більш виражений лляний присмак з відчутною кислинкою, а за дозування 40% вироби характеризувалися вже неприємним лляним присмаком з вираженим кислим смаком. Оцінювання смакових і ароматичних властивостей виробів через 3 год після випікання спонукали нас рекомендувати дозування лляної закваски 30% до маси виробів, як максимально можливе, що надає хороші смакові властивості виробів. Однак оцінювання виробів через 24 год зберігання виявило, що за цього дозування проявився неприємний більш виражений лляний і кислий присмак. Смак хліба і його аромат є важливими критеріями якості для споживача. У разі застосування заквасок у виготовленні хлібобулочних виробів важливо досягти гармонійного смаку, щоб уникнути, наприклад, надмірної кислотності (що сприймається як кислий або гострий смак), і при цьому посилити приємні смакові відтінки. Тому у разі застосування лляної закваски найбільш гармонійне сприйняття смаку було за дозування закваски 20% до маси борошна.

Оцінювання виробів за формостійкістю показало, що дозування закваски 20% до маси борошна і більше сприяє покращанню цього показника в середньому на 12%. Покращання формостійкості виробів може бути зумовлене більшим загущенням тістової системи розчинами водорозчинних полісахаридів насіння, що потрапляють у тісто разом із закваскою. Питомий об'єм виробів зменшувався порівняно з контролем, при дозуванні 10 та 20% до маси борошна закваски це зменшення було не значне та становило 2,1% та 4,5%, відповідно, а у зразках з 30 та 40% до маси борошна питомий об'єм зменшувався вже на 7 та 10%. Зменшення об'єму виробів з 30 та 40% закваски зумовлює зниження показника пористості.

Усі зразки хліба з закваскою мали вищу кислотність, порівняно з контролем, на 0,7—2,1 град відповідно до зростання її дозування у зразках, але в межах допустимой кислотності для пшеничних сортів хліба з борошна вищого сорту.

На підставі пробного лабораторного випікання хліба з борошна пшеничного вищого сорту з використання спонтанної лляної закваски було встановлено, що її рекомендоване дозування становить до 20% до маси борошна. За такого дозування отримують вироби, що мають приємні смакові властивості з легким присмаком льону, покращеною, порівняно з контролем без закваски, еластичністю м'якушки та формостійкістю виробів. У праці (Bartkiene та ін., 2014) зазначено, що в разі застосування лляної закваски, отриманої ферментуванням частково знежиреного подрібненого насіння льону чистою культурою одного із штамів молочнокислих бактерій (*P. acidilactici*, *P. pentosaceus*, *L. sakei*), у виробництві пшенично-лляного хліба, її допустиме дозування становить лише 10%. Це підтверджує, що спонтанна мікрофлора лляної закваски забезпечує формування таких біотехнологічних та органолептичних властивостей закваски, що сприяє більшому її дозуванню і, відповідно, підвищує збагачення хліба корисними речовинами льону.

Результати пробного лабораторного випікання щодо встановлення ефективності застосування у виготовленні хліба подрібненого насіння льону у складі закваски, порівняно з використанням у рецептурі хліба подрібненого насіння льону, що не піддавалося ферментативній обробці, наведено у табл. 4, фото готових виробів — на рис. 2.

Таблиця 4. Органолептичні та фізико-хімічні показники готових виробів (n=3, p≥0,95, δ=3...5%)

Найменування показника	Контроль з подрібненим насінням льону (7% до маси борошна)	З лляною закваскою спонтанного бродіння (20% до маси борошна)
Органолептичні показники		
Смак та аромат	Прісний, властивий пшеничному хлібу, з присмаком льону	Приємний, виражений, властивий пшеничному хлібу з легким присмаком льону
Зовнішній вигляд	Форма правильна, гладка	Форма правильна, гладка
Колір скоринки	Світло-жовтий	Світло-жовтий
Стан м'якушки	Еластична, не липка, ледь помітні крапління льону, пористість середня	Пружна та дуже еластична, не липка, ледь помітні крапління льону, пористість дрібна
Фізико-хімічні показники		
Вологість м'якушки, %	42,2	42,8
Формостійкість, Н/Д	0,4	0,47
Питомий об'єм, см ³ /г	2,76	2,65
Пористість, %	71	70
Кислотність м'якушки, град	1,3	2,4
Кришкуватість, через 48 год	2,4	1,2

Встановлено, що вироби, виготовлені з використанням лляної закваски, мають більш виражений і приємний пшенично-молочного смак з ледь помітним лляним присмаком, порівняно з контролем з подрібненим насінням льону. Цією серією випікань також було підтверджено, що внесення закваски сприяє формуванню більш

пружної та еластичної м'якушки виробів, що, з одного боку, зумовлено укріпленням клейковини через вищу кислотність тіста, а з іншого — впливом водорозчинних полісахаридів насіння льону, які, взаємодіючи з білками, утворюють комплекси та покращують еластичність. Відзначено, що у зразку із закваскою часточки льону внаслідок їх тривалої гідратації та ферментації у заквасці набухають і формують у м'якушці з іншими складовими рецептури практично однорідну масу та не відчувуються під час розжовування, на відміну від зразка з неферментованим подрібненим насінням льону, яке чітко ідентифікується у структурі м'якушки і хоча під час розжовування не відчувається, але, загалом, за структурою ця м'якушка більш сухіша при розжовуванні з прісним смаком і відчутним лляним присмаком. Застосування лляної закваски сприяє зменшенню кришкуватості м'якушки під час зберігання.

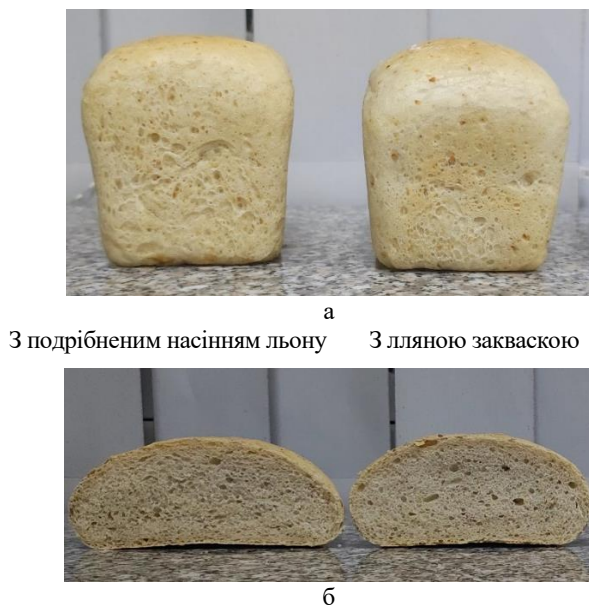


Рис. 2. Фото формового (а) та подового (б) хліба з подрібненим насінням льону та лляною закваскою спонтанного бродіння

Додавання до складу тіста лляної закваски зумовлює підвищення формостійкості виробів на 17%, напевно, тут також свій виразний вплив здійснили водорозчинні полісахариди насіння льону, які у заквасці вже перебувають в екстрагованому стані і активно вступають у зв'язки з білками пшеничного борошна, утворюючи комплекси, які покращують поверхневий натяг, на відміну від контрольного зразка, в якому полісахаридам насіння льону потрібен час для екстрагування у рідку фазу тіста. Крім того, підвищення кислотності тіста внаслідок внесення закваски сприяє певному укріпленню тістової системи. Внаслідок цього вироби на заквасці мали дещо менший об'єм. Кислотність хліба з лляною закваскою була вищою, порівняно з контролем, на 1,1 град.

Дослідження процесу бродіння в зразках тіста з ферментованим у заквасці та неферментованим подрібненим насінням льону за динамікою виділення вуглекислого газу (рис. 3) показало відмінний характер бродіння.

Для контрольного зразка з 90 хв бродіння спостерігається перебудова дріжджів на зброджування мальтози, що обумовлює двостадійний процес бродіння в тісті, в той час як для зразка з лляною закваскою характерним є одностадійний процес бродіння. Ймовірно, це пов'язано з тим, що з лляною закваскою в рідку фазу тіста вносяться екстраговані з льону під час ферментації закваски амінокислоти, продукти гідролізу полісахаридів, мінеральні речовини, які в тісті є додатковим живленням для дріжджів, унаслідок чого не виникає необхідності для дріжджових клітин перебудовуватися на зброджування мальтози.

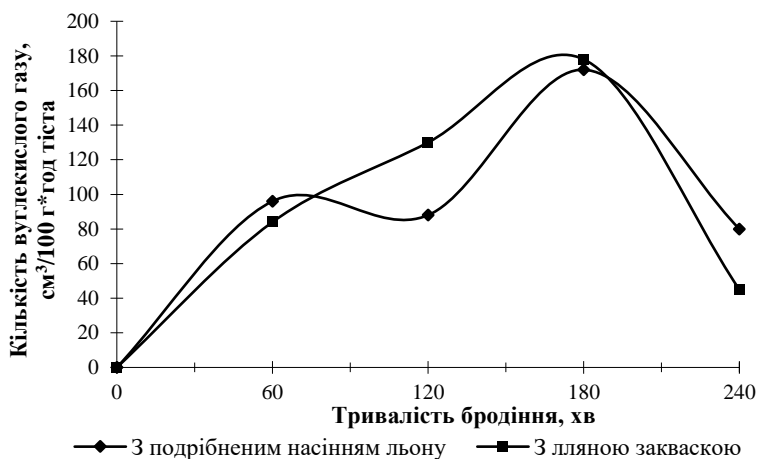


Рис. 3. Динаміка виділення вуглекислого газу в тісті з подрібненим насінням льону та лляною закваскою

Аналіз кривих динаміки виділення вуглекислого газу свідчить, що в обох зразках досягнення максимального виділення вуглекислого газу відбувається на 180 хв бродіння, при цьому в момент досягнення піку у зразку з лляною закваскою фіксується дещо більша кількість виділеного CO₂. Враховуючи такі закономірності бродіння тіста рекомендовано формування тістових заготовок здійснювати на 150 хв бродіння, щоб на операцію вистоювання тістових заготовок припадав період інтенсивного виділення вуглекислого газу для скорочення тривалості їх вистоювання та забезпечення формування хорошого об'єму виробів.

Отримані закономірності впливу лляної закваски на перебіг технологічного процесу та якість виробів були застосовані для виготовлення рустикального хліба з пшеничного борошна вищого сорту. У технології цього хліба лляна закваска спонтанного бродіння виконувала функції закваски-підкислювача та носія фізіологічно-функціональних інгредієнтів (поліненасичених жирних кислот, харчових волокон та ін.). Однак рекомендоване дозування закваски 20% до маси борошна забезпечує внесення лише 7% подрібненого насіння льону. За літературними даними для формування у виробі функціональних властивостей дозування льону у ре-

цептурному складі повинно становити не менше 10% до маси борошна, тому передбачено у виготовленні рустикального хліба поряд з 20% лляної закваски використовувати додатково ціле насіння льону у кількості 5% до маси борошна. Відповідно до вищезазначених рекомендацій тривалість бродіння тіста приймали 150 хв. Зважаючи, що внесення лляної закваски покращує формостійкість виробів, здійснювали формування тістових заготовок для подових виробів. Поверхню вистояних тістових заготовок перед посадкою у піч надрізували та посипали цілим насінням льону. Випікання здійснювали у печі з кам'яним подом. Випечені вироби за органолептичними показниками відповідали характеристикам рустикального хліба (рис.4).



а



б

Рис. 4. Фото рустикального хліба з лляною закваскою:
а — цілого; б — в розрізі

Виріб мав скоринку світло-коричневого кольору, жорстку з надрізами, тріщинами та посипану цілим насінням. М'якушка хліба дуже еластична, дещо пружна, з поодинокими включеннями цілого насіння льону, нерівномірною розвиненою пористістю. Подрібнене насіння льону, внесене з закваскою, у структурі м'якушки не помітне. Хліб мав дуже виражений пшенично-молочний запах і приємний смак з ледь помітним лляним присмаком. Розрахунковим методом встановлено, що споживання 277 г цього хліба задовольняє добову потребу в таких фізіологічно-функціональних інгредієнтах як поліненасичені жирні кислоти на 47% та харчові волокна на 36%, тобто представлений рустикальний хліб з лляною закваскою має функціональні властивості.

Отже, використання закваски спонтанного бродіння з подрібненого лляного насіння може додати унікальний смак та аромат рустикальним хлібобулочним виробам, розширити асортимент таких виробів, а також покращити їх харчову цінність завдяки збагаченню корисними речовинами, що містяться в льоні.

Висновки

У результаті проведених досліджень встановлено, що цикл розведення закваски спонтанного бродіння з подрібненого насіння льону становить 72 год за температури 23 ± 2 °C та передбачає три поновлення поживною сумішшю із подрібнено-

го насіння льону та води кожні 24 год бродіння. Готова лляна закваска характеризується приємним молочно-кислим запахом, вираженим молочно-кислим кефірним смаком з легким лляним присмаком, вологістю 65—67% та кінцевою кислотністю 8—10 град. Встановлено, що спонтанна лляна закваска у тістовій системі виконуватиме функції закваски-підкислювача, носія смакових та ароматичних сполук, а також фізіологічно-функціональних інгредієнтів, що містяться в льоні.

Для підтримання виробничої кількості лляної закваски спонтанного бродіння рекомендовано до 50% стиглої закваски додавати еквівалентну кількість поживної суміші з подрібненого насіння льону та води, проводити її ферментацію протягом 24 год в умовах приміщення за температури 23 ± 2 °C до кислотності, встановленої для стиглої закваски, 8—10 град. Такий режим поновлення закваски підтримує її мікрофлору в активному метаболічному стані та раціональний для застосування на підприємствах малої потужності, що працюють в одну зміну.

Встановлено, що рекомендоване дозування спонтанної лляної закваски для випікання хліба з борошна пшеничного вищого сорту становить до 20% до маси борошна.

Доведено ефективність використання подрібненого насіння льону ферментованого у заквасці, порівняно з використанням подрібненого насіння льону, що не піддавалося ферментації, для отримання виробів з кращими смако-ароматичними властивостями, структурою м'якушки та формостійкістю виробів.

У разі застосування лляної закваски спонтанного бродіння для приготування тіста відзначено, що процес його бродіння відбувається одностадійно, і рекомендована тривалість бродіння тіста становить 150 хв.

У виробництві рустикального хліба з використанням 20% до маси борошна спонтанної лляної закваски для підвищення в ньому вмісту фізіологічно-функціональних інгредієнтів льону в рецептуру додатково включено 5% лляного насіння, що задовольняє добову потребу у поліненасичених жирних кислотах на 47% та харчових волокнах на 36% при споживанні добової норми хліба.

Подяка

Дослідження виконане в рамках держбюджетної науково-дослідної роботи «Наукове обґрунтування та розроблення ресурсоефективних технологій харчової продукції цільового призначення як імператив продовольчої безпеки» 0123U102060.

Література

Бондаренко, Ю. В., Білик, О. А., Кочубей-Литвиненко, О. В., & Андронович Г. М. (2020). Насіння льону — рецептурний компонент хлібобулочних виробів. *Наукові праці НУХТ*, 26(4), 178—189.

Дробот, В., Іжевська, О., Тесля, О., & Бондаренко, Ю. (2016). Ефективність використання шроту насіння льону у хлібопекарській промисловості. *Продовольчі ресурси*, 4(07), 210—213.

Бондаренко, Ю., Андронович, Г., Білик, О., & Кочубей-Литвиненко О. (2022). Оптимізація параметрів замочування насіння льону для виробництва пшеничного хліба. *BIOTA. HUMAN. TECHNOLOGY*, 3, 100—109. doi: 10.58407/bht.3.22.9.

Краєвська, С., & Піддубний, В. (2023). Технологія крафтового житньо-пшеничного хліба з пророщеним насінням льону. *Товари і ринки*, 1, 100—112.

- Лебеденко, Т. Є., Новічкова, Т. П., Соколова, Н., Місержи, М. Д., & Тулейбич, О. М. (2011). Перспективи виробництва національних хлібобулочних виробів в умовах хлібозаводів та пекарень. *Харчова наука і технологія*, 1(14), 17—23.
- Петруша, О., Дашинська, О., & Шуліка, А. (2017). Розробка методу вимірювання пористості хлібобулочних виробів шляхом аналізу цифрового зображення. *Технологічний аудит і резерви виробництва*, 2(3(40)), 61—66. doi: 10.15587/2312-8372.2018.129520.
- Alkay, Z., Alkay, R., Dertli, E., Kökten, K., & Durak, M. Z. (2023). The rheological, textural and physicochemical properties of buckwheat sourdough bread prepared with different lactic acid bacteria strains. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 12(5), e5643. doi:10.55251/jmbfs.5643.
- Aprile, M. C., Caputo, V., & Nayga Jr., R. M. (2016). Consumers' preferences and attitudes toward local food products. *J. Food Prod. Market*, 22, 19—42. doi: 10.1080/10454446.2014.949990.
- Arora, K., Ameer 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. doi: 10.1016/j.tifs.2020.12.008.
- Arslan-Tontul S., Çetin-Babaoğlu H., Aslan M., & Tontul I. (2024). Evaluation of refractance window-dried type 3 sourdough as an alternative to liquid sourdough in bread production. *Journal of Cereal Science*, 116, 103882. doi: 10.1016/j.jcs.2024.103882.
- Bartkiene, E., Schleining, G., Juodeikiene, G., Vidmantienė D., Krungleviciute V., Rekestyte, T., ..., Maruska, A. (2014). The influence of lactic acid fermentation on biogenic amines and volatile compounds formation in flaxseed and the effect of flaxseed sourdough on the quality of wheat bread. *LWT*, 56(2), 445—450. doi: 10.1016/j.lwt.2013.11.033.
- Bernacchia, R., Preti, R., & Vinci, G. (2014). Chemical composition and health benefits of flaxseed. *Austin Journal of Nutrition and Food Science*, 2(8), 1045.
- Bondarenko, Yu., Bilyk, O., Mykhonik, L., Kochubei-Lytvynenko, O., Andronovich, G., & Hetman I. (2019). The use of golden flax seeds and oats sourbread in the production of wheat bread. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(11), 46—55.
- Cappelle, S., Guylaine, L., Gänzle, M., & Gobbetti, M. (2023). History and Social Aspects of Sourdough. Gobbetti, M., Gänzle, M. (Eds.). *Handbook on Sourdough Biotechnology*. (2 ed.). Switzerland: Springer Cham, 1—13. doi: 10.1007/978-3-031-23084-4.
- Codina, G., & Mironeasa, S. (2016). Use of response surface methodology to investigate the effects of brown and golden flaxseed on wheat flour dough microstructure and rheological properties. *Journal of Food Science and Technology*, 53, 1—10. doi: 10.1007/s13197-016-2387-5.
- D'Amico, V., Gänzle, M., Call, L., Zwirzitz, B., Grausgruber, H., D'Amico, S., & Brouns, F. (2023). Does sourdough bread provide clinically relevant health benefits? *Frontiers in Nutrition*, 10, 1—22. doi: 10.3389/fnut.2023.1230043.
- De Vuyst, L., Comasio, A., & Kerrebroeck, S. V. (2021). Sourdough production: fermentation strategies, microbial ecology, and use of non-flour ingredients. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(15), 2447—2479. doi: 10.1080/10408398.2021.1976100.
- De Vuyst, L., Van Kerrebroeck, S., Harth, H., Huys, G., Daniel, H.-M., & Weckx, S. (2014). Microbial ecology of sourdough fermentations: Diverse or uniform? *Food Microbiology*, 37, 11—29. doi: 10.1016/j.fm.2013.06.002.
- De Vuyst, L., Vrancken, G., Ravyts, F., Rimaux, T., & Weckx, S. (2009). Biodiversity, ecological determinants, and metabolic exploitation of sourdough microbiota. *Food Microbiol.*, 26(7). 666—675. doi: 10.1016/j.fm.2009.07.012.
- Fernández-Peláez, J., Paesani, C., & Gómez, M. (2020). Sourdough Technology as a Tool for the Development of Healthier Grain-Based Products: An Update. *Agronomy*, 10, 1962.
- Gänzle, M. G. (2014). Enzymatic and bacterial conversions during sourdough fermentation. *Food Microbiology*, 37, 2—10. doi: 10.1016/j.fm.2013.04.007.
- 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. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2018.08.019.

- Gobbetti, M., Minervini, F., Pontonio, E., Di Cagno, R., & De Angelis, M. (2016). Drivers for the establishment and composition of the sourdough lactic acid bacteria biota. *International Journal of Food Microbiology*, 239, 3—18. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2016.05.022.
- Goyal, A., Sharma, V., Upadhyay, N., Gill, S., & Sihag, M. (2014). Flax and flaxseed oil: an ancient medicine & modern functional food. *J. Food Sci. Technol.*, 51(9), 1633—1653. doi: 10.1007/s13197-013-1247-9.
- Hamelman, J. (2021). *A Baker's Book of Techniques and Recipes*. 3rd edition. Hoboken, New Jersey: Wiley.
- 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. doi: 10.24263/2304-974X-2021-10-3-6.
- Hirst, B. C., Dibrov, E., Hirst, S. D., & Pierce, G. N. (2023). Physiological and Pathological Considerations for the Use of Flaxseed as a Therapeutic Dietary Strategy. *Rev Cardiovasc Med.*, 24(5), 149. doi: 10.31083/j.rcm2405149.
- Jiang, X., Wang, X., & Zhou, Sh. (2022). Effect of flaxseed marc flour on high-yield wheat bread production: Comparison in baking, staling, antioxidant and digestion properties. *LWT*, 169, 113979. doi:10.1016/j.lwt.2022.113979.
- Kulathunga, J., Whitney, K., & Simsek, S. (2023). Impact of starter culture on biochemical properties of sourdough bread related to composition and macronutrient digestibility. *Food Bioscience*, 53, 102640. doi: 10.1016/j.fbio.2023.102640.
- Kumar, S., Talwar, Sh., Murphy, M., Kaur, P., & Dhir, A. (2021). A behavioural reasoning perspective on the consumption of local food. A study on REKO, a social media-based local food distribution system. *Food Quality and Preference*, 93, 104264. doi: 10.1016/j.foodqual.2021.104264.
- Li, L., Li, H., Gao, Y., Vafaei, S., Zhang, X., & Yang, M. (2023). Effect of flaxseed supplementation on blood pressure: a systematic review, and dose-response meta-analysis of randomized clinical trials. *Food Funct*, 14(2), 675—690. doi: 10.1039/d2fo02566c.
- Lingham, S., Hill, I., & Manning, L. (2022). Artisan food production: what makes food ‘artisan’. Dana, L. P., Ramadani, V., Palalic, R., & Salamazadeh, A. (Eds.). *Artisan and Handicraft Entrepreneurs: Past, Present, and Future* (first ed.). Switzerland: Springer Cham. doi: 10.1007/978-3-030-82303-0_6.
- Maidana, D., Finch, S., Garro, S., Savoy, M., Gänzle, G., & Vignolo, M. (2020). Development of gluten-free breads started with chia and flaxseed sourdoughs fermented by selected lactic acid bacteria. *LWT*, 125, 109189. doi: 10.1016/j.lwt.2020.109189.
- Mannuramath, M., Yenagi, N., & Orsat, V. (2015). Quality evaluation of little millet (*Panicum miliare*) incorporated functional bread. *Journal of Food Science and Technology*, 52(12), 8357—8363. doi: 10.1007/s13197-015-1932-y.
- Marpalle, P., Sonawane, S., & Arya, Sh. (2014). Effect of flaxseed flour addition on physicochemical and sensory properties of functional bread. *LWT*, 58(2), 614—619. doi: 10.1016/j.lwt.2014.04.003.
- Maurice, B., Saint-Eve, A., Permin, A., Leroy, P., & Souchon, I. (2022). How Different Are Industrial, Artisanal and Homemade Soft Breads? *Foods*, 11(10), 1484. doi: 10.3390/foods11101484.
- Mueed, A., Shibli, S., Jahangir, M., Jabbar, S., & Deng, Z. (2023). A comprehensive review of flaxseed (*Linum usitatissimum L.*): health-affecting compounds, mechanism of toxicity, detoxification, anticancer and potential risk. *Crit Rev Food Sci. Nutr.*, 63(32), 1081—11104. doi: 10.1080/10408398.2022.2092718.
- 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.
- Mykhonik, L., & Hetman, I. (2022). *The Use of Leaven of Spontaneous Fermentation of Cereal Flours in the Technology of Healthy and Dietary Bakery Products. Bioenhancement and Fortification of Foods for a Healthy Diet*. London: CRC Press, 135—154. doi: https://doi.org/10.1201/9781003225287.
- Ricciardi, A., Parente, E., Piraino, P., Paraggio, M., & Romano, P. (2005). Phenotypic characterization of lactic acid bacteria from sourdoughs for Altamura bread produced in Apulia (Southern Italy). *International Journal of Food Microbiology*, 98(1), 63—72. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2004.05.007.

Rizzello, C. G., Coda, R., & Gobbetti, M. (2016). Use of sourdough fermentation and non wheat flours for enhancing nutritional and healthy properties of wheat-based foods. In *Fermented Foods in Health and Disease Prevention*; Frías, J., Martínez-Villaluenga, C., Peñas, E., Eds.; Academic Press: Cambridge, MA, 433—452.

Rocha, J. M., & Malcata, F. X. (2012). Microbiological profile of maize and rye flours, and sourdough used for the manufacture of traditional Portuguese bread. *Food Microbiology*, 31(1), 72—88. doi: 10.1016/j.fm.2012.01.008.

Shevchenko, A., Drobot, V., & Galenko, O. (2022). Use of pumpkin seed flour in preparation of bakery products. *Ukrainian Food Journal*, 11, 90—101. doi: 10.24263/2304-974X-2022-11-1-10.

Ventimiglia, G., Alfonzo, A., Galluzzo, P., Corona, O., Francesca, N., Caracappa, S., Moschetti, G., & Settanni, L. (2015). Codominance of *Lactobacillus plantarum* and obligate heterofermentative lactic acid bacteria during sourdough fermentation. *Food Microbiology*, 51, 57—68. doi: 10.1016/j.fm.2015.04.011.

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. doi: 10.1016/j.foodres.2015.08.013.

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. doi: 10.1016/j.foodchem.2015.08.110.

TECHNOLOGICAL RESEARCH PROPERTIES OF DIFFERENT TYPES OF WHOLE GRAIN FLOUR

L. Mykhonik¹, I. Cherkas¹, T. Sytnychenko¹, T. Lebedenko², G. Khomych³

¹National University of Food Technologies

²Odessa National Technological University

³Poltava University of Economics and Trade

Key words:

*Wheat whole grain flour
Quality indicators
Consumer properties
Chemical composition
Bakery products*

Article history:

Received 07.07.2024

Received in revised form
22.07.2024

Accepted 11.08.2024

Corresponding author:

L. Mykhonik

E-mail:

gm_lora@i.ua

Citation: Михонік Л. А., Черкас О. І., Ситниченко Т. О., Лебеде́нко Т. Є., Хомич Г.П. (2024). Дослідження технологічних властивостей різних видів пшеничного цільнозернового борошна. *Наукові праці НУХТ*, 30(4), 132—145. DOI: 10.24263/2225-2924-2024-30-4-12

ABSTRACT

Bread made from wheat whole-grain flour, in which all the useful substances of the grain are rationally preserved, is able to improve the quality of nutrition, but bread made from whole-grain flour, compared to bread made from variety flour, has low consumer properties. It is possible to improve the quality of products made from this flour by increasing its dispersion, using flour from high-quality wheat grain, and improving dough-making technologies. The market offers various types of wheat whole grain flour, produced using different technologies. Determining the technological properties of these types of flour will make it possible to develop optimal formulations and technological recommendations for obtaining high-quality products.

The quality indicators and baking (technological) properties of different types of wheat whole grain flour — wallpaper, millet and seeded — were studied. It was established that millet flour has larger particles and a darker color. Sown flour, compared to other types of whole grain flour, has the highest particle dispersion, the highest whiteness index and gluten content.

The study of the carbohydrate-amylase complex showed that wall flour and millet flour have low values of sugar-forming capacity (less than 180 mg of maltose per 10 g of flour) and autolytic activity, which is confirmed by low gas-forming capacity (less than 1300 cm³ of CO² per 100 g of flour) and the graph of gas formation dynamics.

Bread samples made from whole wheat flour have a lower volume and porosity index, higher moisture content and acidity of the crumb than the control sample made from higher grade flour. Bread made from seeded flour was the closest to control in terms of organoleptic and physico-chemical indicators. Bread made from millet flour had low consumer properties — small volume, uneven, thick-walled structure of the porosity of the pulp, which clumps when chewed.

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РІЗНИХ ВИДІВ ПШЕНИЧНОГО ЦІЛЬНОЗЕРНОВОГО БОРОШНА

Л. А. Михонік¹, О. І Черкас¹, Т. О. Ситниченко¹, Т. Є. Лебеденко²,
Г. П. Хомич³

¹Національний університет харчових технологій

²Одеський національний технологічний університет

³Полтавський університет економіки і торгівлі

Хліб з пшеничного цільнозернового борошна, в якому раціонально зберігаються всі корисні речовини зернівки, здатний підвищити якість харчування, проте хліб із цільнозернового борошна, порівняно з хлібом із сортового борошна, має низькі споживчі властивості. Покращити якість виробів з цього борошна можна шляхом підвищення його дисперсності, використання борошна з високоякісного зерна пшениці, удосконалення технологій тістоприготування. На ринку представлені різні види пшеничного цільнозернового борошна, виготовлені за різними технологіями. Визначення технологічних властивостей цих видів борошна дасть змогу розробити оптимальні рецептури й технологічні рекомендації для одержання виробів високої якості.

Досліджено показники якості і хлібопекарські (технологічні) властивості різних видів пшеничного цільнозернового борошна — обойного, жорнового та сіяного. Встановлено, що жорнове борошно має більш крупні частинки і темніший колір. Борошно сіяне, порівняно з іншими видами цільнозернового борошна, має найвищу дисперсність частинок, найбільший показник білості і вміст клейковини.

Дослідження вуглеводно-амілазного комплексу показало, що борошно обойне та жорнове мають низькі значення цукроутворювальної здатності (менше 180 мг мальтози на 10 г борошна) та автолітичної активності, що підтверджується низькою газоутворювальною здатністю (менше 1300 см³ СО₂ на 100 г борошна) та графіком динаміки газоутворення.

Зразки хліба з цільнозернового борошна мають менший об'єм і показник пористості, вищу вологість і кислотність м'якушки, ніж контрольний зразок з борошна вищого сорту. Найбільш близьким до контролю за органолептичними та фізико-хімічними показниками був хліб із сіяного борошна. Хліб із жорнового борошна мав низькі споживчі властивості — малий об'єм, нерівномірну, товстостінну структуру пористості м'якушки, що комкується при розжовуванні.

Ключові слова: пшеничне цільнозернове борошно, показники якості, споживчі властивості, хімічний склад, хлібобулочні вироби.

Постановка проблеми. Розширення асортименту хлібобулочних виробів оздоровчого, дієтичного та спеціального призначення для різних верст населення є важливим напрямком розвитку хлібопекарської галузі. Надати хлібу функціональних властивостей можна шляхом включення до його рецептури сировини, багаті на біологічно-активні речовини. До такої сировини відноситься пшеничне

цільнозернове борошно, яке за хімічним складом наближено до зерна. Відомо, що під час сортових помелів із зернівки видаляються периферійні частинки, які є джерелом харчових волокон, білка, мінеральних речовин і вітамінів. У пшеничному цільнозерновому борошні, порівняно з борошном пшеничним вищого сорту, міститься в 12,5 раза більше клітковини, в 5,8 раза — магнію, 3,9 — фосфору, 3,4 — заліза, 2,1 — кальцію, а також в 3,7 — вітаміну PP, вдвічі більше вітамінів групи В. Також у цьому борошні міститься вітамін Е, відсутній у борошні вищого сорту (Жигунов, Волошенко, & Хоренжий, 2018).

Вважається, що хліб, виготовлений з цільнозернового борошна, зазвичай, має гірші сенсорні якості (менший об'єм, темніший колір, менш еластичну та жорстку текстуру м'якушки, прісний смак), ніж «білий» хліб із сортового борошна. Однією з причин цих недоліків є крупність частинок борошна, яка становить від 30 до 600 мкм і більше внаслідок труднощів у подрібненні оболонки і алеїронового шару зернівки (Дробот, & Михонік, 2008).

Сьогодні виробники пропонують різні види пшеничного цільнозернового борошна, виготовлені за різними технологіями. Визначення технологічних властивостей цих видів борошна дасть змогу прогнозувати якість хлібобулочних виробів з нього та розробити оптимальні рецептури й технологічні рекомендації щодо його переробки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженням хімічного складу, хлібопекарських властивостей пшеничного цільнозернового борошна та споживчим властивостям хлібобулочних виробів з нього приділяється значна увага науковців. Склад цільнозернового борошна одного виду зерна має значні варіації. На вміст макро- та мікронутрієнтів цільного зерна впливають як генетичні (сорт), так і екологічні (агрономічні) фактори. У дослідженнях HEALTHGRAIN сорти можна було диференціювати за високим і низьким рівнем клітковини та інших біоактивних речовин. Контроль якості та належні методи управління допомагають гарантувати, що цільнозернове борошно, отримане шляхом рекомбінації фіксованих співвідношень потоків помелу, має постійний склад (Van der Kamp, Poutanen, Seal, & Richardson, 2014).

Вивчення мінерального складу різних видів пшеничного борошна показало, що тип і походження борошна мають важливий вплив на загальний вміст елементів як у самому борошні, так і в хлібі. Цільнозернове борошно, порівняно з рафінованим, характеризувалось вищим вмістом елементів (Mg, P, K, Ca, Na, Mn, Fe та Zn) і найнижчим вмістом Se (Fernández-Canto та ін., 2022).

Проведено дослідження вмісту 27 елементів (B, Na, Mg, Al, P, S, K, Ca та ін.) індуктивним методом у зерні, борошні, різних зразках хліба та макаронних виробів і встановлено значні переваги цільнозернового борошна над білим борошном у хлібі й макаронних виробках для задоволення добової потреби щодо основних макро- та мікроелементів (Ertl, & Goessler, 2018).

У праці (Bressiani та ін., 2017) зазначено, що гранулометричний склад борошна відіграє важливу роль у формуванні реологічних властивостей тіста та показників якості хліба. Крупні частинки проявляють більший вплив на глютену мережу, з меншою стабільністю, меншим опором розтягуванню та меншим питомим об'ємом випічки.

Цільнозернове пшеничне борошно є найкращою сировиною для приготування хлібних виробів, оскільки містить антиоксиданти, білки, вуглеводи, вітаміни і мінерали з добре збалансованим складом, а клітковина цього борошна діє як пребіотик у кишечнику людини. Покращити якість цільнозернового борошна можна шляхом змішування його з борошном твердих сортів пшениць і додавання сухої пшеничної клейковини. Також для підвищення харчової цінності виробів із цільнозернового борошна доцільно додавати борошно інших культур — з вівса, жита, ячменю та сорго, але це негативно впливає на якість хліба (Elsahookie, Cheyed, & Dawood, 2021).

Заміна частини білого пшеничного борошна цільнозерновим значно підвищує поживну якість хліба і виробу набувають функціональних властивостей завдяки високому вмісту клітковини, проте зі збільшенням дозування цільнозернового борошна об'єм виробів зменшується, а вологість і щільність м'якушки зростають. Результати сенсорного аналізу показали, що заміна білого пшеничного борошна цільнозерновим борошном до 20% дає змогу отримати вироби, наближені до контролю з білого борошна, збільшення дозування погіршує органолептичні показники (Ngozi, 2014).

Аналізуючи дослідні дані різних сортів цільнозернового борошна, слід зазначити, що вміст сухої речовини, сирого протеїну, сирого жиру, сирої клітковини, мінеральних речовин і легкогідролізованих вуглеводів (крохмаль, геміцелюлоза) знаходилися в межах 84,7—88,8%, 10,2—16,3%, 0,9—1,7%, 2,3—4,8%, 1,2—3,2% і 77,5—84,2% відповідно. Такі показники, як зольність і крупність борошна безпосередньо залежали від схеми помелу і цілісності всіх анатомічних частинок зерна. Якісний і кількісний вміст клейковини борошна грубого помелу коливається від 21% до 36%, а індекс деформації клейковини — від 53,8 до 81,7 од. (Pismennyi, Nikonchuk, Shevchuk, Petrova, & Sydoryka, 2023).

Досліджували показники якості різних типів пшеничного борошна — 550, 1050 та цільнозернового. Визначали число падіння, відсоток клейковини, вміст крохмалю, в'язкість і структурно-механічні властивості за фаринографом, а також об'єм хліба з цих типів борошна. Встановлено, що цільнозернове борошно має найменший вміст крохмалю і клейковини та найнижчий показник числа падіння. Об'єм виробів становить 400, 340 і 300 см³ відповідно. Незважаючи на щільну м'якушку, низький об'єм та гірші сенсорні властивості хліба з цільнозернового борошна, його слід включати в раціон харчування, оскільки він є найбільш корисним за хімічним складом. Для покращання споживчих властивостей виробів цільнозернове борошно слід змішувати з іншими типами борошна (Ramzan, & Kamran, 2023).

Для збагачення хліба біологічно-активними речовинами досліджували доцільність використання гречаного борошна та гречаних пластівців у технології хліба з пшеничного цільнозернового борошна. Гречане борошно і пластівці вносили у кількості 15% замість маси цільнозернового борошна. За допомогою фаринографа встановлено, що продукти переробки гречки призводять до незначного зниження структурно-механічних властивостей тіста, показника пористості м'якушки і об'єму виробів, але смак і аромат при цьому покращується (Drobot, Semenova, Smirnova, & Myhonik, 2014).

Визначали показники якості цільнозернового борошна промислового виробництва та хліба з нього. Встановлено, що досліджувані зразки борошна мають суттєві відмінності. Зольність досліджуваних зразків цільнозернового борошна із пшениці та зерна спельти знаходиться в діапазоні 0,80—1,46%; крупність: залишок на ситі № 067 — в межах 0,1—1,7 %, прохід крізь сито № 38 — у межах 12—34%. Вміст сирої клейковини у зразках становив 24—26% з індексом деформації клейковини у діапазоні 60—80 одиниць. Найбільший об'єм хліба (400—460 см³) і пористість (67—68 %) мали зразки з борошна з найменшим розміром частинок (залишок на ситі № 067 не більше 1%, прохід крізь сито № 38 більше 15—20 %) (Marchenkov, Voloshenko, Zhygunov, Marenchenko, & Zhurenko, 2021).

Розглянуто переваги цільнозернового борошна, що зберігає поживну цінність зерна і його біологічно-активні властивості. Досліджено показники якості, а саме зольність, білість, крупність і вміст клейковини пшеничного цільнозернового борошна вітчизняного виробництва. Показано, що ці показники коливаються в широких межах. Хліб з досліджуваних зразків борошна має рівномірну пористість, гладку поверхню без підривів скоринки, приємний смак і аромат. Найбільший об'єм і пористість мають зразки, випечені з борошна з меншою крупністю частинок, з низьким показником зольності і високим вмістом клейковини (Жигунов, Волошенко, & Хоренжий, 2018).

Вищенаведена інформація свідчить про актуальність використання пшеничного цільнозернового борошна в технології оздоровчих хлібобулочних виробів і подальшого вивчення показників якості цього борошна та його хлібопекарських властивостей, зокрема білково-протеїназного і вуглеводно-амілазного комплексів, які визначають перебіг технологічного процесу і якість виробів.

Мета статті: дослідити показники якості та хлібопекарські (технологічні) властивості різних видів пшеничного цільнозернового борошна.

Матеріали і методи. Для досліджень використовували: борошно пшеничне вищого сорту (ТМ «Хуторок») — контрольний зразок, борошно пшеничне обойне «Цільнозернове» (ТМ «Своя лінія»), борошно пшеничне цільнозернове жорнового помелу (ТМ «Лавка традицій»), борошно пшеничне цільнозернове сіяне (ТМ «EuroMill»), дріжджі хлібопекарські пресовані (ТМ «Львівські»), сіль кухонну харчову (ТМ «Добробут»).

Уся сировина та реактиви для проведення досліджень відповідали нормативній документації та зберігались у необхідних умовах, зазначених на маркуванні.

Визначали органолептичні показники борошна (зовнішній вигляд, колір, запах, вміст мінеральної домішки та фізико-хімічні (масова частка вологи, кислотність, білість, зараженість і забруднення шкідниками, вміст і якість клейковини) (Дробот, 2015).

Крупність борошна (гранулометричний склад) визначали за допомогою розсіювача лабораторного з частотою коливання 180...200 хв⁻¹ та набору сит з шовкової або синтетичної тканини або дротяної сітки для визначення розміру та масової частки частинок борошна. Борошно просіювали через набір сит протягом 10 хв, після чого зважували залишок з верхнього та прохід з нижнього сита.

Газоутворювальну здатність борошна визначали за допомогою приладу АГ-1 за кількістю виділеного діоксиду вуглецю (cm^3) за температури $30\text{ }^\circ\text{C}$ за 5 год бродіння тіста із 100 г досліджуваного борошна, 60 cm^3 води та 10 г пресованих дріжджів (Shevchenko, Litvynchuk, & Koval, 2023).

Цукроутворювальну здатність борошна досліджували за кількістю утвореної мальтози (мг) у водно-борошняній суспензії з 10 г борошна і 50 cm^3 води за одну годину ферментації за температури $27\text{ }^\circ\text{C}$. Визначення кількості мальтози проводили прискореним йодометричним методом без гідролізу (Shevchenko, & Galenko, 2021). Автолітичну здатність борошна досліджували за методом автолітичної проби визначенням накопичених водорозчинних речовин у водно-борошняній суспензії під час її прогрівання в киплячій водяній бані. Вміст водорозчинних речовин визначали рефрактометричним методом (Дробот, 2015).

Зразки тіста з досліджуваних видів борошна готували безопарним способом з додаванням пресованих хлібопекарських дріжджів і солі. В тісті визначали масову частку вологи, кислотність наприкінці бродіння (Shevchenko, Drobot, & Galenko, 2022). Тісто виброджувало протягом 170 хв (30 ± 2) $^\circ\text{C}$, після чого його вручну поділяли на шматки і формували тістові заготовки для формового і подового хліба. Вистоювання тістових заготовок відбувалось у камері вистоювання ТМ «Sveba-Dahlen» (Швеція) за температури (38 ± 2) $^\circ\text{C}$ та відносній вологості (78 ± 2)% до готовності. Вироби випікали в ярусній печі ТМ «Sveba-Dahlen» (Швеція) за температури $200\text{...}220\text{ }^\circ\text{C}$. Контролем було обрано хліб з пшеничного борошна вищого сорту, яке є найбільш поширеним у виробництві пшеничного хліба.

Якість хліба оцінювали за органолептичними (зовнішній вигляд, стан поверхні, забарвлення скоринки, структура пористості, смак, запах) (Galenko, Shevchenko, Saccanti, Mignani, & Litvynchuk, 2024) та фізико-хімічними показниками (кислотність, пористість, питомий об'єм, формостійкість). Масову частку вологи м'якушки хліба визначали методом висушування наважки в сушильній шафі СЕШ-3М (ТОВ «УкрАналитика», Україна) за температури $130\text{ }^\circ\text{C}$ протягом 40 хв, кислотність — методом титрування витяжки, приготовленої з м'якушки хліба, розчином гідроксиду натрію або калію в присутності індикатора фенолфталеїна (Hetman, Mykhonik, Kuzmin, & Shevchenko, 2021).

Пористість хліба відображає об'єм пор у певному об'ємі м'якушки, виражений у відсотках до загального об'єму (Verheyen, Albrecht, Elgeti, Jekle, & Becker, 2015). Вимірювання проводилося за допомогою приладу Журавльової.

Формостійкість виробів визначали вимірюванням висоти і діаметра подових виробів (мм) й оцінювали за їх співвідношенням.

Об'єм хліба визначали за допомогою спеціального приладу — об'ємомірника (місткість з дрібним зерном), що працює за принципом витиснення хлібом зерна. Об'єм витисненого зерна (cm^3), що вимірюють за допомогою циліндра, відповідає об'єму хліба (Shevchenko, Drobot, & Galenko, 2022). Питомий об'єм хліба визначається діленням об'єму хліба на його масу і виражається з точністю до $1\text{ cm}^3/100\text{ г}$ (Zhu, Sakulnak, & Wang, 2016).

Викладення основних результатів дослідження. З огляду на те, що відсутні єдині нормативні вимоги до пшеничного цільнозернового борошна, виникла необхідність порівняти різні зразки цього борошна, параметри технологічного процесу виготовлення хліба та показники виробів.

Органолептична оцінка досліджуваних видів пшеничного цільнозернового борошна порівняно з борошном вищого сорту представлена в табл. 1.

Борошно цільнозернове пшеничне обойне і жорнове за кольором відповідали показникам якості для борошна пшеничного обойного, але жорнове борошно візуально відрізнялось більш крупними частинками і більш темним кольором. Борошно цільнозернове сіяне за зовнішнім виглядом було подібним до борошна пшеничного другого сорту.

Фізико-хімічні показники якості наведені в табл. 2.

Таблиця 1. Органолептичні показники якості пшеничного борошна

Показник	Борошно пшеничне вищого сорту	Борошно пшеничне цільнозернове		
		Обойне	Жорнове	Сіяне
Органолептичні показники якості пшеничного борошна				
Колір	Білий	Білий із сірим відтінком, з помітними дрібними частинами оболонки	Світло-сірий, з дуже помітними крупними частинками оболонки	Білий із жовтим відтінком, з ледь помітними частинками оболонки
Запах	Властивий пшеничному борошну, без сторонніх запахів			
Смак	Властивий пшеничному сортовому борошну, без стороннього смаку	Властивий пшеничному цільнозерновому борошну, без стороннього смаку		Властивий пшеничному сортовому борошну, без стороннього смаку
Вміст мінеральної домішки	При розжовуванні борошна не відчувається хрускоту			

Таблиця 2. Фізико-хімічні показники якості пшеничного борошна

Показник	Борошно пшеничне вищого сорту	Борошно пшеничне цільнозернове		
		Обойне	Жорнове	Сіяне
Масова частка вологи, %	13,3	12,1	11,4	11,6
Кислотність титрована, град	3,0	4,6	5,5	4,5
Білість, од. пр.	64,6	21,7	-30,0	37,1
Зараженість і забруднення шкідниками	Не виявлено			

Масова частка вологи відповідає вимогам нормативної документації. Титрована кислотність борошна пшеничного вищого сорту, обойного та сіяного відповідала нормативам галузі, а цільнозернового жорнового дещо перевищувала (згідно з нормативами галузі не більше 5,0 град).

Білість, од. пр., для борошна пшеничного вищого сорту відповідала вимогам нормативної документації, для борошна пшеничного цільнозернового (обойного)

не регламентується стандартом. Визначення цього показника для борошна цільнозернового свідчить, що найменше його значення має борошно цільнозернове жорнове. Показник білості для цільнозернового сіяного борошна становив 37,1 од. пр., це значення входить у межі показника для борошна першого сорту.

З вищезазначених зразків борошна відмивали клейковину та оцінювали її кількість і якість. Результати наведені в табл. 3.

Найбільший вміст сирової клейковини міститься в борошні цільнозерновому сіяному, що перевищує навіть вміст у борошні пшеничному вищого сорту. Слід зазначити, що такий високий вміст клейковини не характерний для цільнозернового борошна і можна припустити, що виробники або отримують цільнозернове борошно з високоякісної пшениці (з високим вмістом білка), або додатково збагачують борошно сухою пшеничною клейковиною. Наше припущення підтверджує також доволі високий вміст клейковини в цільнозерновому жорновому борошні.

Таблиця 3. Показники якості клейковини

Показник	Борошно пшеничне вищого сорту	Борошно пшеничне цільнозернове		
		Обойне	Жорнове	Сіяне
Вміст клейковини, %:				
- сира	28,95	23,65	27,6	31,5
- суха	10,75	7,74	10,07	11,61
Гідратаційна здатність, %	180,6	176,9	172,1	205,3
Еластичність	Хороша	Хороша	Хороша	Хороша
Розтяжність, см	16	14	12	17
ІДК (пружність), од. пр.	67,9	58,4	56,3	73,6

Розтяжність у пшеничному борошні вищого сорту та у всіх видах цільнозернового борошна середня. За еластичністю, розтяжністю та показником ІДК клейковина всіх видів борошна відноситься до 1 групи — хороша.

Харчова й енергетична цінність борошна, зазначена на упаковці виробників, наведена в табл. 4.

Таблиця 4. Харчова (поживна) та енергетична цінність пшеничного борошна

Показник, на 100 г продукту	Борошно пшеничне вищого сорту	Борошно пшеничне цільнозернове		
		Обойне	Жорнове	Сіяне
Білки, г	10,3	11,5	13,8	11,5
Жири, г	1,1	2,2	1,7	2,2
Вуглеводи, г	70,0	55,8	59,3	55,8
Енергетична цінність (калорійність), ккал	334,0	296,0	284,0	298,0

Згідно з даними табл. 4 цільнозернове борошно має вищий вміст білків і жирів та менший вміст вуглеводів. Це пояснюється тим, що в цільнозерновому борошні містяться майже всі його периферійні частинки (насіненна оболонка, алеїроновий шар і зовнішні шари ендосперму).

Щодо харчової (поживної) та енергетичної цінності цільнозернове борошно містить меншу на 10—12% калорійність порівняно із сортовим борошном.

Технологічні властивості, зокрема й перебіг мікробіологічних і біохімічних процесів у тісті, залежать від гранулометричного складу борошна (дисперсності), результати визначення якого наведені в табл. 5.

Досліджувані види цільнозернового борошна характеризуються меншою дисперсністю частинок порівняно з пшеничним сортовим борошном. Про вищу крупність свідчить наявність фракції, розміром більше 144 мкм. Жорнове борошно має найбільший розмір частинок, залишок його на ситі № 067 з розміром отворів 670 мкм складає більше 21%. Борошно цільнозернове сіяне за проходом крізь сито № 49/52 (розмір отворів 144 мкм) відповідає вимогам щодо крупності для борошна пшеничного першого сорту.

Таблиця 5. Гранулометричний склад досліджуваних видів борошна

Сита	Розмір отворів, мкм	Борошно пшеничне вищого сорту	Борошно пшеничне цільнозернове		
			Обойне	Жорнове	Сіяне
Залишок на ситі, %					
№ 067	670	—	0,9	21,06	—
№ 41/43	160	—	21,61	—	6,6
№ 49/52	144	0,4	—	—	5,6
Прохід крізь сито, %					
№ 41/43	160	—	43,21	28,4	93,4
№ 49/52	144	99,6	—	—	94,4

Досліджувані види цільнозернового борошна суттєво відрізняються за показниками якості, зокрема й за розміром частинок, що вплине на перебіг технологічного процесу та показники якості виробів.

Вуглеводно-амілазний комплекс досліджували за автолітичною активністю, цукроутворювальною та газоутворювальною здатністю. Відомо, що власні цукри борошна забезпечують дозрівання тіста тільки протягом 30—60 хв. Тому важливим показником борошна є його здатність утворювати цукри за допомогою ферментів амілолітичної дії в процесі дозрівання тіста, тобто цукроутворювальна здатність. Результати дослідження показників вуглеводно-амілазного комплексу цільнозернового борошна порівняно з пшеничним борошном вищого сорту наведені в табл. 6.

Таблиця 6. Показники вуглеводно-амілазного комплексу борошна

Показники	Борошно пшеничне вищого сорту	Борошно пшеничне цільнозернове		
		Обойне	Жорнове	Сіяне
Цукроутворювальна здатність, мг мальтози на 10 г борошна	186,0	169,2	151,2	230,4
Автолітична активність, % на СР борошна	27	24	23	31
Газоутворювальна здатність, см ³ /100 г борошна	1232	1024	920	1440

Борошно цільнозернове обойне та жорнове мають низькі значення цукроутворювальної здатності (менше 180 мг мальтози на 10 г борошна) та автолітичної активності, що підтверджується кількістю виділеного діоксиду вуглецю протягом 5 год бродіння, тобто газоутворювальна здатність цих видів борошна низька (менше 1300 см³ CO₂ на 100 г борошна). Ймовірно, це пов'язано з високими температурами під час сушіння зерна і внаслідок цього інактивацією амілолітичного ферментного комплексу борошна. Це є підставою для включення до рецептури виробів з цих видів цільнозернового борошна цукру білого, також можна рекомендувати використання солоду білого неферментованого, ферментних препаратів амілолітичної дії, подовжену тривалість бродіння та вистоювання.

Борошно цільнозернове сіяне характеризується найбільшою газоутворювальною здатністю порівняно з іншими видами цільнозернового борошна та контрольним зразком (борошном вищого сорту). Це пояснюється тим, що зазначене борошно має крупність частинок наближену до крупності борошна вищого сорту, при цьому завдяки вмісту периферійних частинок зернівки вищу активність амілолітичних ферментів, зокрема β-амілази.

Борошно цільнозернове жорнове має найменший показник газоутворювальної здатності, оскільки містить доволі високий відсоток частинок розміром більше 500 мкм і, відповідно, має низьку податливість крохмальних зерен амілолізу. Слід зауважити, що цільнозернове обойне і жорнове мають низьку газоутворювальну здатність. Ймовірно, як припускалось раніше, це може бути обумовлено температурними режимами сушіння зерна перед помелом.

Графіки динаміки газоутворення показують (рис. 1), що перший пік для всіх видів борошна і максимальна швидкість виділення CO₂ спостерігається через 30 хв бродіння, при цьому у цільнозернових видів борошна цей пік вищий, що пояснюється більшим порівняно із сортовим борошном вмістом власних цукрів.

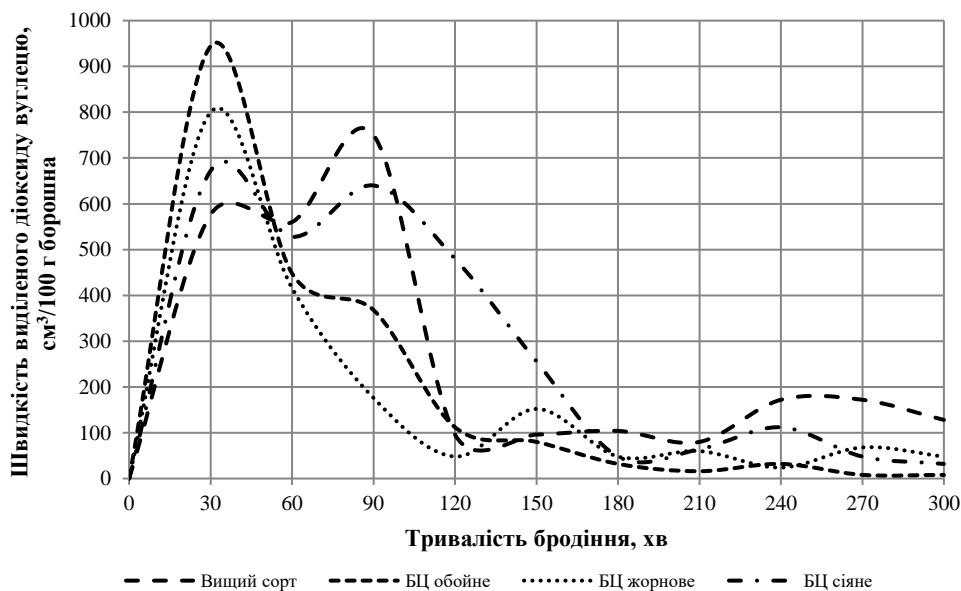


Рис. 1. Динаміка газоутворення пшеничного борошна

ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

У борошна цільнозернового обойного найвищий перший пік, але практично відсутній другий пік зростання газоутворення, що підтверджує низьку активність амілолітичних ферментів. Також слабо виражений другий пік має борошно цільнозернове жорнове.

У пшеничного борошна вищого сорту та цільнозернового сіяного другий пік спостерігається через 90 хв бродіння, що корелюється вищим показником цукроутворювальної здатності цих видів борошна порівняно з борошном цільнозерновим обойним і жорновим.

Основним методом оцінки хлібопекарських властивостей пшеничного борошна є пробне випікання. Контролем було обрано зразок тіста і хліба з пшеничного борошна вищого сорту, яке є найбільш поширеним у виробництві пшеничного хліба. Показники технологічного процесу та якості виробів наведені в табл. 7.

Таблиця 7. Показники технологічного процесу та якості виробів

Назва показника	Контроль з борошна вищого сорту	Зразки з пшеничного цільнозернового борошна		
		обойного	жорнового	сіяного
Показники технологічного процесу				
Масова частка вологи тіста, %	43,0	48,2	46,6	44,3
Кінцева кислотність тіста, град	3,0	4,5	5,0	4,4
Тривалість вистоявання тістових заготовок, хв	50	35	40	43
Тривалість випікання, хв	30	35	35	30
Органолептичні показники якості хліба				
Стан поверхні	Гладка	Шорстка	Шорстка	Гладка
Колір скоринки	Світло-жовтий	Золотистий	Світло-коричневий	Жовтий
Колір м'якушки	Кремний	Світло-коричневий	Коричневий	Світло-сірий
Еластичність м'якушки	Еластична	Еластична	Еластична	Еластична
Структура пористості	Дрібна, рівномірна, тонкостінна	Середня, рівномірна, тонкостінна	Середня, нерівномірна, товстостінна	Дрібна, рівномірна, тонкостінна
Смак	Властивий пшеничному хлібу, без стороннього присмаку			
Аромат	Властивий пшеничному хлібу, без сторонніх запахів			
Хруст	Відсутній			
Розжовуваність м'якушки	Добре розжовується, не комкується		Гірше розжовується, децю комкується	Добре розжовується, не комкується
Фізико-хімічні показники якості хліба				
Масова частка вологи, %	42,3	47,4	45,8	43,5
Кислотність, град.	2,4	4,0	4,4	3,8
Пористість, %	74,0	67,0	66,0	68,0

Питомий об'єм, см ³ /100 г	316	231	210	268
Формостійкість, Н/D	0,44	0,37	0,26	0,43

Тісто з цільнозернового обойного та жорнового борошна має на 3,6—5,2% вищий показник масової частки вологи порівняно з тістом з борошна вищого сорту. Таке зростання пов'язано з хімічним складом цих видів борошна, що мають у своєму складі високий вміст периферійних частинок, які характеризуються вищою водопоглинальною здатністю, ніж центральні частини зернівки.

Кислотність тіста з усіх зразків цільнозернового борошна також вища порівняно з тістом із сортового борошна, що обумовлено вищим вмістом кислореагуючих речовин у висівкових частинках зернівки.

Тривалість вистоювання зразків із цільнозернового борошна менша порівняно з тривалістю вистоювання контрольного зразка, а тривалість випікання, навпаки, на 5 хв довша.

Вироби з цільнозернового борошна мають менший об'єм і нижчий показник пористості, ніж хліб з пшеничного борошна вищого сорту. Хліб з борошна вищого сорту та цільнозернового сіяного характеризується доволі високим показником формостійкості — 0,44 та 0,43 відповідно, тоді як хліб із жорнового борошна має найнижче значення цього показника. Це можна пояснити тим, що, незважаючи на доволі високий вміст клейковини, жорнове борошно містить високу кількість висівкових частинок великого розміру, які втручаються в клейковинний каркас і погіршують газотримувальну здатність тіста, що також обумовлює найменший об'єм виробу з цього борошна.

Структура пористості у хліба із сортового борошна та цільнозернового сіяного — дрібна, рівномірна, тонкостінна, у хліба з обойного борошна — середня, рівномірна. Хліб із жорнового борошна має нерівномірну та товстостінну пористість, м'якушка його дещо гірше розжовувалась, що, ймовірно, пов'язано з крупністю частинок борошна.

За органолептичними та фізико-хімічними показниками найбільш близьким до контрольного зразка є хліб із цільнозернового сіяного борошна, хліб із жорнового борошна має найбільш низькі споживчі властивості порівняно з іншими зразками.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вивчення технологічних заходів з метою покращання якості хліба з різних видів пшеничного цільнозернового борошна з урахуванням їх якості і хлібопекарських властивостей.

Висновки

Порівняльна оцінка різних видів пшеничного цільнозернового борошна показала, що досліджувані види борошна відрізнялись як за органолептичними, так і за фізико-хімічними показниками. Зокрема, жорнове борошно має більш крупні частинки і більш темний колір з дуже помітними частинками оболонки, а борошно цільнозернове сіяне за органолептичними показниками відповідало вимогам до борошна пшеничного другого сорту. Відзначено високий вміст сирової клейковини (більше 27%) в цільнозерновому пшеничному сіяному та жорновому борошні, що

не є характерним для цих видів борошна. За еластичністю, розтяжністю та показником ІДК клейковина всіх видів борошна відноситься до першої групи — хороша.

Найвищий показник автолітичної активності та цукроутворювальної здатності має борошно цільнозернове сіяне. Дещо менші значення цих показників у пшеничного борошна вищого сорту. Борошно цільнозернове обойне та жорнове мають низькі значення цукроутворювальної здатності, що, ймовірно, пов'язано з температурними режимами сушіння зерна під час виробництва цього борошна. Отримані дані узгоджуються з результатами газоутворювальної здатності та динаміки накопичення діоксиду вуглецю.

За результатами пробного лабораторного випікання встановлено, що масова частка вологи та кислотність тіста у всіх зразків із цільнозернового борошна вища порівняно з контролем, що обумовлено наявністю в цільнозерновому борошні периферійних частинок зернівки. Тривалість вистоювання тістових заготовок порівняно з контрольним зразком менша, а тривалість випікання — довша.

За органолептичними показниками, об'ємом, показником пористості та формостійкості найбільш близьким до контрольного зразка є хліб з цільнозернового сіяного борошна. Хліб з обойного та жорнового борошна мав нижчий, порівняно з контрольним зразком і зразком із сіяного борошна, об'єм і показник пористості. Хліб із цільнозернового жорнового борошна має найбільш низькі споживчі властивості.

Існуючі дослідження показників якості пшеничного цільнозернового борошна підтверджують доцільність подальших досліджень у цьому напрямку з метою розширення асортименту оздоровчих хлібних виробів з високим вмістом харчових волокон і покращення їх якості.

Література

Дробот, В. І. (Ред.). (2015). Технохімічний контроль сировини та хлібобулочних і макаронних виробів. Київ: Кондор-Видавництво.

Дробот, В. І., & Михонік, Л. А. (2008). Споживчі властивості хлібобулочних виробів з борошна високого виходу. *Зернові продукти та комбікорми*, 1, 19—20.

Жигунов, Д. О., Волощенко, О. С., & Хоренжий, Н. В. (2018). Порівняльне дослідження показників якості цільнозернового пшеничного та спельтового борошна. *Зернові продукти та комбікорми*, 18 (3), 15—20.

Bressiani, J., Oro, T., Santetti, G. S., Almeida, J. L., Bertolin, T. E., Gómez, M., & Gutkoski, L. C. (2017). Properties of whole grain wheat flour and performance in bakery products as a function of particle size. *Journal of Cereal Science*, 75, 269—277. Взято з <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.05.001>.

Drobot, V., Semenova, A., Smirnova, J., & Myhonik, L. (2014). Effect of Buckwheat Processing Products on Dough and Bread Quality Made from Whole-Wheat Flour. *International Journal of Food Studies*, 3, 1—12.

Elsahookie, M., Cheyed, S. H., & Dawood, A. A. (2021). Characteristics of Whole Wheat Grain Bread Quality. *Systematic Reviews in Pharmacy*, 12(1), 593—597. Взято з <https://www.researchgate.net/publication/348311228>.

Ertl, K., & Goessler, W. (2018). Grains, Whole Flour, White Flour, and Some Final Goods: An Elemental Comparison. *European Food Research and Technology*, 244, 2065—2075.

Fernández-Canto, M. N., García-Gómez, M. B., Boado-Crego, S., Vázquez-Oderíz, M. L., Muñoz-Ferreiro, M. N., Lombardero-Fernández, M., ..., Romero-Rodríguez, M. A. (2022). *Foods*, 11(20), 3176. Взято з <https://doi.org/10.3390/foods11203176>.

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>.

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>.

Marchenkov, D., Voloshenko, O., Zhygunov, D., Marenchenko, O., & Zhurenko, O. (2021). Investigation of quality indicators of wholemeal industrial-made flour. *Food science and technology*, 15(4), 87—94. doi:[https:// 10.15673/fst.v15i4.2258](https://10.15673/fst.v15i4.2258).

Ngozi, A. A. (2014). Effect of whole wheat flour on the quality of wheatbaked bread. *Global Journal of Food Science and Technology*, 2(3), 127—133.

Pismennyi, O., Nikonchuk, N., Shevchuk, N., Petrova, O., & Sydoryka, I. (2023). Research of quality indicators of different types of wholegrain flour. *Scientific Horizons*, 26(8), 72—82. doi: 10.48077/sciHor8.2023.72.

Ramzan, S., & Kamran, M. (2023). Comparative Study on Rheological Properties of Wheat Flour Types for Industrial Usage. *Sharif AgriHealth: Journal of Agri-food, Nutrition and Public Health*. 4(1), 63—69. doi:<http://dx.doi.org/10.20961/agrihealth.v4i1.71636>.

Shevchenko, A., Drobot, V., & Galenko, O. (2022). Use of pumpkin seed flour in preparation of bakery products. *Ukrainian Food Journal*, 11(1), 90—101. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2022-11-1-10>.

Shevchenko, A., & Galenko, O. (2021). Citrates of mineral substances in the technological process of manufacturing bakery products. *Scientific Works of National University of Food Technologies*, 27(1), 182—187. DOI: 10.24263/2225-2924-2021-27-1-19.

Shevchenko, A., Litvynchuk, S., & Koval, O. (2023). The influence of rice protein concentrate on the technological process of wheat bread production. *EUREKA: Life Sciences*, 4, 22—29. <https://doi.org/10.21303/2504-5695.2023.003031>.

Van der Kamp, J. W., Poutanen, K., Seal, C. J., & Richardson, D. P. (2014). The HEALTHGRAIN definition of «whole grain». *Food & Nutrition Research*, 58: 22100. Взято з <http://dx.doi.org/10.3402/fnr.v58.22100>.

Verheyen, C., Albrecht, A., Elgeti, D., Jekle, M., & Becker, T. (2015). Impact of gas formation kinetics on dough development and bread quality. *Food Research International*, 76(3), 860—866.

Zhu, F., Sakulnak, R., & Wang, S. (2016). Effect of black tea on antioxidant, textural, and sensory properties of Chinese steamed bread. *Food Chemistry*, 194, 1217—1223.

FEATURES OF SOYBEAN PROTEIN PRECIPITATION IN TOFU PRODUCTION

I. Radziewska, O. Melnyk

National University of Food Technologies

Key words:

Tofu curd
Protein isoelectric point
Coagulants
Quality

Article history:

Received 09.07.2024
Received in revised form
25.07.2024
Accepted 12.08.2024

Corresponding author:

O. Melnyk
E-mail:
ksaname@gmail.com

Citation: Радзієвська І. Г.,
Мельник О. П. (2024). Особ-
ливості осадження білків
сої при виробництві тофу.
Наукові праці НУХТ,
30(4), 146—153.
DOI: 10.24263/2225-2924-
2024-30-4-13

ABSTRACT

Tofu curd is made from soybeans, which are an excellent source of vegetable protein, lipids, vitamins and minerals. Demand for tofu worldwide is due to its high nutritional value and inclusion in vegetarian and low-calorie diets.

Since tofu production involves a multi-stage process that includes the selection of raw soybeans, soaking, grinding, heating soy milk, filtering, adding coagulants, pressing and packaging, it remains a challenge to produce a product of high quality and excellent taste.

After soaking and grinding, soybeans turn into raw soy milk, and soy protein changes from the solid phase to the liquid phase to form an emulsion. The heat treatment process denatures the soy milk protein and releases hydrophobic groups.

Coagulation and gelation of soy milk are important steps in the tofu production process that affect its quality. In soy milk, coagulation occurs due to cross-linking of protein molecules by coagulants with the subsequent formation of a gel structure. The completeness of protein release from soy milk solution depends on a number of factors, the most important of which is pH. As a rule, its maximum value is achieved at a pH value corresponding to the isoelectric point of the protein, which depends on the ratio of the number of carboxyl and amino groups in the molecule.

To slow down the precipitation of soy protein, it is proposed to add crystalline table salt or its aqueous solution to strained soy milk. Then the soy milk should be heated to a temperature of 85—110 °C and a coagulant should be added until the protein's isoelectric point is reached, which is in the pH range of 4.4—4.5. Solutions of weak organic acids (acetic, citric, lactic acids or mixtures thereof) have proven to be good coagulants. Cheese with a structure similar to mozzarella cheese is formed.

ОСОБЛИВОСТІ ОСАДЖЕННЯ БІЛКІВ СОЇ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ТОФУ

І. Г. Радзівєвська, О. П. Мельник

Національний університет харчових технологій

Сир тофу виготовляється із соєвих бобів, які є чудовим джерелом рослинного білка, ліпідів, вітамінів і мінералів. Попит на тофу у всьому світі пояснюється його високою поживною цінністю та включенням у вегетаріанські та гіпокалорійні дієти.

Оскільки виробництво тофу відбувається за багатостадійним процесом, що включає відбір сирого насіння сої, замочування, подрібнення, нагрівання соєвого молока, фільтрування, додавання коагулянтів, пресування та пакування, виготовлення продукту з високою якістю та чудовим смаком залишається складним завданням.

Після замочування та подрібнення соєві боби перетворюються на сире соєве молоко, а соєвий білок переходить з твердої фази в рідку, утворюючи емульсію. У процесі термічної обробки білок соєвого молока денатурується і гідрофобні групи вивільнюються.

Коагуляція та гелеутворення соєвого молока є важливими етапами в процесі виробництва тофу, які впливають на його якість. У соєвому молоці коагуляція відбувається за рахунок зшивання білкових молекул коагулянтами з подальшим утворенням гелевої структури. Повнота виділення білків з розчину соєвого молока залежить від ряду факторів, найважливішим з яких є рН. Як правило, його максимальне значення досягається при значенні рН, що відповідає ізоелектричній точці білка, яка залежить від співвідношення кількості карбоксильних і аміногруп у молекулі.

Для уповільненого осадження соєвого білка запропоновано вносити в проціджене соєве молоко кристалічну кухонну сіль або її водний розчин. Далі соєве молоко необхідно нагріти до температури 85—110 °С і ввести коагулянт до досягнення ізоелектричної точки білка, що знаходиться в діапазоні рН 4,4—4,5. Як коагулянти добре себе зарекомендували розчини слабких органічних кислот (оцтова, лимонна, молочна кислоти або їх суміші). Утворюється сир зі структурою, подібною до сиру моцарела.

Ключові слова: соєвий сир тофу, ізоелектрична точка білка, коагулянти, якість.

Постановка проблеми. Соя — білково-олійна культура, насіння якої використовують у багатьох сферах харчового та промислового виробництва. Унікальність сої полягає в достатньо високому вмісті білка в її бобах, що може сягати 50%. Соеві білки класифікують відповідно до їх розчинності, фізіологічної функції та швидкості відцентрової седиментації. Залежно від розчинності вони поділяються на глобулін та альбумін. За фізіологічними функціями — на запасуючий білок і біологічно активний білок. За швидкістю відцентрової седиментації — на 2S, 7S,

11S і 15S компоненти (S — коефіцієнт седиментації, де $1S = 10^{-13} \text{ c} = 1 \text{ Свед-берг}$), де кожен компонент складається з білкових молекул з подібною молекулярною масою (Li, Regenstein, Fei, & Yang, 2020).

Соеві білки складаються в основному з гліциніну з коефіцієнтом відцентрової седиментації 11S і β -конгліциніну з коефіцієнтом відцентрової седиментації 7S. Ці два білки також називають білками зберігання, вони складають приблизно 70% від загального білка сої (Gua et al., 2021; Guo et al., 2012; Shi, & Liu, 2018).

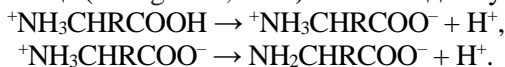
Із сої можна приготувати широкий спектр ферментованих і неферментованих продуктів харчування. Наразі найбільш доступний асортимент соєвих продуктів складається з молока, соусу та сиру, які можна придбати в більшості великих торговельних мереж.

Історична назва твердого білкового продукту з вмістом 10% білка і 80% вологи — бобовий сир тофу. У Східній Азії тофу настільки ж поширений продукт, як традиційний сир в Україні. Ця популярна альтернатива м'ясу та молочним продуктам існує вже понад 2000 років, а в останні століття тофу набув особливого розповсюдження. У сучасному світі тофу відіграє ще й важливу етичну роль, бо є повноцінною та смачною альтернативою м'ясу та сирним продуктам з молока.

Соевий сир тофу виготовляють за допомогою багатоетапного процесу, що включає відбір сирого насіння сої, замочування, подрібнення, нагрівання соєвого молока, фільтрування, додавання коагулянтів, пресування та пакування (Ali, Tian, & Wang, 2021; Chen, Hsieh, & Kuo, 2023).

Смак продукту визначається введеними добавками, а консистенція — способом ведення технологічного процесу й обраними коагулянтами. Під час процесу коагуляції агрегація соєвого білка відбувається шляхом зшивання білок—білок і білок—вода, а потім утворюються гелі з випадковою або регулярною стільниковою структурою (Agrahar-Murugkar, 2015).

Повнота виділення білків з розчину залежить від ряду факторів, найважливішим з яких є рН. Як правило, його максимальне значення досягається при значенні рН, що відповідає ізоелектричній точці білка (Cao et al., 2017; Hsiao, Yu, Li, & Hsieh, 2015; Chen et al., 2017), яка залежить від співвідношення кількості карбоксильних і аміногруп у молекулі. Ступінь іонізації різних функціональних груп змінюється при зміні рН середовища, що призводить до виділення білка з розчину. Співвідношення різних іонів залежно від ступеня іонізації функціональних груп і рН середовища (Zhang et al., 2018) можна подати у вигляді рівнянь:



Аналіз останніх досліджень і публікацій. Авторами (Wang et al., 2019; Zhang et al., 2018) досліджено, що різноманітність насіння сої, склад білка, рН, висока температура, нагрівання, різні типи коагулянтів і масштаби переробки суттєво впливають на якість кінцевого тофу. Якщо насіння сої зберігається в несприятливих умовах, таких як екстремальні значення рН і температури, вміст білка в соєвому молоці та вихід тофу знижуються (Agrahar-Murugkar, 2015; Guan et al., 2021).

Процес замочування впливає на екстракцію активних інгредієнтів соєвих бобів, а також на якість тофу. У (Agrahar-Murugkar, 2015; Cornet, van der Goot, & van der Sman, 2020) показано, що зі збільшенням температури замочування в діапазоні 30—40 °С, зменшується час екстракції активних речовин. Авторами досліджено

співвідношення води до бобів на рівні 9:1, 10:1, 11:1, 12:1, 13:1 та 14:1. Результати показали, що тофу, виготовлений у співвідношенні 9:1, був однорідним, але водянистим і м'яким. Тофу, виготовлений у співвідношенні 11:1 і 12:1, був грудкуватим і пористим. Тофу, виготовлений у співвідношенні 13:1 і 14:1, був неякісним і не міг тримати форму після нарізання.

У дослідженні (Shin, Yokoyama, Kim, Wicker, & Kim, 2015; Sun et al., 2019) показано переваги двоступеневого методу нагрівання для термічної обробки соєвого молока. Цей метод є більш придатним для ефективної денатурації соєвих білків (спочатку денатурується 7S білок, а потім 11S білок) і прискорення процесу гелеутворення порівняно з одноступеневим нагріванням. У результаті видима міцність на розрив тофу, виготовленого з використанням двоступеневого нагрівання, збільшилася на 12,2%, швидкість синерезису зменшилася на 21,8%, а фізичні властивості та вихід тофу значно покращилися.

Натепер (Li, Regenstein, Fei, & Yang, 2020) існує чотири теорії щодо механізму соль-індукованого утворення гелю тофу. Перша — це так звана теорія катіонного сольового містка, яка базується на термічно індукованому зшиванні між іонами металу та соєвим білком. Швидкість гелеутворення білка прискорюється, а також підвищується стабільність тривимірної структури гелевої сітки, що утворюється. Друга теорія ґрунтується на ефекті висоловання термічно денатурованого соєвого білка внаслідок зневоднення після додавання солі (Wang et al., 2018). Третя теорія полягає в тому, що після додавання солі значення рН знижується до номінальної ізоелектричної точки соєвого білка (Kanauchi, Sakiko, & Shimoyamada, 2015). Четверта теорія полягає в тому, що формування білкових частинок відрізняється в присутності певних іонів металів, яка ґрунтується на першій теорії (Zhang et al., 2018). Механізм гелеутворення сольових коагулянтів, що використовуються у виробництві тофу, потребує подальших досліджень, оскільки кожна теорія не повністю пояснює всі аспекти формування гелю тофу та його результат.

Найважливішим етапом у процесі виробництва тофу є процес коагуляції (Jin et al., 2020), який передбачає вибір коагулянту. Різні типи коагулянтів можуть впливати на кінцеву якість і вихід продуктів з тофу. Загалом, коагулянти тофу поділяються на три категорії, а саме: кислоти (лимонна, молочна, винна, l(-)-яблучна та глюконова), солі (хлорид кальцію, ацетат кальцію, лактат кальцію, сульфат магнію, цитрат тримагнію), ферменти (хімозин-пепсин, папаїн, мікробна трансглютаміназа тощо), в основі яких лежить механізм коагуляції.

Метою статті є дослідження процесу уповільненого осадження білка в ізоелектричній точці з розчину соєвого молока при виробництві соєвого сиру тофу.

Матеріали і методи. Модельні розчини готували із соєвого борошна харчового, що містить 54—56% протеїну та 2% жиру. Соєвий білок на 88—95% представлений водорозчинною фракцією глобулінів (60—81%), альбумінів (8—25%), важкорозчинних глобулінів (3—27%). Кислотність розчинів регулювали розчином NaOH або HCl концентрацією 0,1 моль/л до значення рН 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0; 5,5 і 6,0.

Визначення ізоелектричної точки проведено за стандартною методикою виявлення помутніння розчинів білка залежно від величини рН у буферних розчинах: натрій ацетат—оцтова кислота (CH_3COONa — CH_3COOH). Для цього було приготовано буферні суміші з різними значеннями рН. До 4 мл отриманих буферних

розчинів додано по 2 мл попередньо профільтованого одновідсоткового екстракту соєвого борошна і ретельно перемішано. Потім відібрано по 1 мл отриманих сумішей і додано до кожної по 2 мл етилового спирту. Через 5 хв зафіксовано значення оптичної густини D отриманих розчинів в кюветі 1 см при довжині хвилі $\lambda=800$ нм на приладі «Specord M-40». Одержані залежності оптичної густини поглинання розчинів D від рН представлені на рис. 1.

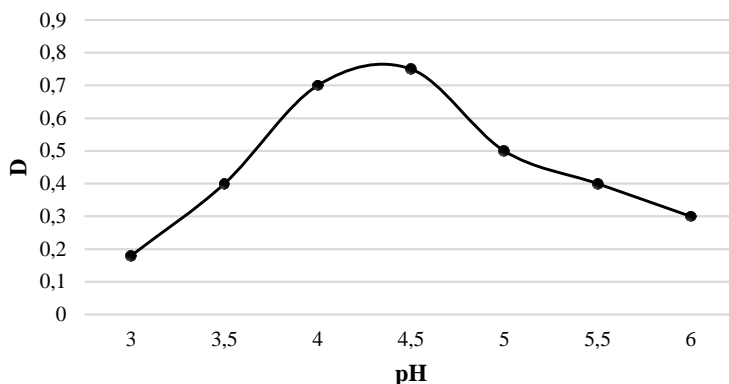


Рис. 1. Залежність оптичної густини D ($\lambda=800$ нм) водного розчину соєвого білка від рН

Викладення основних результатів дослідження. Кількісний вихід ізольованих білків залежить від ефективності екстрагування білків у розчин і повноти їх вилучення з білкових екстрактів. Найбільш доцільним є осадження з розчинів при значеннях рН екстракту, що відповідають ізoeлектричній точці.

Наведена на рис. 1 залежність має традиційний екстремальний характер, а значення ізoeлектричної точки модельного розчину соєвого білка знаходиться в межах рН 4,4—4,5. Тому для осадження доцільно використовувати слабкі розчини кислот: оцтову, молочну, лимонну кислоти або їх суміші. Для осадження білків із соєвого молока можуть бути використані також органічні розчинники (спирт, ацетон тощо), хоча токсикологічні аспекти їх впливу на якість сиру тофу не досліджені (Kamal, Ali, & Le, 2023).

Запропонований метод уповільненого осадження білка в ізoeлектричній точці ґрунтується на спеціальному складі кислотного коагулянту та використанні кристалічної кухонної солі для уповільнення процесу осадження.

Використання води надає можливість екстрагувати лише альбумінову фракцію білків, а глобулінова втрачається з окарою, тому доцільно застосовувати кристалічну кухонну харчову сіль або її водний розчин на етапі екстрагування білків із соєвого молока. Сіль також здатна сповільнювати процес коагуляції білків-глобулінів в ізoeлектричній точці, тому утворення білкового згустку відбувається повільно, без комового ефекту, що забезпечує еластичну структуру згустку.

При додаванні коагулянту температуру соєвого молока доводять до температури не нижче 90 °С, а коагулянт вносять в кількості 0,2—0,6% від маси молока. Як коагулянт добре зарекомендувала себе молочна кислота, при використанні якої знижується бобовий присмак готового продукту. При термічній обробці соєвого

молока відбувається збільшення гідрофобності та вмісту сульфгідрильних груп у білках, що сприяє агрегації білків. Тофу формується після утворення стабільної структури білкової сітки за допомогою відповідного коагулянту.

Як коагулянт використовується також суміш слабких органічних кислот у такому співвідношенні: 1—1,25 оцтової кислоти, до 1—1,23 молочної кислоти та 1—1,1 лимонної кислоти (Cao et al., 2017; Li, Regenstein, Fei, & Yang, 2020) або 9-відсотковий водний розчин оцтової кислоти і 9-відсотковий водний розчин молочної кислоти при співвідношенні 15—50%:50—85% (Zhang et al., 2018). Суміш витримується впродовж 15—20 хв для завершення коагуляції. Білковий осад, що утворюється, називають білковою пастою, її відділяють від екстракту (сироваткової води) шляхом центрифугування або пресування в перфорованій формі. Одержана паста має вологість 80% і являє собою білковий продукт типу тофу. До пасти можна додати смакові інгредієнти, наприклад морську капусту, зелень, часник тощо. Таку пасту також можна висушувати, гранулювати або текстурувати.

За органолептичними і фізико-хімічними показниками утворений соєвий сир відповідає вимогам, наведеним у табл. 1, та добре узгоджується з (Kim, 2023).

Таблиця 1. Показники якості сиру тофу

Найменування показника	Характеристика
Зовнішній вигляд і консистенція	Твердий або гелеподібний неоднорідний продукт з включеннями (за наявності у складі) харчових інгредієнтів. При зберіганні в межах терміну придатності тофу допускається виділення вологи не більше 10% від маси продукту
Смак і запах	Чистий, властивий сировині, з якої виготовлено тофу. Не допускається сторонній смак і запах
Колір	Обумовлений сортністю соєвої сировини. Тофу після заморожування жовтий
Масова частка білка, %, не менше	8,0
Масова частка жиру, %, не більше	8,0
Масова частка вологи, %, щонайменше	80,0
pH, не більше	7,3
Масова частка металодомішок	Не допускаються
Сторонні домішки	Не допускаються

Незважаючи на багатовікову історію виробництва соєвого сиру тофу, його технології продовжують розвиватися й удосконалюватись відповідно до сучасних споживчих вимог. Загалом слід відмітити збільшення частки рослинної їжі в щоденному раціоні сучасної людини. Розроблення технологій білкових продуктів триває, але очевидно, що соя є поживною та корисною частиною дієти, яка відповідає принципам здорового харчування.

Висновки

За результатами проведених досліджень для соєвого білка значення ізоелектричної точки знаходиться в межах 4,4—4,5, що визначає доцільність застосування розчинів слабких органічних кислот як коагулянтів. Запропоновано такий спосіб виробництва соєвого білкового продукту тофу: в проціджене соєве молоко вводять кристалічну кухонну сіль або її водний розчин. Потім соєве молоко нагрівають до температури 85—110 °С і вводять коагулянт до досягнення рН. Коагулянтами для осадження білкового комплексу можуть бути оцтова, лимонна, молочна кислоти або їх суміші. Далі в отриману масу з температурою не нижче 68 °С вводять сушену зелень, часник, паприку або готують тофу без них. Для відділення сироватки масу переносять у перфоровану форму, пресування має тривати щонайменше 10 хвилин. Після закінчення пресування отриманий соєвий сир охолоджують до температури 18—20 °С і піддають вакуумній упаковці.

Запропонований спосіб дає змогу одержати сир із структурою, подібною до сиру моцарела — це так званий «бавовняний» тофу. Соєвий сир, отриманий за цим способом, може зберігатися до 10 діб за температури 8—10 °С.

Література

Agrahar-Murugkar, D. (2015). Effect of different process parameters on the quality of soymilk and tofu from sprouted soybean. *J. Food Sci. Technol.*, 52, 2886—2893. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1320-z>.

Ali, F., Tian, K., Wang, Z.-X. (2021). Modern techniques efficacy on tofu processing: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 116, 766—785. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.07.023>.

Cao, F., Li, X., Luo, S., Mu, D., Zhong, X., Jiang, S., Zheng, Z., Zhao, Y. (2017). Effects of organic acid coagulants on the physical properties of and chemical interactions in tofu. *LWT*, 85, 58—65. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.07.005>.

Chen, N., Zhao, M., Nieperon, F., Nicolai, T., Chassenieux, Ch. (2017). The effect of the pH on thermal aggregation and gelation of soy proteins. *Food Hydrocolloids*, 66, 27—36. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.12.006>.

Chen, C., Hsieh, J., Kuo, M. (2023). Insight into the Processing, Gelation and Functional Components of Tofu: A Review. *Processes*, 11(1), 202. <https://doi.org/10.3390/pr11010202>.

Cornet, S. H. V., van der Goot, A. J., & van der Sman, R. G. M. (2020). Effect of mechanical interaction on the hydration of mixed soy protein and gluten gels. *Current Research in Food Science*, 3, 134—145. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2020.03.007>.

Guan, X., Zhong, X., Lu, Y., Du, X., Jia, R., Li, H., Zhang, M. (2021). Changes of Soybean Protein during Tofu Processing. *Foods*, 10(7), 1594. <https://doi.org/10.3390/foods10071594>.

Guo, J., Yang, X., He, X., Wu, N., Wang, J., Gu, W., Zhang, Y. (2012). Limited aggregation behavior of β -Conglycinin and its terminating effect on glycinin aggregation during heating at pH 7.0. *J. Agric. Food Chem.*, 60, 3782—3791. <https://doi.org/10.1021/jf300409y>.

Hsiao, Y. H., Yu, C. J., Li, W. T. and Hsieh, J. F. (2015). Coagulation of β -conglycinin, glycinin and isoflavones induced by calcium chloride in soymilk. *Sci. Rep.*, 5, 13038. <https://doi.org/10.1038/srep13018>

Jin, Y., Liu, L. S., Zhang, X. F., Zhang, Q., Bai, J., Guo, H., Peng, Y. J. (2020). Effects of Coagulation Temperature on Gelling Properties and Chemical Forces of Lactone Tofu. *Food Sci.*, 636, 58—64. <https://doi.org/10.7506/spkx1002-6630-20200602-027>.

Kamal, H., Ali, A., Le, C. (2023). Green solvent processing: Effect of type of solvent on extraction and quality of protein from dairy and non-dairy expired milk products. *Food Chemistry*, 400, 133988. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133988>.

Kanauchi, M., Sakiko, H., Shimoyamada, M. (2015). New cheese-like food production from soymilk utility of soymilk curdling yeast. In A. H. A. Eissa (Ed.), *Food production and industry* (pp. 79—100).

Kim, E. (2023). Physicochemical Properties of Soybean Curd Residue Powder by Different Soybean and Drying Methods. *Journal of the Korean Society of Food Culture*, 38(5), 356—364. <https://doi.org/10.7318/KJFC/2023.38.5.356>.

Li, Z., Regenstein, J. M., Fei, T., Yang, L. (2020). Tofu products: A review of their raw materials, processing conditions, and packaging. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, 19, 1—8. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12640>.

Shi, Y. G., Liu, L. L. (2018). Research progress on correlation between soybean protein and tofu quality. *J. Food Technol.*, 36, 1—8. <https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-6002.2018.06.001>.

Shin, W. K., Yokoyama, W. H., Kim, W., Wicker, L., & Kim, Y. (2015). Change in texture improvement of low-fat tofu by means of low-fat soymilk protein denaturation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(5), 1000—1007. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6780>.

Sun, D., Li, T., Ma, L., Zhang, F., Li, A., & Jiang, Z. (2019). Effect of selective thermal denaturation and glycosylation on the textural properties and microstructure of vegetable tofu. *Journal of Food Process Engineering*, 42(3), e13001. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13001>.

Wang, R., Jin, X., Su, S., Lu, Y., & Guo, S. (2019). Soymilk gelation: The determinant roles of incubation time and gelation rate. *Food Hydrocolloids*, 97, 105230. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105230>.

Wang, W., Shen, M., Liu, S., Jiang, L., Song, Q., & Xie, J. (2018). Gel properties and interactions of Mesona blumes polysaccharide-soy protein isolates mixed gel: The effect of salt addition. *Carbohydrate Polymers*, 192, 193—201. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.03.064>.

Zhang, Q., Wang, C. Z., Li, B. K., Lin, D. R., Chen, H. (2018). Research progress in tofu processing: From raw materials to processing conditions. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, 58, 1—85. <https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1263823>.

METHODS OF REDUCING AND REMOVING ALCOHOL FROM GRAPE WINES

O. Uspalenko^{1,2}, M. Bilko¹, V. Kucherenko^{1,2}

¹National University of Food Technologies

²LLC "RPC "Ukrainian Wine Institute"

Key words:

Dealcoholization
Sensory properties
Vacuum distillation
Membrane separation
Thermal treatment

Article history:

Received 03.07.2024

Received in revised form
19.07.2024

Accepted 13.08.2024

Corresponding author:

O. Uspalenko

E-mail:

ukrvinprom_kyiv@ukr.net

Citation: Успаленко О. В., Білько М. В., Кучеренко В. М. (2024). Методи зниження та видалення алкоголю із виноградних вин. *Наукові праці НУХТ*, 30(4), 154—175.
DOI: 10.24263/2225-2924-2024-30-4-14

ABSTRACT

World wine consumption has undergone significant changes after several years of Covid-19, which was the beginning of the global crisis of the current century. This caused some people to stop drinking alcohol. Propaganda campaigns aimed at reducing alcohol consumption for social and personal reasons also have a great impact, but at the same time, there is an increase in demand for non-alcoholic wines with an ethanol content of less than 0.5% vol.

Various methods of dealcoholization and their impact on wine quality in the context of the growing interest in non-alcoholic wines and the need to reduce the alcohol content of wines are shown in the article. Specifically, it is noted that popular physical methods of dealcoholization, such as membrane separation and thermal distillation, enable the reduction of alcohol content in wines and are widely used for commercial purposes. However, these methods can lead to changes in color and loss of aromatic compounds, which affects the sensory quality of the wine as a whole.

Particular attention is given to two key drawbacks of wine dealcoholization: legal restrictions and technical problems. Firstly, laws in different countries may define the maximum allowable amount of alcohol in non-alcoholic beverages, limiting the options available to winemakers. Regarding the second factor, technical difficulties lie in the challenge of preserving the sensory characteristics of the wine after dealcoholization.

An overview of popular methods of wine dealcoholization, their impact on sensory properties, and highlights modern methods of harmonizing the taste and aroma of dealcoholized wine is provided in the article. The presented information will be useful for winemakers and scientists in choosing optimal dealcoholization techniques that meet the needs of various categories of consumers, including youth, pregnant women, drivers, and those who do not consume alcohol.

МЕТОДИ ЗНИЖЕННЯ ТА ВИДАЛЕННЯ АЛКОГОЛЮ З ВИНОГРАДНИХ ВИН

О. В. Успенко^{1,2}, М. В. Білько¹, В. М. Кучеренко^{1,2}

¹Національний університет харчових технологій

²ТОВ «НВЦ «Український інститут вина»

Світове споживання вина зазнало значних змін після декількох років Covid-19, що стало початком глобальної кризи поточного століття. Деякі люди навіть почали відмовлятися від вживання алкогольної продукції. Також великий вплив мають пропагандистські кампанії, спрямовані на зменшення споживання алкоголю із соціальних та особистих мотивів, але в той же час спостерігається збільшення попиту на безалкогольні вина з вмістом етанолу менше 0,5% об.

У статті розглянуті різні методи деалкоголізації та їх вплив на якість вина в аспекті зростаючого інтересу до безалкогольних вин і потреби в зниженні спиртуозності вин. Зокрема, зазначається, що популярні фізичні методи деалкоголізації, такі як мембранне розділення і термічна дистиляція, уможливають зниження вмісту алкоголю у винах та широко використовуються з комерційною метою. Проте ці методи можуть призвести до зміни кольору та втрати ароматичних сполук, що впливає на сенсорну якість вина в цілому.

Особлива увага приділяється двом ключовим недолікам деалкоголізації вина: законним обмеженням і технічним проблемам. По-перше, закони в різних країнах можуть визначати максимально допустиму кількість алкоголю в безалкогольних напоях, що обмежує можливості виноробів. Щодо другого фактора, то технічні складнощі полягають у важкості збереження органолептичних характеристик вина після деалкоголізації.

Проведено огляд популярних методів деалкоголізації вина, визначено особливості їхнього впливу на сенсорні властивості, а також описано сучасні методи гармонізації смаку й аромату деалкоголізованого вина. Представлена інформація буде корисною для виноробів і науковців при виборі оптимальних технік деалкоголізації, що задовольняють потреби різних категорій споживачів, включаючи молодь, вагітних жінок, водіїв і тих, хто не вживає алкоголь.

Ключові слова: безалкогольне вино, деалкоголізація, сенсорні властивості, вакуумна дистиляція, мембранне розділення, термічна обробка.

Постановка проблеми. Напої з низьким вмістом алкоголю стають усе більш популярними серед споживачів, що пов'язано зі зростанням інтересу до здорового способу життя та безпечності продукту. Незважаючи на широкий асортимент і популярність безалкогольних напоїв у Європі та США, український ринок таких напоїв лише починає розвиватися. З огляду на зростання попиту виробники почали більше уваги приділяти експериментам із застосуванням технологічних прийомів для деалкоголізації вин.

Виробництво безалкогольних винних напоїв вимагає використання спеціальних технологій та обладнання, що відрізняються від тих, які використовуються в

традиційному виробництві винопродукції. Розробка продукту, який задовольнятиме смакові уподобання споживачів і водночас буде економічно доцільним, може бути складним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вино — це продукт ферментації виноградного суслу або м'язги, який має складну класифікацію і залежить від кольору, тиску, насиченості вуглекислим газом, вмісту цукрів, витримки тощо. Зважаючи на вміст алкоголю, вина також можна класифікувати як безалкогольні (менше 0,5% об.), слабоалкогольні (0,5...1,2% об.), зі зниженим вмістом алкоголю (1,2...6,5% об.), з низьким вмістом алкоголю (5,5...8,5% об.) та алкогольні вина (9,0...14,0% об.). Вина також класифікуються за вмістом цукру: сухі (не більше 3,0 г/дм³), напівсухі (5,0...25,0 г/дм³), напівсолодкі (30,0...80,0 г/дм³) та десертні солодкі (120...200 г/дм³). Однак ці класифікації не є чіткими і можуть відрізнитися залежно від країн-виробників вина та чинного законодавства. У Великій Британії, наприклад, вина з вмістом алкоголю 1,2% об. класифікуються як слабоалкогольні вина, тоді як вина з вмістом алкоголю менше 0,5% об. називаються безалкогольними винами. На протипагу цьому, Китай класифікує слабоалкогольні вина як вина міцністю від 1,0...7,0% об., а безалкогольні вина — як вина міцністю в діапазоні 0,5...1,0% об.

У деяких дослідженнях доведено, що споживання вина має позитивний вплив на неврологічні захворювання, серцево-судинні захворювання, остеопороз, діабет і довголіття. При нормованому вживанні разом з їжею вино відіграє життєво важливу роль у пом'якшенні окислювального стресу та пошкодження ендотелію (внутрішній шар) судин, спричиненого їжею з високим вмістом жиру. Так, наприклад, споживання червоного вина може допомогти запобігти захворювань пов'язаних із серцем та діабетом другого типу, збільшити тривалість життя (Voban та ін., 2016). Китайські науковці дослідили, що вживання не більше двох бокалів вина знижують рівень смертності серед чоловіків на 19%. Крім того, дослідження австралійських вчених виявили помірне споживання вина, як одну з дев'яти звичок способу життя по всьому світу, які відомі своєю довгою тривалістю життя та міцним здоров'ям (Stockley, 2012).

Незважаючи на користь, пов'язану зі споживанням вина, деякі споживачі вважають, що вино може негативно відобразитися на здоров'ї людини, оскільки містить алкоголь, але відмова від алкоголю має додаткові переваги (зниження калорійності приблизно на третину), окрім того, безалкогольне червоне вино містить антиоксиданти, які можуть знизити ризик серцевих захворювань (Kucherenko, & Uspalenko, 2023).

Вина з високим вмістом алкоголю обкладаються більш високими імпорнтними митами та податками в деяких країнах. Наприклад, у Сполучених Штатах Америки вино з вмістом алкоголю 14% об. або менше оподатковується за ставкою 1,07 дол. США за галон, тоді як вино з вмістом алкоголю від 14,1% об. до 21% оподатковується за ставкою 1,57 дол. США за галон. У всьому світі поширена думка, що споживання алкогольного вина має зменшитися на користь слабоалкогольних або безалкогольних вин. Наразі зріст попиту на ці види напою спостерігаються в усьому світі. Також зростає відсоток дорослого населення, яке частіше шукає вина та напої з меншим вмістом алкоголю, що збільшило продажі безалкогольних вин. Ця тенденція спонукала виробників досліджувати та розвивати нові

види безалкогольних напоїв. Крім того, обсяг світового ринку безалкогольних вин оцінюється в 20 млрд дол. США із сукупним річним темпом зростання понад 45% у 2018 р. і, за прогнозами, збільшиться зі значним середньорічним темпом зростання на понад 7% протягом прогнозованого періоду (2019—2027 рр.), досягнувши вартісної позначки понад 30 млрд. дол. США. Згідно з іншими прогнозами світовий ринок продовжуватиме стабільно зростати, із середньорічним темпом зростання 10,4% з 2021 р. по 2031 р. порівняно з 8,8% середньорічним темпом зростання з 2016 по 2020 рік. Для того, щоб виробники вина могли задовольнити запити споживачів і адаптуватися до зростаючого ринку безалкогольних вин, їм необхідно виробляти високоякісні безалкогольні або слабоалкогольні вина (Fact. MR, 2022).

Деалкоголізація, або видалення алкоголю з напоїв, стала важливим напрямком удосконалення технології з різних причин, включаючи вимоги до здоров'я, релігійні або культурні переконання, а також відповідність законодавству.

Існують різні методи деалкоголізації, кожен з яких має свої переваги та вплив на органолептичні властивості напою. Одним із методів деалкоголізації є вакуумна дистиляція. Під час цього процесу алкоголь випаровується при низькому тиску і потім конденсується для подальшого використання. Цей метод дає змогу знизити вміст алкоголю в напої без значного впливу на їх смак та аромат.

Інший метод полягає у використанні конусної прядильної колони, яка працює на високих швидкостях і низьких температурах із збереженням летких ароматичних сполук з рідин. Цей процес дає змогу знизити вміст алкоголю в напої, мінімізуючи зміну притаманних органолептичних характеристик вина.

Однак важливо зазначити, що будь-який метод деалкоголізації все ж таки має вплив на органолептику напою. Наприклад, видалення алкоголю може змінити смак, аромат і текстуру напою, що може бути неприйнятним для споживачів. Тому важливо враховувати баланс між зниженням вмісту алкоголю та збереженням органолептичних характеристик напою.

Для того щоб покращити технології деалкоголізації та зменшити їх вплив на сенсорні характеристики, дослідники продовжують шукати нові методи, які забезпечать ефективне видалення алкоголю з напоїв, зберігаючи при цьому їх смакові якості та аромат. Отже, вдосконалення технологій деалкоголізації вина з мінімізацією втрат органолептичного комплексу вина є актуальним напрямком для розвитку виробництва безалкогольних вин в Україні.

Мета статті: аналіз методів зниження вмісту алкоголю у винах, включаючи принципи їх дії, технологічні особливості та вплив на зміну органолептичних характеристик і якість продукту в цілому.

Матеріали і методи. Матеріалами дослідження були наукові статі, у яких описуються методи зниження та видалення вмісту алкоголю у винах та їх вплив на якість та характеристики продукту. Особлива увага приділялася дослідженням, що зосереджувалися на збереженні органолептичних показників та раціональній вартості виробництва продукту.

Викладення основних результатів дослідження. Виробництво безалкогольних вин може бути досягнуто декількома методами, які можна розділити на три групи. Методи засновані на принципі зменшення та видалення етанолу на різних стадіях виробництва вина.

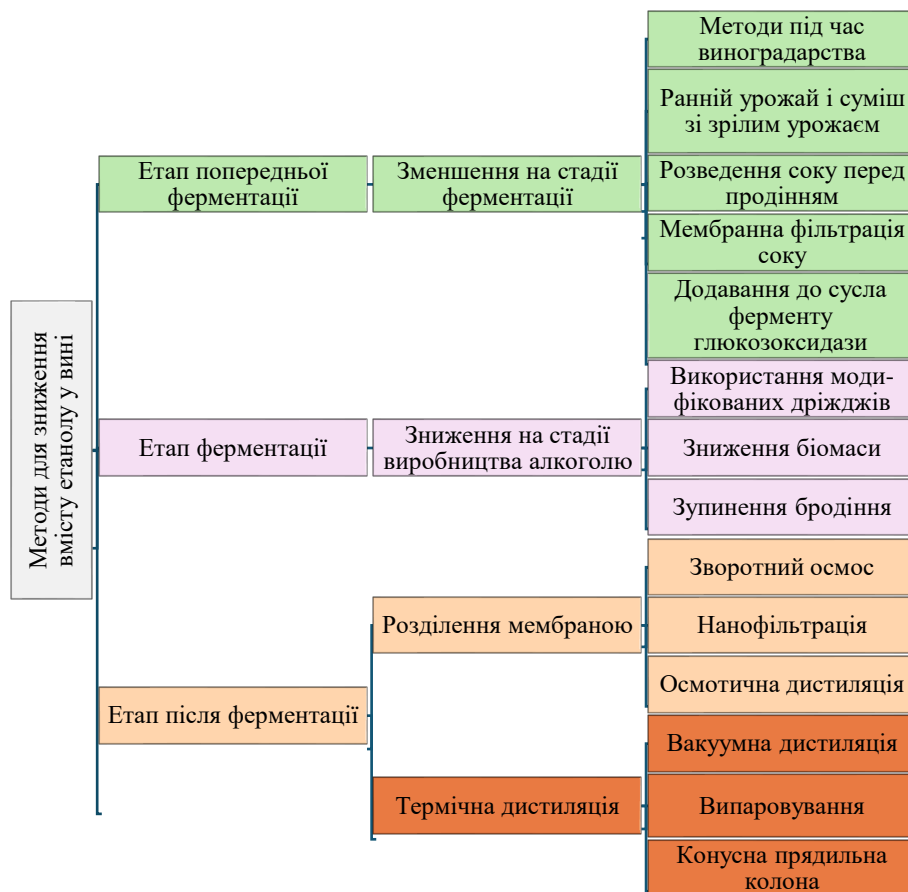


Рис. 1. Класифікація методів для зниження вмісту етанолу у вині

Зниження вмісту етанолу можливо досягти на етапі попередньої ферментації шляхом проведення ряду операцій з виноградом, спрямованих на зменшення вмісту цукру у ягодах. Наприклад, збір винограду раннього урожаю з низьким вмістом цукру, застосування операцій на виноградниках, мембранну фільтрацію соку та додавання до суслу ферменту глюкооксидази.

Зменшення етанолу також може бути досягнуто на етапі ферментації через використання спеціально підібраних штамів дріжджів, зниження біомаси та припинення бродіння.

Усі ці методи на вищезазначених етапах спрямовані лише на зменшення вмісту етанолу, але не гарантують його повного видалення із вина. Тому в технології безалкогольних вин застосовуються шість методів деалкоголізації, які можна розділити на дві підгрупи: методи розділення мембраною (зворотний осмос, нанофільтрація, осмотична дистиляція) та методи термічної дистиляції (вакуумна дистиляція, випаровування або дистиляція та використання конусної прядильної колони).

Зменшення вмісту цукру на стадії попереднього бродіння вина є одним із поширених методів виробництва вин із меншим або зниженим вмістом алкоголю,

але його використання не забезпечує повного видалення етанолу. Він включає такі методи, як розведення соку (Boban та ін., 2016), фільтрація соку за допомогою мембран (Stockley, 2012), використання ферментів (наприклад, глюкооксидази) (Frost та ін., 2015), сепаж винограду різного ступеня стиглості, включаючи й недозрілий виноград, виноградарські практики (наприклад, використання регуляторів росту, зменшення площі листя, зрошення перед збиранням) (Alston, Fuller, & Tumber, 2015).

За останні 20 років, у зв'язку зі зміною клімату в напрямку зростання середньої температури у вегетаційний період, у винограді збільшується рівень глюкози та фруктози в момент технічної зрілості, що впливає на вміст спирту у вині (Jones, White, & Storchmann, 2005). Виробництво спирту можна контролювати на етапі попереднього бродіння шляхом зниження концентрації зброджуваних цукрів у соку за допомогою різних виноградарських практик.

Операції із зеленими частинами виноградної лози полягають у видаленні різних зелених вегетативних і генеративних органів куща або його частини із цілло регулювання росту і харчування залишкових частин із кращим використання світла для отримання високих врожаїв та кращої якості дозрівання виноградної ягоди. До таких операцій відносяться обламування пагонів, прищеплювання, чеканка, часткове видалення листя, проріджування ягід тощо. Але одним із широко використовуваних є зменшення площі листя. Доведено, що зменшення площі листя має значний вплив на швидкість накопичення цукру в ягодах (Palliotti, Cini, & Poni, 2013).

Концентрація виноградного цукру зростає зі збільшенням площі листків до плоду. Це пов'язано із фотосинтетичним потенціалом — виробничим індексом листової поверхні на відповідний відрізок часу. Розмір листової площі розраховується відповідно до сортових властивостей винограду та залежить від навантаження на кущ і складу ґрунту. Якщо співвідношення площі листків до плодів високе, то до моменту технічної зрілості винограду, коли його смак досягає своїх оптимальних характеристик і настає фенольна стиглість, концентрація цукру суттєво збільшується (Liguori, Russo, & Matteo, 2018). Проведені дослідження на виноградній лозі сорту Шираз (Zhang та ін., 2017) показали, що зменшення площі листя, викликане верхівковою дефоліацією, сприяє зниженню рівня алкоголю в вині. Подібні дослідження були проведені іншими авторами, які відмітили, що механічний метод видалення листя був застосований на лозах сорту Санджовезе через чотири тижні після затримки накопичення цукру, що було ефективним для уповільнення синтезування цукрів в ягодах і досягнення меншого вмісту алкоголю у вині (Palliotti, Cini, & Poni, 2013). Іноземні вчені скоригували співвідношення площі листя винограду до культури на ранній стадії росту винограду, щоб зменшити концентрацію зброджуваних цукрів у винограді під час дозрівання, що вказало на перспективність у управлінні концентрацією цукру у винограді (Stoll, Bischoff-Schaefer, & Henschke, 2013). Крім того, через обрізку пагонів винограду сорту Гренаш вчені виявили 20-денну затримку дозрівання винограду, нижчий рН (від 0,1 до 0,3), зниження розчинних сухих речовин на 14% і зниження загального вмісту антоціанів на 10...27% (Martínez De Toda, Balda, 2013). Дані операції із виноградними лозами протягом 3 років, призвели до зниження вмісту етилового спирту на 2% об. (Sun, Sacks, & Neuvel, 2012).

Ряд авторів відмічали, що незалежно від сорту або продуктивності виноградної лози, застосування регуляторів росту може призвести до значного зниження концентрації суслу цукру та вмісту спирту (Stoll, 2013; Palliotti, Poni, & Bernizzoni, 2010). Так, австралійські вчені використовували антитранспірант (1-нафтаїнову оцтову кислоту) на винограді сорту Сіра, що ефективно зсуває початок дозрівання ягід і покращує регулювання накопиченням цукру, не впливаючи на сенсорні характеристики вина (Böttcher, Harvey, & Davies, 2011). Однак, антитранспірантна обробка може мати негативний вплив на вміст фенолів (особливо в червоних сортах винограду) та антоціані (Stoll, 2013; Palliotti, Poni, & Bernizzoni, 2010).

Ще одним методом зменшення вмісту цукрів у винограді є зсування дати збору врожаю. Деякі червоні та білі сорти винограду були вивчені у виробництві слабоалкогольних вин, застосовуючи сепажну технологію змішування дозрілого винограду з раннім зібраним виноградом. Незрілий червоний або білий виноград можна використовувати для виготовлення купажованих слабоалкогольних вин з високою кислотністю, які потім додають до зрілого насиченого вина. У дослідженнях зарубіжних науковців цей метод сприяє зниженню концентрації етанолу на 3% об., однак в органолептичних показниках вина мали неприємну кислотність та зеленуваті тони та характеризувалися незрілістю смаку. Автори відмічали, що вина виготовлені таким способом, мали нижчий вміст алкоголю, рН та загальної кислотності, але не мали суттєвих відмінностей в інших компонентах вина (Piccardo та ін., 2019; Kontoudakis, Esteruelas, & Canals, 2011).

Дослідження ароматичного профілю вин з винограду сортів Бірбера та Піно Нуар, вироблених з раннього врожаю, дозволили отримати оптимальні органолептичні характеристики вина при зниженні спиртуозності на 3,2% об. (Asproudi та ін., 2018).

Одним із методів зменшення вмісту спирту у вині є додавання води до виноградного суслу для зменшення вмісту цукру. Такий технологічний прийом дозволено у Сполучених Штатах (за винятком Каліфорнії), де вода може бути додана в невеликих кількостях як допоміжний засіб для досягнення бажаного результату. Але ця практика є незаконною у більшості країн Європи, в тому числі й в Україні, Південній Африці, Новій Зеландії та ін. (Longo, Blackman, & Schmidtke, 2017). Водночас деякі дослідження повідомляють про позитивні результати додавання води у виноградне сусло для зниження вмісту спирту. Наприклад, австралійські вчені досліджували вплив додавання води в суслу на органолептичні характеристики та зміну хімічного складу вина із винограду сорту Каберне-Совіньйон. Такий технологічний прийом сприяв зниженню спиртуозності, але значне розбавлення суслу водою призводило до втрати насиченості кольору та інтенсивності смаку. Невеликі обсяги води суттєво не впливали на хімічний склад вина, включаючи загальну кількість антоціанів, інтенсивність кольору вина та загальний вміст фенольних сполук. Однак більш високі рівні додавання води близько 19% знижують кислотність суслу, концентрацію фенольних сполук, а також негативно впливають на зовнішній вигляд і сенсорні властивості вина (Schelezki, Suklje, & Jeffery, 2018).

Фільтрація виноградного суслу перед бродінням для зниження цукру у ягодах є ще одним методом зниження вмісту спирту. У ряді досліджень вивчалася використання мембранної технології для видалення цукру з суслу перед бродінням

(Harbertson, Mireles, & Ross, 2009). Наприклад, французькі вчені досліджували зниження цукру у виноградному суслі з винограду сорту Тінта де Тоно за допомогою одно- та двоступеневого процесу нанофільтрації. Необроблене сушло змішували з фільтраційним пермеатом і ретенатом (фракція суміші, яка не проходить через фільтруючу мембрану), яке отримували в процесі нанофільтрації, в різних пропорціях для зниження вмісту спирту на 2% (Garcia-Martin, та ін., 2010). Однак відмічали незначне зниження інтенсивності кольору і деяких летких сполук, а також менше виражені аромати квітів та фруктів. Аналогічним чином іспанські науковці досліджували одностадійний і двостадійний процес нанофільтрації зі спірально-намотаною мембраною для зниження вмісту цукру в білому і червоному суслі до ферментації. Контрольне сушло, а також фільтраційний пермеат і ретенат змішували і ферментували. Якщо порівнювати з контрольними винами, то вина, отримані після бродіння купажу, повинні демонструвати зниження алкоголю приблизно на 1—2% об. без істотних відмінностей у сенсорних характеристиках (Salgado, Fernandez, & Pradanos, 2015). Крім того, деякі дослідники перед бродінням використовували процес зворотного осмосу для фільтрації виноградного сусла із Тінта Поріз, Шираз та Аліканте, отримане вино мало до 5% об. зменшення вмісту алкоголю та зниження вмісту поліфенолів та антоціанів, що вплинуло на інтенсивність кольору та інші сенсорні властивості (Mira, Guiomar, & De Pinho, 2017).

Для зниження вмісту спирту у вині використовується ще один метод, в основі якого видалення глюкози із виноградного сусла перед бродінням за допомогою ферменту глюкозооксидази, отриманого із гриба *Aspergillus niger*. Під час першоступеневій реакції глюкозооксидаза може перетворювати β -D-глюкозу в D-глюконо-лактон, утворюючи перекис водню, а під час другоступеневій реакції вона може каталізувати перетворення D-глюконо-лактону в глюконову кислоту. Ці реакції призводять до окислення цукру в суслі, що сприятиме зменшенню вмісту спирту. Водночас така ферментативна активність призводить до тонів окисненості у винах та втрати сортового аромату.

Існує декілька досліджень про використання глюкозооксидази для зниження вмісту алкоголю у винах. Вчені використовували до 2 г/дм³ глюкозооксидази для отримання білого вина зі зниженим вмістом алкоголю з виноградного соку Ріслінг. Результати показали, що після 6 год бродіння близько 87% глюкози було перетворено на глюконову кислоту, що сприяло до 4,3% зниження вмісту алкоголю у вині. Також було виявлено, що концентрація оцтової кислоти в оброблених винах глюкозооксидазою нижча порівняно з контрольними винами (Biyela, Toit, & Rensburg, 2009). Під час обробки виноградного сусла з білих сортів винограду ферментом глюкозооксидази було досягнуто зниження алкоголю на 2%, але вина мали значно вищу кислотність та менший фруктовий смак та аромат (Röcker, Schmitt, & Grossmann, 2016).

Один із трьох методів зниження вмісту етанолу у вині на етапі ферментації — це використання дріжджів роду *Metschnikowia*. Такі дріжджі не належать до роду *Saccharomyces*, їх ферментативна активність наразі глибоко вивчається з метою застосування їх у виробництві вин зі зниженою спиртуозністю. Деякі штами дріжджів можуть зброджувати менше цукру або перенаправляти метаболізм вуглецю, запобігаючи надмірному виробленню етанолу під час бродіння. Багатьма вченими

було досліджено та проаналізовано використання таких дріжджів у змішаному бродінні або послідовному бродінні з *Saccharomyces cerevisiae* для зниження етанолу в діапазоні від 0,2% до 2% (Lemos та ін., 2019; Canonico та ін., 2019).

Деякі дослідження показали, що крім зниження етанолу у вині, дріжджі *Non-Saccharomyces cerevisiae* мають потенціал для покращення органолептичних показників вина (Milanovic, Ciani, & Comitini, 2020). Дріжджі, що належать до роду *Metschnikowia*, синтезують ефіри під час бродіння внаслідок їх специфічного метаболізму. Крім того, дослідження показали, що деякі види або штами дріжджів *Non-Saccharomyces cerevisiae* виділяють водорозчинний червоний пігмент під назвою пульчерримін, який має антимікробну дію на небажані мікроорганізми (Fernández, Ubeda, & Briones, 2000).

Метаболічна інженерія за допомогою методів модифікації генів або адаптивної еволюції та селекції призвела до розробки модифікованих штамів дріжджів, які можуть знижувати вміст етанолу у вині під час бродіння (Puškaš, Miljić, & Vučurović, 2020; Tillay, Ortiz-Julien, & Dequin, 2014). Так, наприклад, шляхом введення п'яти різних генів науковці вивели штам дріжджів *Saccharomyces cerevisiae* шляхом зниження мітохондріального та цитозольного рівнів, що призвело до зниження вироблення гліцерину й етанолу. Незважаючи на здатність знижувати вміст алкоголю, генетично модифіковані штами дріжджів *Saccharomyces cerevisiae* можуть виробляти ацетат, ацетальдегід і ацетоїн, що може негативно вплинути на сенсорні якості вина. Ще одним недоліком використання модифікованих штамів дріжджів для зниження вмісту алкоголю у вині є відмова споживачів від використання генетично модифікованих організмів (ГМО) у виробництві продуктів харчування та напоїв. Тому цей метод не знайшов широкого використання у виноробстві (Hou, Lages, & Vemuri, 2009).

Другим методом на етапі ферментації є зменшення біомаси, який використовується для зменшення швидкості бродіння шляхом зменшення популяції дріжджів під час бродіння сусла. Деякі автори досліджували виробництво слабоалкогольного сидру шляхом відновлення біомаси за допомогою центрифугування. Результати цих досліджень показали, що ця техніка дає змогу отримати сидр з низьким вмістом алкоголю, але без вираженого фруктового смаку. Також слід відмітити, що такий технологічний прийом, зазвичай, призводить до отримання збродених напоїв зі значним залишковим вмістом цукрів, які є мікробіологічно нестабільними і можуть призвести до псування вина (Fan та ін., 2012; Malfeito-Ferreire, 2011).

Ще одним методом виробництва слабо- або безалкогольних вин і напоїв є зупинення бродіння. У цьому методі спиртове бродіння навмисно зупиняють до його завершення, контролюючи температуру і час бродіння. Короткий час бродіння, що використовується в цьому методі, призводить до отримання недобродів, тобто вин із залишковим вмістом цукру. Такі вина є мікробіологічно нестійкі і можуть вимагати додаткових стабілізуючих процедур, таких як додавання діоксиду сірки, консервація або термічна пастеризація для продовження терміну зберігання. Крім того, короткий час бродіння обмежує утворення летких речовин з ароматом бродіння, таких як складні естери, ацетати, альдегіди та вищі спирти, які дріжджі син-

тезують у великих кількостях під час бродіння, що призводить до отримання слабоалкогольних вин зі зниженими ароматичними характеристиками (Carpese, & Romano, 2019).

Вищезгадані методи для зниження вмісту етанолу на етапі попередньої ферментації й основного бродіння дають змогу лише частково видалити вміст етанолу із вина, тому найбільш ефективними методам видалення алкоголю є етап після ферментації. Такий технічний прийом має назву «деалкоголізація».

Деалкоголізація — це технічний процес видалення алкоголю з напоїв, що містять етиловий спирт. Найбільш розповсюджено два способи деалкоголізації:

- на основі мембрани (зворотний осмос, нанофільтрація, осмотична дистиляція);
- термічна дистиляція (вакуумна дистиляція, випаровування, використання конусної прядильної колони).

Мембранні процеси — це процеси фізичного розділення, які можуть зменшити або видалити етанол з вина за допомогою напівпроникної мембрани.

Зворотний осмос — це процес розділення на основі мембрани, який використовує гідрофільну напівпроникну мембрану, порожнисте волокно, пластину та каркас або трубчастий модуль для створення градієнта концентрації або тиску, відомого як осмотичний тиск між двома розчинами. Цей метод використовується у виноробстві для часткового або повного видалення алкоголю із вина (Schmidtke, Blackman, & Agboola, 2012; Del Olmo, Blanco, & Hernandez, 2014). Схема методу зворотного осмосу наведена на рис. 2.

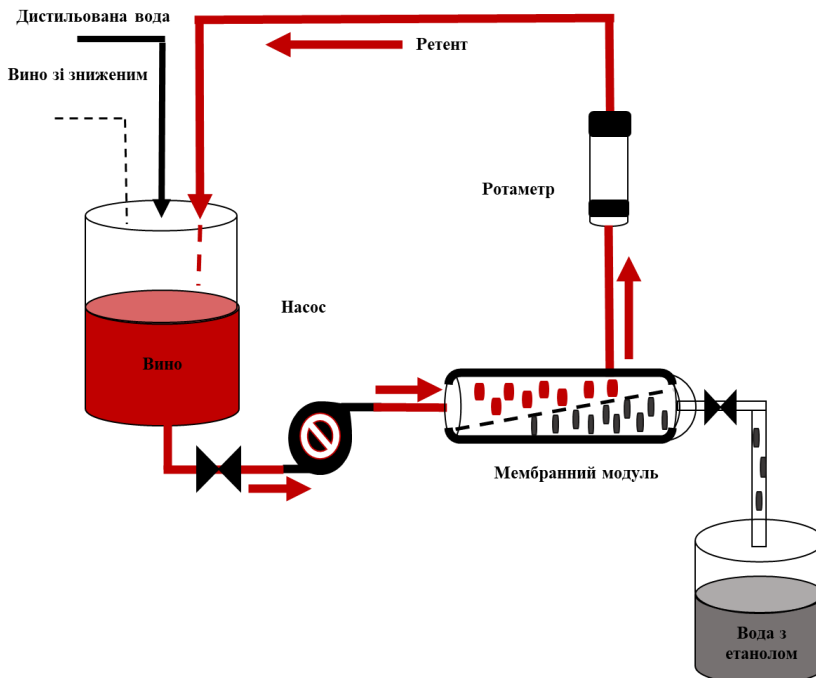


Рис. 2. Схема методу зворотного осмосу

У цьому методі природний осмотичний тиск створюється тиском, який розділяється на два розчини з різною концентрацією, що протікають тангенціально, паралельно або по колу через напівпроникну мембрану. Щоб відновити рівновагу природного осмотичного тиску, спирт і вода у вині проходять через напівпроникну мембрану з розчину високої концентрації в розчин низької концентрації (Russo, Liguori, & Di Matteo). Це явище зменшує або видаляє етанол з вина, в результаті чого вино виходить з низьким вмістом етанолу або без нього, що залежить від початкової спиртуозності вина.

Один із принципів роботи установки зворотного осмосу — режим діафільтрації. У вихідну ємність постійно додають дистильовану воду для підтримки об'єму вина, оскільки об'єм вина зменшується внаслідок видалення етанолу спільно з водою. Це дає змогу безперервно знижувати вміст етанолу у вині у вихідні ємності та уникнути зменшення мембранного потоку.

За даними зарубіжних науковців, вина зі зниженим вмістом алкоголю, вироблені за допомогою процесу зворотного осмосу, зазвичай, мають той же смак і аромат, що й вина, отримані за допомогою інших термічних методів (Cologna та ін., 2019). Так, наприклад, вчені за допомогою процесу зворотного осмосу змогли досягнути зменшення вмісту етанолу на 75% в яблучному сидрі, створюючи тиск від 1,0 МПа до 5,0 МПа та при температурі 15 °С без значних втрат основних ароматичних сполук. Це, швидше за все, пов'язано з більш низькою температурою обробки і кращим поділом з'єднань у процесі зворотного осмосу. На противагу цьому французькі вчені повідомили про свої дослідження щодо деалкоголізації зворотним осмосом вин з винограду сортів Мерло та Шираз і про негативний вплив цього методу на аромат вин (Varavuth, Jiratananon, & Atchariyawut, 2009; Massot, Mietton-peuchot, & Milisic, 2008).

Однак цей метод має ряд переваг. Він вимагає менше енергії, ніж інші процеси дистиляції, оскільки застосовуються низькі температури — від 1 °С до 5 °С. Крім того, процес зворотного осмосу дає змогу відновлювати та надалі використовувати етанол, отриманий у процесі деалкоголізації. Але, незважаючи на ряд переваг, основним недоліком цієї методики є додавання води для досягнення ефективної деалкоголізації, яка може негативно вплинути на органолептичні характеристики безалкогольних вин, також потребує законодавчого узгодження використання води в технології безалкогольних вин (Takács, Vatai, & Korány, 2007).

Нанofільтрація — це процес розділення рідини під тиском, в якому використовується напівпроникна мембрана з порами розміром від 1 до 10 нм (Banvolgyi, Kiss, & Vatai, 2006). Схема методу нанofільтрації представлена на рис. 3.

Нанofільтраційні мембрани виробляються з різних матеріалів, але, як правило, з міцного полімеру, який розміщений на несучому шарі. Такий склад мембран забезпечує високу селективність і витривалість у процесі нанofільтрації. Селективні мембрани розщеплюють вихідний продукт на дві фракції: ретентат або концентрат, який утримується на мембрані, і пермеат, який проходить через неї. Нанofільтраційні мембрани утримують менші молекули порівняно з ультрафіолетовими, але вони пропускають деякі іони та низькомолекулярні сполуки, які утримуються на мембранах зворотного осмосу. Однак утримання малих молекул при-

зводить до підвищення осмотичного тиску на поверхні мембрани і для забезпечення потоку пермеату необхідно застосовувати високий робочий тиск від 10 до 30 бар.

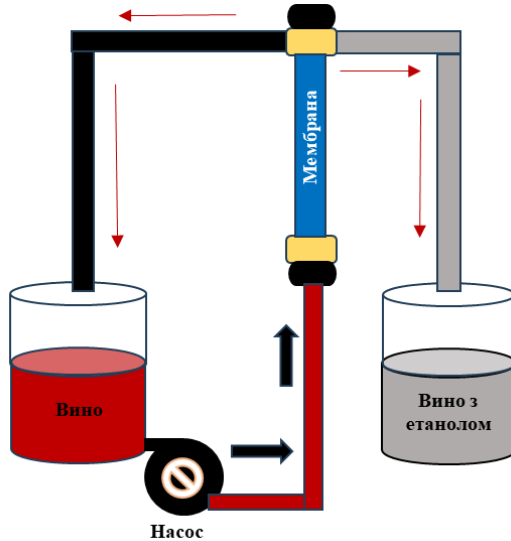


Рис. 3. Схема методу нанофільтрації

У разі високого тиску збільшується потік пермеату, пришвидшується забруднення мембрани та поляризація концентрації. Відповідно, обростання мембрани призводить до зменшення флюсу та обмежує її використання, але це також може призвести до підвищення бажаного утримання сполук. Ці властивості дають змогу застосовувати нанофільтраційні мембрани в різних галузях промисловості: виноробній, молочній, цукровій, фармацевтичній, водопровідній і стічній тощо. Здатність нанофільтраційних мембран надає можливість утримувати біологічно активні сполуки та вилучати фенольні сполуки з різних матриць. Крім того, процес нанофільтрації може проводитися за кімнатних температур, що забезпечує їх перевагу перед термічними процесами за концентрацією, тому він знайшов широке застосування у виробництві різних концентрованих соків і для корекції хімічного складу соку (Castro-Munoz, Conidi, & Cassano, 2018).

Вода, оцтова кислота, етанол і деякі низькомолекулярні сполуки та іони можуть проходити через нанофільтраційні мембрани, але на них затримується високий відсоток корисних сполук, що дає змогу застосувати цей процес для концентрації вина і сусла, підвищення цукру або аромату, корекції вмісту спирту й кислот, усунення дефектів (небажаного аромату) тощо. Деалкоголізація вина шляхом нанофільтрації стала центром інтересу багатьох досліджень, оскільки ця методика сепарації не передбачає застосування високих температур, вона споживає низьку кількість енергії та мінімально змінює початкові властивості вина. Крім того, мембрани нанофільтрації можуть бути використані для фракціонування поліфенолів та екстракції з виноградних вичавок, для покращення або корекції аромату вина чи розділення оцтової кислоти (Liguori та ін., 2015; Diban та ін., 2013).

Обробка нанофільтрацією може застосовуватися для всіх типів вина незалежно від кольору, хімічних властивостей або різних методів виробництва. Однак кожне

вино відрізняється і це має вплив на процес нанофільтрації (Ivić та ін., 2021).

Так, угорські вчені досліджували продуктивність плоскої листової мембрани у концентрації цінних компонентів червоного вина (12,8% об. етанолу). Вони отримали ретентат із вмістом етанолу 9,8% об. та із збільшенням приблизно вдвічі таких показників, як загальна кислотність, екстракт, вміст цукру та летких кислот. Крім того, у дослідному зразку спостерігалася невелика втрата аромату (Banvolgi, Kiss, & Vatai, 2006).

Португальські вчені порівняли чотири нанофільтраційні мембрани і одну мембрану зворотного осмосу під час деалкоголізації червоного вина міцністю 12% об. при тиску менше 16 бар і за температури 30 °С. Отримані результати дали змогу встановити, що мембрани нанофільтрації сприяють більш високому потоку пермеату (від $4,13 \times 10^3$ до $7,10 \times 10^3$ $\text{кгм}^{-2}\text{s}^{-1}$) та ефективному виділенню етанолу (від 7,1% до 10,3%), що надає можливість отримати деалкоголізовані зразки вина з більш перспективними органолептичними властивостями, ніж мембрана зворотного осмосу (Catarino, & Mendes, 2011).

Осмотична дистиляція відома як випарна дистиляція або ізотермічна мембранна дистиляція — це технологія на основі мембрани, яка має дві водні фази, вино (що містить леткі сполуки) і вода (діє як рідина для зачистки), циркулюють у протитечії на протилежних сторонах гідрофобного мембранного модуля з порожнистого волокна. Рухильною силою в цьому процесі є парціальний тиск або тиск пари легкої розчиненої речовини у вині й рідині. Механізм видалення етанолу в процесі осмотичної дистиляції відбувається в послідовності, при якій етанол у вині спочатку випаровується на стороні подачі пор мембрани, потім пари етанолу дифундують через пори мембрани, виходячи з пор мембрани і конденсуються в розчині води для зачистки (Esteras-Saz та ін., 2021). Схема методу осмотичної дистиляції представлена на рис. 4.

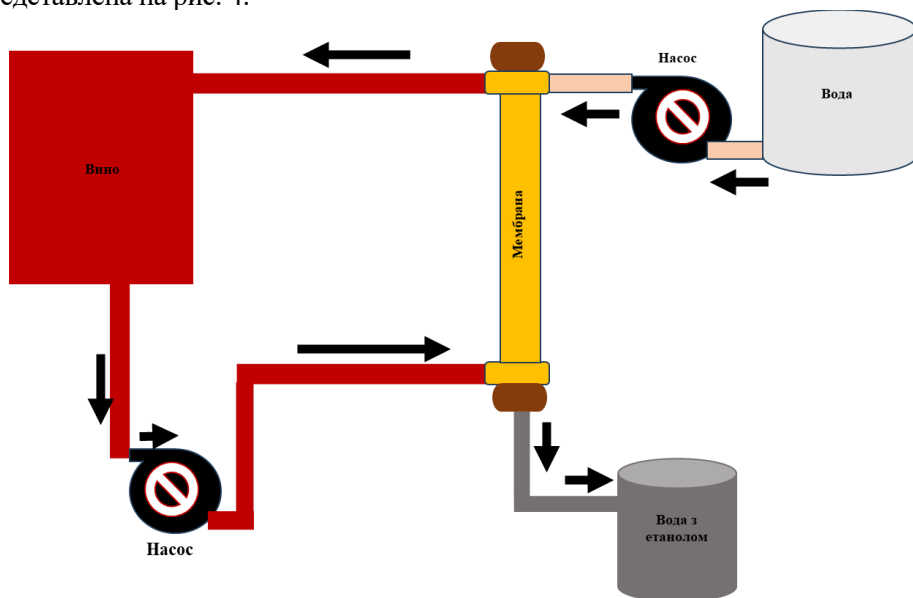


Рис. 4. Схема методу осмотичної дистиляції

Основними перевагами процесу осмотичної дистиляції є низьке споживання енергії, відсутність термічної обробки вина, тому що процес здійснюється за температур від 10 °С до 20 °С. Під час цього процесу відбуваються незначні втрати аромату та смаку, а також використовується вода як засіб для зачистки. (Liguori та ін., 2015; Esteras-Saz та ін., 2021).

Іспанські вчені досліджували часткову dealкоголізацію вин із винограду сортів Гарнача, Ксарело і Темпранільйо за допомогою контактора з порожнистого волокна промислового масштабу з площею мембрани 20 м², швидкість подачі та зачистки в межах 600 л год⁻¹ до 300 л год⁻¹, співвідношення об'єму подачі/зачистки в діапазоні від 1,5:1 до 1:4,7 і рН від 7 до 3. Вони виявили, що міцність під час dealкоголізації зменшується з 1,3% до 5% об. за мінімальної втрати ароматичних сполук приблизно на 20% (Taran, Stoleicova, & Morari, 2014). Крім того, італійські вчені досліджували вплив різних рівнів зниження вмісту алкоголю від 4,9 до 10,9% об. на леткі сполуки, феноли та сенсорні якості червоного вина Монтепульчано д'Абруццо з початковим вмістом етанолу 13,2% об. За результатами осмотичної дистиляції dealкоголізовані вина мали задовільний ароматичний профіль, досліджувані вина, що мали 8,3% об. (-4,9% об.) та 6,9% об. (-6,3% об.), зберігали помітну кількість ефірів (понад 84% та 82% відповідно), але органолептичні показники залишалися незмінними у всіх зразках (Cogona та ін., 2019).

Одним із найбільш популярних методів dealкоголізації є теплова обробка, яка включає випаровування, використання конусної прядильної колони та вакуумну дистиляцію.

Випаровування — це концентраційний мембранний процес, який працює за принципом часткового випаровування сумішей рідин з однаковими температурами кипіння, де рідка фаза змінюється на парову фазу (Sun та ін., 2020). Схема методу випаровування представлена на рис. 5.

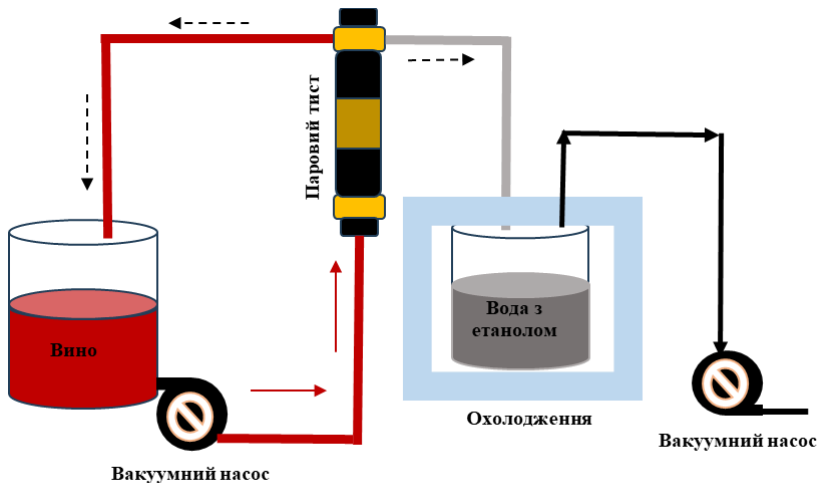


Рис. 5. Схема методу випаровування

Під час випаровування вино проходить через щільні полімерні мембрани в фотоелектричному процесі на прикладі моделі «розчин-дифузія», яка включає: адсорбцію цільового компонента із суміші до селективного шару фотоелектричної мембрани на основі її хімічної спорідненості, дифузію компонента-мішені через мембрану через градієнт концентрації та десорбція компонента на пермеатній стороні мембрани.

На основі фотоелектричної техніки використовують видалення етанолу та відновлення аромату з алкогольних вин і напоїв. Австралійські дослідники розробили експериментальну пілотну фотоелектричну установку, яка успішно використовувалася для виробництва як безалкогольних і слабоалкогольних вин (Takács, Vatai, & Korány, 2007). Вчені з Китаю досліджували виробництво безалкогольних вин і виноградних спиртів за допомогою технології випарної-мембрани і виявили, що метод випаровування виробляє більше ароматичних сполук, в результаті чого виходить вино з кращим ароматом і смаком, ніж традиційне дистильоване вино. Випарування має ряд переваг, включаючи низьке споживання енергії та відсутність додаткових розчинників, низьку робочу температуру та менші втрати ароматичних сполук, оскільки утворюється менше відходів. Однак використання фотоелектричних модулів, на основі яких працює метод випаровування, має такі недоліки, як низька швидкість проникнення через низькі температури (Yang, Youshio, & Asaeda, 2006; Figoli, Santoro, & Basile, 2015).

Одним із найменш популярних, але високоефективних методів є конусна прядильна колона, яка працює на високих швидкостях і низьких температурах зі збереженням летких ароматичних сполук з рідин (Makarytchev, Langrish, & Fletcher, 2004). Метод використовується у виноробній промисловості для виробництва концентрату виноградного суслу, видалення діоксиду сірки з виноградного суслу, відновлення летких ароматичних сполук і зниження концентрації етанолу у винах. Блок-схема методу конусної прядильної колони представлена на рис. 6.

Установка конусної прядильної колони складається з обертового вертикального валу і вертикально упакованих нерухомих конусів, які обертаються по черзі, за типом падаючого плівкового контактора (Makarytchev, Langrish, & Fletcher, 2005).

Такий метод деалкоголізації передбачає двоетапний процес зниження вмісту спирту в готових винах. На першому етапі вино пропускають через конусу при низькому вакуумному тиску (0,04 атм) і температурі близько 28 °С для відновлення летких ароматичних сполук вина приблизно в 1% від загального об'єму продукту, на другому етапі вино деароматизується при дещо вищому вакуумному тиску та температурі близько 38 °С для видалення спирту. Потім деалкоголізоване вино виготовляють шляхом поєднання відновлених ароматів вина з деалкоголізованою та деароматизованою частиною (Belisario-Sánchez, Taboada-Rodriguez, & Lopez-Gomez, 2009).

Margallo із співробітниками вивчали можливість безперервного видалення етанолу після бродіння із застосуванням конусної прядильної колони, за допомогою якої видаляли близько 85% етанолу. Однак було виявлено, що вакуум, застосований під час процесу, впливає на продуктивність дріжджових клітин, змушуючи клітини зменшуватися в розмірах і набувати іншої форми (Margallo та ін., 2015).

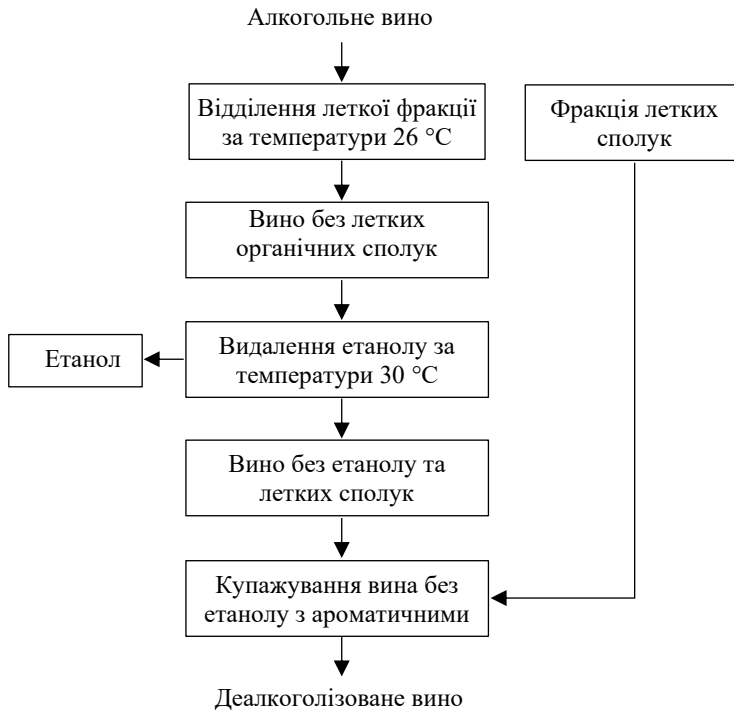


Рис. 6. Блок-схема методу конусної прядильної колони

Вчені досліджували вплив деалкоголізації за допомогою цього методу на фенольний склад 19 зразків вина (13 червоних, 2 рожевих і 4 білих) і виявили значні відмінності в загальній кількості фенолів, ресвератролу, винних ефірів, флавонолів та активності поглинання вільних радикалів між алкогольними та деалкоголізованими винами, що пов'язували зі змінами концентрації діоксиду сірки, які видалялися разом зі спиртом. Іспанські вчені для покращення ароматичного профілю деалкоголізованого вина проводили маніпуляції відсотком ароматичної екстракції та швидкістю потоку базового вина, які дали змогу провести відновлення від 97% до 100% загальної ароматичної фракції вин. Разом з можливістю деалкоголізації вин було відмічено високу вартість обладнання й експлуатація конусної прядильної установки, що є основним та суттєвим недоліком її застосування (Belisario-Sánchez, Taboada-Rodriguez, & Lopez-Gomez, 2012).

Найбільш популярним методом деалкоголізації є вакуумна дистиляція. Вакуумна дистиляція — це тепловий або термічний процес, який включає випаровування, дистиляцію та конденсацію, які відбуваються в умовах вакууму. Це добре відома технологія, яка використовується для самозбагачення суслу та регулювання вмісту винного спирту.

З допомогою цього методу можна видалити майже весь алкоголь із вина або відокремити його від менш летких компонентів. Крім того, після закінчення обробки першу частину дистиляту можна відновити і додати дозовано до деалкоголізованого вина. Схема методу вакуумної дистиляції представлена на рис. 7.

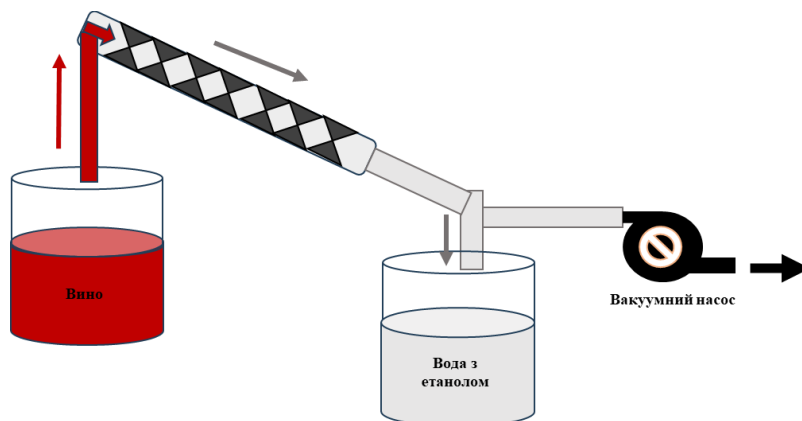


Рис. 7. Схема методу вакуумної дистиляції

Зазвичай, у цьому методі вино поміщують у сильний вакуум. Вино обережно нагрівають для википання алкоголю за температури від $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ і працюють при тиску менше $0,1$ бар, оскільки вакуум має вирішальне значення, тому що зі збільшенням всмоктування температура кипіння вина падає. Низька робоча температура і відновлення перших порцій дистиляту, які багаті ароматичними сполуками, сприяють зменшенню втрат легких сполук і максимальному збереженню аромату й смаку деалкоголізованого вина (Motta та ін., 2017).

Так, наприклад, китайські вчені для деалкоголізації вин використовували дистиляційну установку лабораторного масштабу, яка складається з роторного випарника RE-6000A, вакуумного насоса V-700, вакуумного регулятора V-850, діагонального конденсатора системою водяної бані (об'єм 10 л). Для деалкоголізації використовували по п'ять літрів червоних, рожевих і білих вин. При деалкоголізації за один раз обробляли 400 мл в колбі об'ємом 1 л вакуум-дистиляційного апарата. Колбу накривали чорним пластиковим матеріалом, щоб уникнути легкого окислення компонентів вина. Обертання колби встановлювалося за 100 об/хв, температура водяної бані — $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, тиск вакууму — $0,08$ МПа, температура конденсації — $9\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ і зберігалася постійною протягом усіх експериментів з деалкоголізації. Процес деалкоголізації займав $2,5$ години. Порцію води поповнювали до того ж об'єму, і як тільки партія досягала заданої температури, експеримент починався зі швидкістю, температурою й тиском, зазначеними вище. Наприкінці кожного процесу деалкоголізації залишкове вино ($0,7\%$ етанолу) переміщували в пляшки з коричневого скла об'ємом 750 мл, закупорювали, давали охолонути при кімнатній температурі та зберігали при температурі $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ для подальших аналізів (Wenten, 2017; Benedict, Parulekar, & Tsai, 2006).

Науковці з Молдови досліджували вплив тиску ($-0,6$, $-0,7$, $-0,8$, $-0,9$ і -1 кгс/см²) на фізико-хімічні властивості білих і червоних вин. Їхні результати показали швидке зниження вмісту алкоголю на $2,9\%$ об. для червоного вина та $2,2\%$ об. для білого вина при тиску -1 кгс/см². Якщо порівняти з мембранною технологією, вакуумна дистиляція сприяє більшому зниженню вмісту алкоголю та концентруванню інших сполук, таких як флавоноїди, органічні кислоти, антоціани та катіони (Motta та ін., 2017). Незважаючи на здатність технології цього

методу відновлювати етанол, він може спричинити втрати майже всіх летких сполук, насамперед етилових ефірів та аліфатичних спиртів.

Висновки

Зменшення або повне видалення етанолу з вина в останні роки викликало значний інтерес у виробників виноробної продукції. Це пов'язано як зі зростанням попиту на здоровий спосіб життя, так і з підвищенням обізнаності про вплив алкоголю, соціальними потребами, зміною уподобань серед молоді та розширенням ринку для людей, які не вживають алкоголь з різних причин. Також значну роль відіграють зміни клімату, що спричинили переорієнтацію споживачів на напої з меншим вмістом алкоголю.

Для досягнення зниження вмісту алкоголю на різних етапах виробництва вина використовували різні методи, починаючи з обробки винограду і завершуючи деалкоголізацією. Методи, які використовувалися на стадії перед бродінням та під час бродіння, дають ефект лише для зменшення алкоголю, але не для повного видалення вмісту етанолу.

Усі методи для зниження й видалення етанолу зберігають фенольні сполуки, леткий склад, а от сенсорні показники вина залежно від способу деалкоголізації можуть значно погіршитися, включаючи зміну кольору й аромату.

Окрім того, слабоалкогольні та безалкогольні вина можуть бути сприятливі до мікробного забруднення, тому важливо щоб весь процес виробництва відбувався в стерильних умовах.

З огляду на результати аналізу досліджень зарубіжних науковців і незважаючи на проблематику отримання якісного безалкогольного вина, найбільш поширеним є метод вакуумної дистиляції, який є менш вартісним і більш простішим в експлуатації. Але дослідження зменшення та видалення алкоголю продовжується й надалі, тому можливо саме поєднання декількох методів на різних етапах виробництва зможе сприяти збалансуванню економічних витрат і покращенню органолептичних властивостей безалкогольного вина.

Усе це надасть виробникам більш глибокого розуміння методів деалкоголізації для якісного й економічно вигідного виробництва безалкогольного вина задля забезпечення зростаючого попиту серед споживачів на даний вид продукту.

Література

Alston, J. M., Fuller, K. B., Lapsley, J. T., Soleas, G., Tumber, K. P. (2015). Splendide Mendax: False Label Claims About High and Rising Alcohol Content of Wine. *Journal of Wine Economics*, 10. 275—313. <https://doi.org/10.1017/jwe.2015.33>.

Asproudi, A., Ferrandino, A., Bonello, F., Vaudano, E., Pollon, M., Petrozziello, M. (2018). Key Norisoprenoid Compounds in Wines from Early-Harvested Grapes in View of Climate Change. *Food Chemistry*, 268. 143—152. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.06.069>.

Banvolgyi, S., Kiss, I., Bekassy-Molnar, E., Vatai G. (2006). Concentration of Red Wine by Nanofiltration. *Desalination*, 198, 8—15. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.09.003>.

Belisario-Sánchez, Y. Y., Taboada-Rodríguez, A., Marín-Iñiesta, F., Iguaz-Gainza, A., López-Gómez, A. (2012). Aroma Recovery in Wine Dealcoholization by SCC Distillation. *Food Bioprocess Technol*, 5. 2529—2539. <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0574-y>.

Belisario-Sánchez, Y. Y., Taboada-Rodríguez, A., Marín-Iniesta, F., López-Gómez, A. (2009). Dealcoholized Wines by Spinning Cone Column Distillation: Phenolic Compounds and Antioxidant Activity Measured by the 1,1-Diphenyl-2-Picrylhydrazyl Method. *Journal Agricultural. Food Chemistry*, 57. 6770—6778. <https://doi.org/10.1021/jf900387g>.

Benedict, D. J., Parulekar, S. J., Tsai, S. (2006). Pervaporation-Assisted Esterification of Lactic and Succinic Acids with Downstream Ester Recovery. *Journal of Membrane Science*, 281. 435—445. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.04.012>.

Biyela, B. N. E., du Toit, W. J., Divol, B., Malherbe, D. F., van Rensburg, P. (2009). The Production of Reduced-Alcohol Wines Using Gluzyme Mono 10.000 BG-Treated Grape Juice. *South African Journal Enological. Viticulture*, 30. 124—132. <https://doi.org/10.21548/30-2-1432>.

Boban, M., Stockley, C., Teissedre, P.-L., Restani, P., Fradera, U., Stein-Hammer, C., Ruf, J. C. (2016). Drinking Pattern of Wine and Effects on Human Health: Why Should We Drink Moderately and with Meals? *Food & Function*, 7. 2937—2942. <https://doi.org/10.1039/C6FO00218H>.

Böttcher, C., Harvey, K., Forde, C. G., Boss, P. K., Davies, C. (2011). Auxin Treatment of Pre-Veraison Grape (*Vitis Vinifera L.*) Berries Both Delays Ripening and Increases the Synchronicity of Sugar Accumulation. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 17. 1—8. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2010.00110.x>.

Canonico, L., Solomon, M., Comitini, F., Ciani, M., Varela, C. (2019). Volatile Profile of Reduced Alcohol Wines Fermented with Selected Non-*Saccharomyces* Yeasts under Different Aeration Conditions. *Food Microbiology*, 84. 103247. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2019.103247>.

Capece, A., Romano, P. (2019). Yeasts in the Production Wine: Yeasts and Their Metabolic Impact on Wine Flavour. P. 43—80. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-9782-4_2.

Castro-Muñoz, R., Conidi, C., Cassano, A. (2018). Membrane-Based Technologies for Meeting the Recovery of Biologically Active Compounds from Foods and Their by-Products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59. 2927—2948. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1478796>.

Catarino, M., Mendes, A. (2011). Dealcoholizing Wine by Membrane Separation Processes. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 12. 330—337. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2011.03.006>.

Corona, O., Liguori, L., Albanese, D., Di Matteo, M., Cinquanta, L., Russo, P. (2019). Quality and Volatile Compounds in Red Wine at Different Degrees of Dealcoholization by Membrane Process. *European Food Research and Technology*, 245. 2601—2611. <https://doi.org/10.1007/s00217-019-03376-z>.

Del Olmo, Á., Blanco, C. A., Palacio, L., Prádanos, P., Hernández, A. (2014). Pervaporation Methodology for Improving Alcohol-Free Beer Quality through Aroma Recovery. *Journal of Food Engineering*, 133. 1—8. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.02.014>.

Diban, N., Arruti, A., Barceló, A., Puxeu, M., Urtiaga, A., Ortiz, I. (2013). Membrane Dealcoholization of Different Wine Varieties Reducing Aroma Losses. Modeling and Experimental Validation. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 20. 259—268. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.05.011>.

Esteras-Saz, J., de la Iglesia, Ó., Peña, C., Escudero, A., Téllez, C., Coronas, J. (2021). Theoretical and Practical Approach to the Dealcoholization of Water-Ethanol Mixtures and Red Wine by Osmotic Distillation. *Separation and Purification Technology*, 270 (118793). <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118793>.

Fan, G., Shengyun, T., Rong, W., Qingbin, L., Jinsheng, Z., Xiaodong, Y., Yang, L. (2012). Fermentation Process of Low-Alcohol Cider by Biomass Reduction. *China Brewery*, 31. 186—190. <https://doi.org/10.5772/intechopen.105594>.

Fernández, M., Ubeda, J. F., Briones, A. I. (2000). Typing of non-*Saccharomyces* yeasts with enzymatic activities of interest in wine-making. *International Journal Food Microbiology*, 59(1—2). 29—36. [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(00\)00283-X](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(00)00283-X).

Figoli, A., Santoro, S., Galiano, F., Basile, A. (2015). Pervaporation, Vapour Permeation and Membrane Distillation. *Principles and Applications Woodhead Publishing Series in Energy*. P. 19—63. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-246-4.00002-7>.

Frost, R., Quiñones, I., Veldhuizen, M., Alava, J. I., Small, D., Carreiras, M. (2015). What Can the Brain Teach Us about Winemaking? An FMRI Study of Alcohol Level Preferences. *PLoS ONE*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0119220>.

García-Martín, N., Perez-Magariño, S., Ortega-Heras, M., González-Huerta, C., Mihnea, M., González-Sanjosé, M. L., Palacio, L., Prádanos, P., Hernández, A. (2010). Sugar Reduction in Musts with Nanofiltration Membranes to Obtain Low Alcohol-Content Wines. *Separation and Purification Technology*, 76. 158—170. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2010.10.002>.

Harbertson, J. F., Mireles, M. S., Harwood, E. D., Weller, K. M., Ross, C. F. (2009). Chemical and Sensory Effects of Saignée, Water Addition, and Extended Maceration on High Brix Must. *American Journal Enology Viticulture*, 60. 450—460. <https://doi.org/10.5344/ajev.2009.60.4.450>.

Hou, J., Lages, N. F., Oldiges, M., Vemuri, G. N. (2009). Metabolic Impact of Redox Cofactor Perturbations in *Saccharomyces cerevisiae*. *Metabolic Engineering*, 11. 253—261. <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2009.05.001>.

Ivić, I., Kopjar, M., Obhodaš, J., Vinković, A., Pichler, D., Mesić, J., Pichler, A. (2021). Concentration with Nanofiltration of Red Wine Cabernet Sauvignon Produced from Conventionally and Ecologically Grown Grapes: Effect on Volatile Compounds and Chemical Composition. *Membranes*. 11(5), 320. <https://doi.org/10.3390/membranes11050320>.

Jones, G. V., White, M. A., Cooper, O. R., Storchmann, K. (2005). Climate Change and Global Wine Quality. *Climatic Change*, 73. 319—343. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-4704-2>.

Kontoudakis, N., Esteruelas, M., Fort, F., Canals, J.-M., Zamora, F. (2011). Use of Unripe Grapes Harvested during Cluster Thinning as a Method for Reducing Alcohol Content and PH of Wine. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 17, 230—238. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2011.00142.x>.

Kucherenko, V., Uspalenko, O. (2023). Relevance of the production of non-alcoholic wines. *BIO Web of Conferences 44th World Congress of Vine and Wine*, 68. 03017. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20236803017>.

Lemos, W. J. F., Jr., Nadai, C., Tamara, L., Sales, V., Oliveira, D., Dupas, A., Matos, D., Giacomini, A., Corich, V. (2019). Potential Use of *Starmarella bacillaris* as Fermentation Starter for the Production of Low-Alcohol Beverages Obtained from Unripe Grapes. *International Journal Food Microbiology*, 303. 1—8. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2019.05.006>.

Liguori, L., De Francesco, G., Russo, P., Albanese, D., Perretti, G., Di Matteo, M. (2015). Quality Improvement of Low Alcohol Craft Beer Produced by Evaporative Pertraction. *Chemical Engineering Transactions*, 43. 13—18. <https://doi.org/10.3303/CET1543003>.

Liguori, L., De Francesco, G., Russo, P., Perretti, G., Albanese, D., Di Matteo, M. (2015). Production and Characterization of Alcohol-Free Beer by Membrane Process. *Food Bioproducts Processing*, 94. 158—168. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2015.03.003>.

Liguori, L., Russo, P., Albanese, D., Di Matteo, M. (2018). Production of Low-Alcohol Beverages: Current Status and Perspectives. *Handbook of Food Bioengineering*. P. 347—382. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811447-6.00012-6>.

Longo, R., Blackman, J. W., Torley, P. J., Rogiers, S. Y., Schmidtke, L. M. (2017). Changes in Volatile Composition and Sensory Attributes of Wines during Alcohol Content Reduction. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97. 8—16. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7757>.

Makarytchev, S., Langrish, T. A. G., Fletcher, D. F. (2004). Mass Transfer Analysis of Spinning Cone Columns Using Cfd. Chem. *Chemical Engineering Research and Design*, 82. 752—761. <https://doi.org/10.1205/026387604774196037>.

Makarytchev, S. V., Langrish, T. A. G., Fletcher, D. F. (2005). Exploration of Spinning Cone Column Capacity and Mass Transfer Performance Using CFD. *Chemical Engineering Research and Design*, 83. 1372—1380. <https://doi.org/10.1205/cherd.03413>.

Malfeito-Ferreira, M. (2011). Yeasts and Wine Off-Flavours: A Technological Perspective. *Annals Microbiology*, 61. 95—102. <https://doi.org/10.1007/s13213-010-0098-0>.

Margallo, M., Aldaco, R., Barceló, A., Diban, N., Ortiz, I., Irabien, A. (2015). Life Cycle Assessment of Technologies for Partial Dealcoholisation of Wines. *Sustainable Production and Consumption*, 2. 29—39. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2015.07.007>.

- Martínez De Toda, F., Balda, P. (2013). Delaying, Berry Ripening through Manipulating Leaf Area to Fruit Ratio. *Vitis Jurnal Grapevine Research*, 52. 171—176. <https://doi.org/10.5073/vitis.2013.52.171-176>.
- Massot, A., Mietton-peuchot, M., Peuchot, C., Milisic, V. (2008). Nanofiltration and Reverse Osmosis in Winemaking. *Desalination*, 231(1—3). 283—289. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.10.032>.
- Milanovic, V., Ciani, M., Oro, L., Comitini, F. (2020). *Starmerella Bombicola* Influences the Metabolism of *Saccharomyces cerevisiae* at Pyruvate Decarboxylase and Alcohol Dehydrogenase Level during Mixed Wine Fermentation. *Microbial Cell Factories*, 11. 10—13. <https://doi.org/10.1186/1475-2859-11-18>.
- Mira, H., Guiomar, A., Geraldés, V., De Pinho, M. N. (2017). Membrane Processing of Grape Must for Control of the Alcohol Content in Fermented Beverages. *Journal of Membrane Science and Research*, 3. 308—312. <https://doi.org/10.22079/JMSR.2017.60634.1130>.
- Motta, S., Guaita, M., Petrozziello, M., Ciambotti, A., Panero, L., Solomita, M., Bosso, A. (2017). Comparison of the Physicochemical and Volatile Composition of Wine Fractions Obtained by Two Different Dealcoholization Techniques. *Food Chemistry*, 221. 1—10. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.10.046>.
- Non-Alcoholic Wine Market. (2022). *Fact. MR*. Режим доступу: <https://www.factmr.com/report/4532/non-alcoholic-wine-market>.
- Palliotti, A., Cini, R., Leoni, F., Silvestroni, O., Poni, S. (2013). Effects of Late Mechanized Leaf Removal above the Clusters Zone to Delay Grape Ripening in “Sangiovese” Vines. *Acta Horticulturae*, 978. 301—308. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.978.35>.
- Palliotti, A., Poni, S., Berrios, J. G., Bernizzoni, F. (2010). Vine Performance and Grape Composition as Affected by Early-Season Source Limitation Induced with Anti-Transpirants in Two Red Vitis Vinifera L. Cultivars. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 16. 426—433. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2010.00103.x>.
- Piccardo, D., Favre, G., Pascual, O., Canals, J. M., Zamora, F., González-Neves, G. (2019). Influence of the Use of Unripe Grapes to Reduce Ethanol Content and PH on the Color, Polyphenol and Polysaccharide Composition of Conventional and Hot Macerated Pinot Noir and Tannat Wines. *European Food Research and Technology*, 245. 1321—1335. <https://doi.org/10.1007/s00217-019-03258-4>.
- Puškaš, V. S., Miljić, U. D., Djuran, J. J., Vučurović, V. M. (2020). The Aptitude of Commercial Yeast Strains for Lowering the Ethanol Content of Wine. *Food Science & Nutrition*, 8. 1489—1498. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1433>.
- Röcker, J., Schmitt, M., Pasch, L., Ebert, K., Grossmann, M. (2016). The Use of Glucose Oxidase and Catalase for the Enzymatic Reduction of the Potential Ethanol Content in Wine. *Food Chemistry*, 210. 660—670. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.04.093>.
- Russo, P., Liguori, L., Albanese, D., Crescitelli, A., Di Matteo, M. (2013). Investigation of Osmotic Distillation Technique for Beer Dealcoholization. *Chemical Engineering Transactions*, 32. 1735—1740. <https://doi.org/10.3303/CET1332290>.
- Salgado, C. M., Fernández, E., Palacio, L., Hernández, A., Prádanos, P. (2015). Alcohol Reduction in Red and White Wines by Nanofiltration of Musts before Fermentation. *Food Bioproducts Processing*, 96. 285—295. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2015.09.005>.
- Schelezki, O. J., Šuklje, K., Boss, P. K., Jeffery, D. W. (2018). Comparison of Consecutive Harvests versus Blending Treatments to Produce Lower Alcohol Wines from Cabernet Sauvignon Grapes: Impact on Wine Volatile Composition and Sensory Properties. *Food Chemistry*, 259. 196—206. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.03.118>.
- Schmidtke, L. M., Blackman, J. W., Agboola, S. O. (2012). Production Technologies for Reduced Alcoholic Wines. *Journal Food Science*, 77. 25—41. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2011.02448.x>.
- Stockley, C. S. (2012). Is It Merely a Myth That Alcoholic Beverages Such as Red Wine Can Be Cardioprotective? *Science Food Agriculture*, 92. 1815—1821. <https://doi.org/10.1002/jsfa.5696>.

Stoll, M., Bischoff-Schaefer, M., Lafontaine, M., Tittmann, S., Henschke, J. (2013). Impact of Various Leaf Area Modifications on Berry Maturation in *Vitis Vinifera* L. “Riesling.” *Acta Horticulture*, 978. 293—300. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.978.34>.

Sun, Q., Sacks, G. L., Lerch, S. D., Heuvel, J. E. (2012). Impact of Shoot and Cluster Thinning on Yield, Fruit Composition, and Wine Quality of Corot Noir. *American Journal Viticulture*, 63. 49—56. <https://doi.org/10.5344/ajev.2011.11029>.

Sun, X., Dang, G., Ding, X., Shen, C., Liu, G., Zuo, C., Chen, X., Xing, W., Jin, W. (2020). Production of Alcohol-Free Wine and Grape Spirit by Pervaporation Membrane Technology. *Food Bio-products Processing*, 123. 262—273. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.07.006>.

Takács, L., Vatai, G., Korány, K. (2007). Production of Alcohol Free Wine by Pervaporation. *Journal Food Engineering*, 78. 118—125. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.09.005>.

Taran, N., Stoleicova, S., Soldatenko, O., Morari, B. (2014). The Influence of Pressure on Chemical and Physical Parametres of White and Red Wines Obtained by Dealcoholization Method. *Journal of Agroalimentary Processes & Technologies*, 20. 215—219. Режим доступу: <https://ifiscollections.org/ifiscollections/article-abstract/106188/The-influence-of-pressure-on-chemical-and-physical?redirectedFrom=fulltext>.

Tilloy, V., Ortiz-Julien, A., Dequin, S. (2014). Reduction of Ethanol Yield and Improvement of Glycerol Formation by Adaptive Evolution of the Wine Yeast *Saccharomyces cerevisiae* under Hyperosmotic Conditions. *Applied & Environmental Microbiology*, 80. 2623—2632. <https://doi.org/10.1128/AEM.03710-13>.

Varavuth, S., Jiratananon, R., Atchariyawut, S. (2009). Experimental Study on Dealcoholization of Wine by Osmotic Distillation Process. *Separation and Purification Technology*, 66. 313—321. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2008.12.011>.

Wenten, I. G., Dharmawijaya, P. T. (2017). RSC Advances LTA Zeolite Membranes: Current Progress and Challenges in Pervaporation. *RSC Advances*, 7. 29520—29539. <https://doi.org/10.1039/C7RA03341A>.

Yang, J., Yoshioka, T., Tsuru, T., Asaeda, M. (2006). Pervaporation Characteristics of Aqueous-Organic Solutions with Microporous SiO₂-ZrO₂ Membranes: Experimental Study on Separation Mechanism. *Journal of Membrane Science*, 284. 205—213. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.07.041>.

Zhang, P., Wu, X., Needs, S., Liu, D., Fuentes, S., Howell, K. (2017). The Influence of Apical and Basal Defoliation on the Canopy Structure and Biochemical Composition of *Vitis Vinifera* Cv. Shiraz Grapes and Wine. *Frontiers in Chemisrty*, 5. 1—9. <https://doi.org/10.3389/fchem.2017.00048>.

THE SCIENTIFIC APPROACHES TO SELECT A METHOD FOR BERRIES PRESERVATION WITH THE MINIMAL LOSSES OF VITAMIN COMPLEX

G. Simakhina

National University of Food Technologies

Key words:

Antioxidant vitamins
Berry raw materials
Freezing
Cryoprotection
Biological value

Article history:

Received 12.07.2024
Received in revised form
29.07.2024
Accepted 19.08.2024

Corresponding author:

G. Simakhina
E-mail:
npnuht@ukr.net

Citation: Сімахіна Г. О. (2024). Наукові підходи до вибору способу консервування ягід з мінімальними втратами вітамінного комплексу. *Наукові праці НУХТ*, 30(4), 176—188. DOI: 10.24263/2225-2924-2024-30-4-15

ABSTRACT

Vitamins are the natural components of foods, which do not belong to pharmaceutical remedies. They can be used by human organism only in the composition of foodstuffs, as the specific compounds to prevent and treat the hypo and avitaminoses caused by the deficit of these micronutrients in diets. The norms of consumption of the certain vitamins are stated on the basis of scientific data inferred from studying this problem.

To overcome the vitamin deficit in diets for population, the great attention is now paid to berry raw materials that, during its growth and ripening, would accumulate the significant concentrations of valuable biologically active substances, primarily antioxidant vitamins. Therefore, the author of this article has researched the chokeberries, blackberries, raspberries, blueberries and viburnum in fresh, frozen and defrosted states. The berries were frozen under the cryoprotectant (10% water solution of sucrose with 1% lemon acid solution). After the 9-month storage period, the berries were defrosted by four different methods in order to define the most effective one. The changes of vitamin content and sensory characteristics were estimated in comparison with the respective indices of fresh raw materials.

There was confirmed that the defrostation methods can affect the sensory indices of the berries and the amount of cellular juice loss in the products. The most effective methods is to defrost the berries in the cooling chamber with the temperature of 0 °C and the duration of 30—33 minutes: the sturdiness of berry surface tissues was fully retained, due to which fact the cellular juice losses are absent. The frozen berries appeared to be the most reliable source of vitamins for a diet, — in particular, 50 g of berries can supply the human body with 24.85...65.7% of recommended daily intake of ascorbic acid, with 19...36.6% of β -carotene, and 156.4 to 332.2% of bioflavonoids (blueberries in priority).

НАУКОВІ ПІДХОДИ ДО ВИБОРУ СПОСОБУ КОНСЕРВУВАННЯ ЯГІД З МІНІМАЛЬНИМИ ВТРАТАМИ ВІТАМІННОГО КОМПЛЕКСУ

Г. О. Сімахіна

Національний університет харчових технологій

Вітаміни — це природні компоненти їжі, які не належать до лікарських засобів. І саме в складі харчових продуктів і дієтичних добавок вітаміни використовуються організмом як специфічні сполуки для запобігання та лікування гіпо- та авітамінозів, викликаних дефіцитом цих мікронутрієнтів у харчових раціонах. На основі наукових даних з вивчення фізіологічної потреби встановлюються норми споживання того чи іншого вітаміну.

Для подолання вітамінного дефіциту в раціонах харчування населення найбільшого значення надається ягідній сировині, яка в процесі свого росту накопичує значні концентрації цінних біологічно активних речовин, передусім вітамінів-антиоксидантів. У статті досліджено ягоди аронії, ожини, малини, чорниці, калини у свіжому, замороженому та дефростованому стані. Ягоди заморожували під прикриттям кріопротектора (водний 10-відсотковий розчин сахарози разом з одновідсотковим розчином лимонної кислоти). Дефростацію заморожених ягід після 9-місячного зберігання проводили чотирма різними способами для визначення найбільш ефективного. Оцінювали зміни вітамінного складу та органолептичних характеристик заморожених ягід порівняно з відповідними показниками свіжої сировини.

Установлено, що способи дефростації заморожених ягід впливають на сенсорні показники та показник утрат клітинного соку отриманої продукції. Найбільш ефективним виявився спосіб дефростації ягід у холодильній камері при температурі 0 °C та тривалості 30—33 хв, повністю збережено міцність тканин поверхні ягід, унаслідок чого відсутні втрати клітинного соку. Заморожені ягоди виявилися надійним джерелом вітамінів для раціонів харчування — 50 г ягід забезпечують організм людини на 24,85...65,7% добової потреби в аскорбіновій кислоті, на 19...36,6% — у β-каротині, від 156,4 до 332,2% — у біофлавоноїдах (пріоритет за чорницями).

Ключові слова: *вітаміни-антиоксиданти, ягідна сировина, заморожування, кріопротекція, біологічна цінність.*

Постановка проблеми. Для подолання вітамінного дефіциту в раціонах харчування населення найбільшого значення надається ягідній сировині, яка у процесі свого росту накопичує значні концентрації цінних біологічно активних речовин, передусім вітамінів-антиоксидантів (Becker et al., 2004). З огляду на біологічні та фізіологічні особливості ягоди неспроможні зберігати свою якість протягом тривалого часу, що потребує розроблення спеціальних технологій зберігання (Postharvest, 2023), за яких оптимальні терміни зберігання при відносній вологості повітря 90—95% для полуниць становлять 7—10 днів, для чорниць — 2—4 тижні, малини та ожини — 2—5 днів при 0 °C.

Ягоди — це продукція сезонного характеру, і для ефективного використання упродовж року їх консервують. Найбільш досконалим є спосіб заморожування (Черевко, & Людвік, 2018), тому попит на заморожені напівфабрикати у світі постійно зростає (Галат, 2021), їхній товарообіг щорічно збільшується на 4—6% (Frozen fruit, 2018; Світовий попит, 2019), приваблюючи споживачів високою біологічною цінністю, належними органолептичними показниками (Goyal et al., 2000), які практично не відрізняються від свіжої сировини (Rickman et al., 2007) навіть при тривалому зберіганні (Poiana et al., 2010).

Зважаючи на важливість ягідної сировини як вітамінного компонента харчових раціонів, зрозумілою є зацікавленість науковців у подальших дослідженнях біологічної цінності ягід, ефективних способів їх зберігання, консервування із застосуванням таких методів, які забезпечують мінімальні втрати вітамінів у процесах технологічного перероблення й зберігання. Тому напрям, обраний у пропонованій статті, є актуальним, багатоплановим, а отримані результати додають нову інформацію про вітамінні комплекси ягідної сировини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Особливе місце серед рослинної сировини посідають культивовані і дикорослі ягоди, які набувають дедалі більшого значення в оздоровчому, профілактичному, дієтичному харчуванні (Козярін, 2009), передусім в екстремальних умовах життєдіяльності (Сімахіна та ін., 2021). Ягоди є постачальниками речовин вторинного синтезу — поліфенолів, ароматичних сполук, летких кислот, які формують їхній аромат, запах і смак (Sandell et al., 2012). Вважається, що антиоксидантні речовини різної хімічної природи (біофлавоноїди, каротиноїди тощо), які містяться у продуктах у різних концентраціях (Togor et al., 2006; Ishiguro et al., 2007) здатні протистояти експансії вільнорадикальних процесів. Під час уживання таких продуктів вищезгадані речовини допомагають уникати накопичення вільних радикалів у клітинах (Backer et al., 2004). На відміну від синтетичних фармацевтичних засобів, антиоксиданти біологічного походження легко та органічно залучаються до обмінних процесів в організмі, що, своєю чергою, не викликає небажаних побічних ефектів (Gundesli et al., 2019).

Водночас ягоди є найбільш складним об'єктом для заморожування, зважаючи на високий вміст у їхньому складі води (до 90%), надзвичайно нізку покривну тканину, низьку стійкість при зберіганні. Це вимагає пошуку інноваційних рішень при розробленні технологій заморожування ягідних культур (Павлюк та ін., 2013). Однією з найбільш перспективних інновацій є поєднання штучного холоду з використанням сполук-кріопротекторів (Neri et al., 2020). Лише останнім часом цей напрям став предметом досліджень у галузях харчових технологій. Наукові розробки з кріобіології можна адаптувати до процесів заморожування ягідної сировини (Сімахіна та ін., 2019) і мінімізувати втрати найбільш лабільного компонента (аскорбінової кислоти) до 5—7%. Це відбувається за рахунок того, що в оброблених водними розчинами кріопротекторів ягодах істотно гальмується розвиток поза- та внутрішньоклітинного кристалоутворення, яке є основним руйнівним чинником клітин і тканин заморожуваних об'єктів (Neri et al., 2020).

Предметом досліджень більшості авторів є заморожування культивованих ягід: вишень (Осокіна, & Василюшина, 2015), полуниць (Одарченко та ін., 2020), суниць (Заморська, 2017). Тому актуальним залишається напрям вивчення біологічної цінності дикорослих ягід, зважаючи на їхню здатність ефективніше продукувати

в процесі вегетації вітаміни, а також на той факт, що такого збалансованого кількісного вмісту есенціальних нутрієнтів не мають жодні інші рослинні джерела. Способи заморожування дикорослих ягід і умови їх зберігання необхідно орієнтувати на те, щоб отримана продукція після тривалого зберігання практично не відрізнялася за якісними і сенсорними показниками від свіжої сировини та виконувала свою роль багатого джерела вітамінів у харчуванні населення в міжсезонний для збору ягід період. Одним із реальних шляхів позитивного вирішення таких завдань є попереднє оброблення ягід перед заморожуванням водними розчинами кріопротекторів. За цим напрямом у літературі поки що є лише поодинокі статті (Neri et al., 2020), тому актуальними є дослідження впливу кріопротекції на ступінь збереження вітамінів, сенсорних характеристик ягід на етапах заморожування, зберігання та дефростації.

Мета статті: дослідити динаміку вмісту вітамінів-антиоксидантів при заморожуванні, зберіганні та дефростації ягід з використанням науково обґрунтованих способів і дати характеристику їхньої вітамінної цінності та сенсорних показників порівняно зі свіжою сировиною, оскільки саме цей показник є одним із найважливіших із точки зору споживачів.

Матеріали і методи. Для дослідження вітамінної цінності та сенсорних характеристик свіжих і заморожених дикорослих ягід використали доступну та дешеву сировину: калину (*Viburnum opulus L.*), ожину (*Rubus caesius L.*), малину (*Rubus idaeus L.*), чорницю (*Vaccinium myrtillus L.*), аронію чорноплідну (*Aronia melanocarpa L.*) (рис. 1). Калина поширена у Європі, Північній і Центральній Азії (Ersoy et al., 2019). Використовується у традиційній кухні різних народів (Polka et al., 2019) як джерело аскорбінової кислоти і фенольних сполук (Saltan et al., 2016). Малина визнана споживачами як смачна й корисна ягода, багата на біофлавоноїди та каротиноїди (Ponder et al., 2019), що виконують роль антиоксидантів у складі харчових продуктів. Використовується у консервній промисловості для виробництва джемів, варення, желе тощо. Ягоди ожини містять вітаміни-антиоксиданти, пектинові речовини, мінеральні елементи, є природним протизапальним засобом, використовується у дієтичному харчуванні, в тому числі для профілактики діабету (Krzeptilko et al., 2021). Ягоди чорниці входять до сфери функціонального харчування, відомі сьогодні як суперфуди завдяки високому вмістові біофлавоноїдів, зокрема антоціанів (Neamtu et al., 2020). Важливим джерелом біологічно активних сполук є аронія чорноплідна (Borowska et al., 2016), завдяки чому вона широко застосовується у харчовій та фармацевтичній промисловості (Любич та ін., 2022). Ягоди зібрано у 2023 році.

Критерії вибору ягід для досліджень ґрунтуються на показниках їхньої вітамінної цінності (вміст аскорбінової кислоти, біофлавоноїдів, β -каротину), кореляції між вмістом аскорбінової кислоти та біофлавоноїдів, наявності природних кріопротекторів (моно- та дицукрів), які посилюють стабілізацію внутрішньоклітинних структур ягід при заморожуванні, здатності біокомпонентів ягід до холодової адаптації, структурній міцності покривних тканин ягід, мінімальної розбіжності сенсорних показників свіжих і заморожених ягід.

Для попереднього оброблення ягід (перед заморожуванням) застосували водний розчин суміші сахарози і лимонної кислоти, який, за даними (Сімахіна та ін., 2019), виявив найбільшу ефективність.

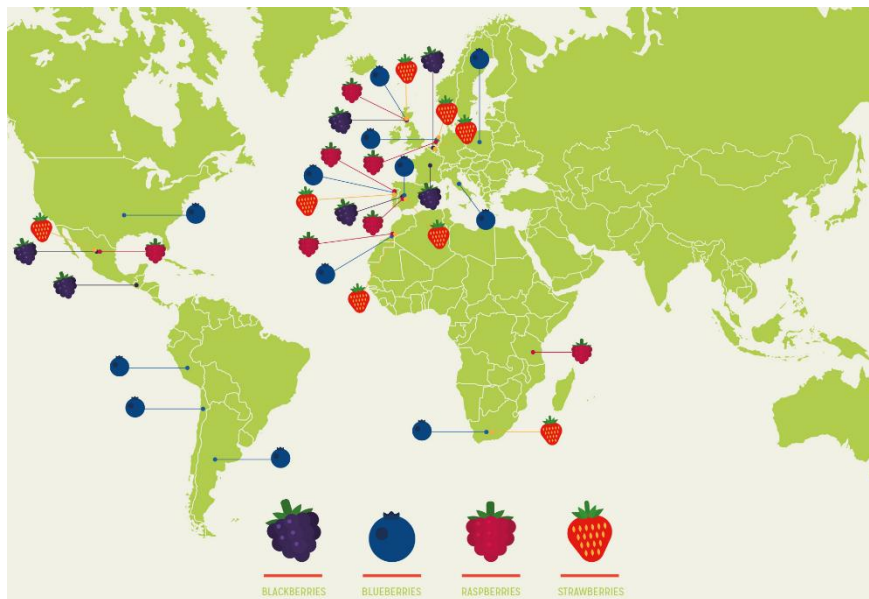


Рис. 1. Країни походження ягід досліджуваних зразків
(<https://www.angussoftfruits.co.uk/what-we-do/growing/>)

Для приготування 1 л водного розчину кріопротектора з масовою часткою сахарози 10% та масовою часткою лимонної кислоти 1% додаємо до суміші із 100 г кристалічної сахарози і 10 г кристалічної лимонної кислоти при температурі 18—22 °С 890 мл дистильованої води (густина води 1 г/мл), ретельно перемішуємо до повного розчинення компонентів.

У широкодонну ємність насилаємо одним шаром зразки досліджуваних ягід і заливаємо їх отриманим розчином кріопротектора, щоб повністю покрити ягоди. Ягоди, які настоюються в розчині кріопротектора протягом 60 хв при температурі 18—22 °С, періодично перемішуємо для рівномірного оброблення їхньої поверхні. Кожен наступний зразок ягід обробляємо свіжою порцією кріопротектора.

Після оброблення кріопротекторами ягоди осушували від зайвої вологості і заморожували у швидкоморозильній камері розсіпом при температурі $-34\text{ }^{\circ}\text{C}$ протягом 25 хв, що відповідає параметрам швидкого заморожування (Zlabur et al., 2021). Процес триває до досягнення в центрі ягід температури $-18\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Заморожені ягоди фасували у 500-грамові пакети з термопластичних полімерних матеріалів, придатних для низькотемпературного зберігання продукції ($-18\text{ }^{\circ}\text{C}$), дотримуючись вимог цілісності і герметичності упаковки. Тару із замороженими ягодами упаковували в коробки з тришарового гофрованого картону масою 6 кг і зберігали у холодильній камері протягом 12 місяців (максимальний термін) за температури $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ і відносної вологості не більше ніж 95%. При підготовці ягід до дослідження проводили дефростацію.

Дефростацію проводили кількома способами: повітряним способом за темпе-

ратури 18—22 °С і 37—42 °С, об'ємним способом у мікрохвильовій печі та в холодильній камері при 0 °С.



Рис. 2. Пакетована суміш заморожених ягід (малина, чорниці, ожина), 500 г

Розморожування тривало до досягнення рекомендованої температури споживання дефростованих ягід — 5 °С. Тривалість розморожування залежить від величини ягід, структури їхніх тканин, щільності м'якоті тощо. У середньому витрати часу становили при дефростації ягід повітряним способом за температури 18—20 °С — 130—135 хв, за температури 37—42 °С — 45—50 хв; при дефростації у мікрохвильовій печі — 3—5 хв, у холодильній камері — 30—33 хв.

Втрати клітинного соку при дефростації визначали в процентах за відносною зміною маси зразка заморожених ягід до і після дефростації.

Аскорбінову кислоту визначали титриметричним методом, заснованим на екстрагуванні аскорбінової кислоти з дослідного зразка за допомогою розчину кислоти (хлороводневої, метафосфорної або суміші оцтової та метафосфорної кислот) із подальшим візуальним або потенціометричним титруванням із розчином 2,6-дихлорфенолфеноляту натрію (Majidi et al., 2016).

Вміст біофлавоноїдів визначали за загальновідомою методикою з використанням реактиву Folin-Ciocalteu (Viña et al., 2006) спектрофотометричним методом. Вміст бета-каротину визначали загальновідомим методом, який базується на екстрагуванні каротину за допомогою органічних розчинників (гексан), та вимірювали оптичну густина розчину на спектрофотометрі при довжині хвилі 450 нм (Juntachote et al., 2005).

За органолептичними показниками та якісним складом заморожена продукція повинна найменшою мірою відрізнятися від свіжих ягід (власне, це і є основним критерієм досконалості технології заморожування).

Статистичний аналіз було проведено шляхом послідовного регресивного аналізу із застосуванням програм Microsoft Excel XP і Origin Pro8 для обчислення кореляційних коефіцієнтів (Hinkle, Wiersma, & Jurs, 2003).

Викладення основних результатів дослідження. Дослідження розпочали з визначення кількісного вмісту аскорбінової кислоти, біофлавоноїдів, β -каротину у свіжих (мг/100 г свіжих ягід) і заморожених (мг/100 г заморожених) ягодах після їх зберігання протягом 3 і 9 місяців. Результати представлено в таблицях 1—4.

Отже, досліджені ягоди є природними багатими джерелами аскорбінової кислоти та біофлавоноїдів (Nagendran et al., 2006; Yang et al., 2009). Це свідчить про

ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

необхідність їх широкого використання у виробництві оздоровчих продуктів і напівфабрикатів.

Таблиця 1. Вміст β-каротину у свіжих і заморожених ягодах після тривалого зберігання, мг/100 г

Вид ягід	Свіжі ягоди	Після заморожування	Після зберігання, місяці	
			3	9
Аронія	3,76	3,76	3,70	3,66
Калина	2,05	2,05	1,99	1,97
Ожина	3,27	3,22	3,18	3,10
Малина	2,18	2,16	2,12	2,04
Чорниця	1,94	1,91	1,84	1,80
Чорниця (контроль без кріопротекторів)	1,94	1,69	1,27	1,06

Таблиця 2. Вміст аскорбінової кислоти у свіжих і заморожених ягодах після тривалого зберігання, мг/100 г

Вид ягід	Свіжі ягоди	Після заморожування	Після зберігання, місяці	
			3	9
Аронія	139,5	138,0	136,4	131,4
Калина	59,7	58,2	57,8	55,76
Ожина	75,9	75,8	74,6	71,2
Малина	55,4	54,6	54,0	49,3
Чорниця	57,3	56,2	55,8	51,15
Чорниця (контроль без кріопротекторів)	57,3	55,0	41,6	16,4

Таблиця 3. Вміст біофлавоноїдів у свіжих і заморожених ягодах після тривалого зберігання, мг/100 г

Вид ягід	Свіжі ягоди	Після заморожування	Після зберігання, місяці	
			3	9
Аронія	990,0	990,0	990,0	990,0
Калина	785,0	785,0	784,3	782,9
Ожина	898,0	896,0	896,0	894,0
Малина	846,0	844,0	842,0	840,7
Чорниця	1654,0	1652,0	1648,2	1644,4
Чорниця (контроль без кріопротекторів)	1654,0	1638,8	1622,4	1601,7

Таблиця 4. Втрати вітамінів у заморожених ягодах після 9 місяців зберігання, % до вмісту у свіжих ягодах

Вид ягід	Втрати вітамінів, %		
	β-каротин	аскорбінова кислота	біофлавоноїди
Аронія	2,7	5,8	0
Калина	3,8	6,6	2,6
Ожина	5,2	6,2	4,4
Малина	6,4	11,0	6,3
Чорниця	7,2	11,6	5,8
Чорниця (контроль без кріопротекторів)	45,4	71,0	31,6

Аналіз даних, представлених у таблицях, показав, що щойно заморожені ягоди, попередньо оброблені кріопротекторами, майже не втратили вітамінів, або ці втрати незначні (1—2%). Навіть через 9 місяців зберігання ягід при $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ максимальні втрати β -каротину щодо свіжих ягід склали 7,2% у чорниці, максимальні втрати біофлавоноїдів — 6,3% у чорниці. Ягоди чорниці і малини мають дещо більші втрати аскорбінової кислоти (11,6% і 11%), якщо порівняти з іншими ягодами. Це підтверджує статус аскорбінової кислоти як найбільш лабільної сполуки до будь-яких зовнішніх впливів, а заодно пояснюється тим, що чорниця і малина мають нижню покривну тканину, ніж інші ягоди, яка менш стійка до впливу низьких температур. Зокрема, частина клітин утрачає свою цілісність, цитоплазматична оболонка розривається, призводячи до безпосереднього контакту вітамінів, які містяться усередині клітини, з оксидоредуктазами, передусім з аскорбатоксидазою, яка й спричинює руйнування певної кількості молекул аскорбінової кислоти.

Результати можна оцінити належним чином, зіставивши їх з даними, отриманими при заморожуванні ягід традиційним способом — без кріопротекторів. Ці дані представлено в табл. 4 у порівняльному дослідженні втрат вітамінів ягодами чорниці, замороженими із застосуванням кріопротекторів і за традиційною технологією. Зіставлення отриманих даних є досить переконливим доказом ефективності технологій заморожування із застосуванням кріопротекторів: утрати β -каротину за цією технологією склали 7,2% до його вмісту у свіжих ягодах чорниці, а за традиційною — 45,4%; відповідно, втрати аскорбінової кислоти склали 11,6% заморожених за традиційною технологією, пояснюються тим, що при повільному заморожуванні формуються великі кристали льоду у клітинах і міжклітинному просторі, які руйнують мембрани клітин і субклітинні структури. Внаслідок цього оксидоредуктази отримують доступ до біологічно активних речовин, зосереджених у клітинах, та ініціюють біохімічні процеси окислення вітамінів, призводячи до їх втрат.

Для отримання порівняльної характеристики свіжих ягід і ягід, заморожених під прикриттям кріопротекторів, провели бальне оцінювання їх органолептичних показників на прикладі ягід ожини. Результати наведено в табл. 5.

Таблиця 5. Бальна оцінка органолептичних показників свіжих і заморожених ягід ожини після 9 місяців зберігання

Показники	Коефіцієнт вагомості	Бали	Характеристика	
			свіжі ягоди	заморожені ягоди
Зовнішній вигляд	0,35	5	Чисті, свіжі, без дефектів та мікробіологічних ушкоджень, однорідні, тургор пружний	Ягоди однорідні, рівномірно заморожені, з сизуватим нальотом, тургор пружний, не ушкоджений, зі збереженою формою
Смак	0,2	5	Властивий певному виду, відсутній сторонній присмак; солодкий	Властивий певному виду, без стороннього смаку, ідентичний натуральним свіжим ягодам, солодкий

Колір	0,1	5	Характерний для даного виду зрілого матеріалу, інтенсивний, насичений	Відповідає знімній зрілості свіжих ягід, відсутні відхилення від природного кольору; інтенсивність кольору дещо вища за рахунок синтезу антоціанів як реакції ягід на холодний стрес
Стан поверхні	0,2	5	Чиста, без дефектів та ушкоджень шкідниками, без тріщин і плям, глянцева або матова	Чиста, дещо зволожена, з природним тургором, неущо-дженою покривною тканиною, без втрат клітинного соку
Аромат	0,15	5	Відсутність стороннього запаху, аромат тонкий, властивий ягодам ожини, насичений, яскраво виражений	Властивий свіжим ягодам; інтенсивніший щодо природного запаху за рахунок синтезу ароматоутворюючих сполук при холодному стресі, що надає ягодам додаткових позитивних якостей
Висновок			Вищий гатунок	Вищий гатунок, придатні до тривалого зберігання

Оскільки зовнішній вигляд вважається комплексним показником, який включає форму, величину, ступінь зрілості, свіжість, колір тощо (Poiana et al., 2010), то ми надали йому максимальної величини коефіцієнта вагомості — 0,35. Варто зауважити, що в разі невідповідності ягід за зовнішнім виглядом установленим вимогам застосування інших критеріїв оцінки вважається недоцільним.

Результати показали, що ягоди ожини, обрані для досліджень за науково обґрунтованими критеріями, заморожені з використанням кріопротекторів, за всіма показниками органолептики отримали максимальні 5 балів, підтвердили свій статус надійного джерела вітамінів у міжсезонний період до нового врожаю і практично не відрізняються від показників свіжої ожини.

Перед використанням заморожених ягід необхідно провести їх дефростацію. Заморожені ягоди, які зберігали протягом 9 місяців за температури $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ і відносна вологості не більш ніж 95%, дефростували різними способами. Досконалість процесу дефростації оцінюємо за ступенем збереженні структурної міцності поверхні ягід (сенсорна характеристика) і, як результат, утратами клітинного соку та біокомпонентів ягід, розчинених у ньому. Порівняльну характеристику різних способів дефростації наведено у табл. 6.

Таблиця 6. Оцінка способів дефростації заморожених ягід

Спосіб дефростації	Температура дефростації, $^{\circ}\text{C}$	Тривалість дефростації, хв	Втрати клітинного соку, %	Сенсорні показники за 5-бальною шкалою	
				Стан поверхні	Колір
Повітряний	18—22	130—135	19,8	4,1	3,7
Повітряний	37—42	45—55	11,2	4,5	4,2

Продовження таблиці 6

Мікрохвильова піч (потужність 400 Вт)	50—55	3—5	2,6	5	4,8
Холодильна камера	0	30—33	0	5	5

За отриманими даними, найбільш результативними є способи дефростації заморожених ягід у холодильній камері (температура 0 °С, тривалість 30—33 хв) та у мікрохвильовій печі (температура 50—55 °С, тривалість 3—5 хв, потужність 400 Вт). За таких параметрів повністю збережено структурну міцність тканин ягід (стан поверхні оцінено у 5 балів, а колір — у 4,8—5 балів), що запобігає втратам клітинного соку і розчиненням у ньому біокомпонентам (втрати клітинного соку — 0 та 2,6%, відповідно). Найгірші показники отримано при дефростації ягід на повітрі (температура 18—22 °С, тривалість 130—135 хв), при цьому втрати клітинного соку досягли 19,8%, частина ягід деформована, і на їхній поверхні з'явилися тріщини — бальна оцінка 4,1, а колір ягід оцінено у 3,7 бала.

Ягоди посідають важливе місце серед рослинної сировини, зважаючи на їхній статус натуральних вітаміноносіїв, для яких характерні різноманітні оздоровчі, профілактичні, лікувальні властивості. Збалансованість і кількісний вміст основних вітамінів такий, якого немає в інших видах рослинної сировини. Тому на даному етапі досліджень розрахунковим методом з'ясували здатність заморожених ягід забезпечити певну частину добової потреби організму людини в аскорбіновій кислоті, біофлавоноїдах, β-каротині. Відповідно до Норм фізіологічних потреб населення України в основних харчових речовинах і енергії (2017), добова потреба в аскорбіновій кислоті становить 100 мг, у біофлавоноїдах — 250 мг, у β-каротині — 5 мг.

Згідно з розрахунками, 50 г заморожених ягід забезпечують достатньо високий рівень добової потреби людини у вітамінах. Для досліджених ягід ця частка із забезпечення аскорбіновою кислотою перебуває в діапазоні від 24,7% (малина) до 65,7% (аронія), біофлавоноїдами — від 156,4% (калина) до 332,8% (чорниця), β-каротином — від 18% (чорниця) до 36,6% (аронія). Для всіх ягід частка забезпечення добової потреби організму в біофлавоноїдах переважає 100%, однак це не становить небезпеки і не призводить до передозування, оскільки біофлавоноїди належать до водорозчинних сполук і досить швидко виводяться з організму, тобто не мають кумулятивної здатності.

У європейських країнах перелік вітамінів і добова потреба в них дещо інша (The Nutrition Source, 2023), наприклад, аскорбінової кислоти жінкам необхідно 70 мг, чоловікам — 80 мг; β-каротин у переліку не зазначено, а лише вітамін А. Також не регламентується вміст біофлавоноїдів, хоча на сьогодні їх визнано досить потужними біоантиоксидантами.

Висновки

Дикорослі ягоди є цінним джерелом вітамінів-антиоксидантів завдяки наявності в них значних концентрацій аскорбінової кислоти, біофлавоноїдів, β-каротину.

Термін зберігання свіжих ягід не перевищує 15 діб, тому їх заморожують і зберігають за температури $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Удосконалена технологія заморожування передбачає поєднання штучного холоду з використанням кріопротекторів, які захищають поверхню ягід і їхню клітинну структуру від ушкоджуючого впливу кристалами льоду, запобігаючи втратам клітинного соку при дефростації і вітамінів, що входять до його складу.

Досліджені зразки ягід, заморожені під прикриттям кріопротектора, навіть через 9 місяців зберігання за оптимальних умов майже не відрізняються за якісними показниками від свіжої сировини: за вмістом β -каротину (втрати для різних видів ягід склали від 2,7 до 7,2%), аскорбінової кислоти (втрати від 5,8 до 11,6%), біофлавоноїдів (втрати від 0 до 6,3%), а за сенсорними показниками оцінені в 5 балів за 5-бальною шкалою. Втрати вітамінів у ягодах, заморожених традиційним способом без застосування кріопротекторів, склали 45,4% за вмістом β -каротину, 71% за вмістом аскорбінової кислоти, 31,6% за вмістом біофлавоноїдів, відповідно до цих показників у свіжій сировині.

Найефективнішим способом дефростації є розморожування ягід у холодильній камері при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ і тривалості 30—33 хв 50 г заморожених ягід, залежно від їх виду, забезпечують добові потреби організму людини у β -каротині на 19—36,6%, в аскорбінової кислоті — на 24,7—65,7%, у біофлавоноїдах — на 156,4—332,8%.

Пошук нових сировинних джерел високої біологічної цінності, вдосконалення способів їх заморожування та зберігання є актуальним перспективним напрямом становлення індустрії оздоровчих продуктів, що повністю відповідає харчовим потребам людини і тенденціям розвитку світового ринку.

Література

Галат, Г. М. (2021). Світовий ринок ягід: сучасні тенденції та перспективи для України. *Ефективна економіка*, 2. <https://doi.org/10.32702/2307-2105-2021>.

Заморська, І. Л. (2017). Якість і кріорезистентність заморожених ягід суниці за попередньої обробки в розчинах зі структуроутримуючими властивостями. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*, 2(26), 129—136. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1108557>.

Козярін, І. П. (2009). Дієтопрофілактика в умовах радіоактивного забруднення довкілля. *Фітотерапія в Україні*, 314, 49152.

Любич, В. В., Чернега, А. О., Євчук, Я. В. (2022). Формування якості ягід і варення різних сортів аронії чорноплідної. *Агробіологія*, 1, 122—128. <https://doi.org/10.33245/2310-9270-2022-171-1-122-128>.

Одарченко, Д. М., Соколова, Є. Б., Ковалевська, Н. С. (2020). Дослідження хімічного складу різних сортів полуниці до та після заморожування. *Науково-виробничий журнал «Вісник Уманського національного університету садівництва»*, 1, 98—103. <https://doi.org/10.36477/2522-1221-2021-27-02>.

Осокіна, Н. М., Василюшина, О. В. (2015). Якість плодів вишні за різних способів заморожування. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*, 21(3), 203—208.

Павлюк, Р. Ю., Погарська, В. В., Соколова, Л. М. (2012). Інновації в технології зберігання та переробки плодовоовочевої сировини. *Інноваційні технології в харчовій промисловості та ресторанному господарстві: тези доп. Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф.* 14—16 листопада 2012 р. Харків: ХДУХТ. 107—110.

Світовий попит на заморожені продукти продовжує зростати. URL: <http://www.lol.org.ua/rus/showart.php?id=114914> (дата звернення 12.07.2024).

Сімахіна, Г. О., Камінська, С. В., Науменко, Р. Ю. (2019). Нові підходи до характеристики та оцінки органолептичних показників свіжих і заморожених плодів та ягід. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського*, 30(1), 72—78.

Сімахіна, Г. О., Науменко, Н. В., Камінська, С. В. (2021). Особливості харчування в екстремальних умовах життєдіяльності. *Grail of Science. International Scientific Journal*, 11, 141—146. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.24.12.2021.026>.

Черевко, Л., Людвік, Ю. (2018). Ефективність вирощування ягідних культур і переробки продукції шляхом заморожування. *Аграрна економіка*, 11(3—4), 82—86. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2022.11.1>.

Becker, E. M., Nissen, L. R., Skibsted, L. H. (2004). Antioxidant evaluation protocols: food quality or health effects. *Eur. Food Res. and Technol.*, 219(6), 561—571. <https://doi.org/10.1007/s00217-004-1012-4>.

Borowska, S., Brzóska, M. M. (2016). Chokeberries (*Aronia melanocarpa*) and their products as a possible means for the prevention and treatment of noncommunicable diseases and unfavorable health effects due to exposure to xenobiotics. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(6), 12221, 10.1111/1541-4337.12221.

Carlsen, M. H., Halvorsen, B. L., Holte, K., Bohn, S. K., Dragland, S., Sampson, L., Blomhoff, R. (2010). The total antioxidant content of more than 3100 foods, beverages, spices, herbs and supplements used worldwide. *Nutrition Journal*, 9(1), 10.1186/1475-2891-9-3.

Ersoy, N., Ercisli, S., Gundogdu, M. (2017). Evaluation of European cranberry bush (*Viburnum opulus L.*) genotypes for agro-morphological, biochemical and bioactive characteristics in Turkey, *Folia Hort.*, 29, 181—188. <https://doi.org/10.1515/fhort-2017-0017>.

Frozen fruit (2018). Frozen fruit market in the EU: Germany remains the largest importer. URL: <https://www.freshplaza.com/article/9020192/frozen-fruit-market-in-the-eu-germany-remains-the-largest-importer> (access date 05.01.2024).

Goyal, R. K., Verma, L. R., Joshi, V. K. (2000). *Nutritive value of fruits, vegetables, and their products in postharvest technology of fruits and vegetables*. Indus Publishing, New Delhi.

Gundesli, M. A., Korkmaz, N., Okatan, V. (2019). Polyphenol content and antioxidant capacity of berries: A review. *International Journal of Agriculture, Forestry and Life Sciences*, 3(2), 350—361, <https://doi.org/10.21475/ajcs.18.12.12.p1261>.

Ishiguro, K., Yahara, S., Yoshimoto, M. (2007). Changes in polyphenolic content and radical-scavenging activity of sweet potato (*Ipomoea batatas L.*) during storage at optimal and low temperatures, *J. Agr. and Food Chem.*, 55(26), 10773—10778. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf072256v>.

Juntachote, T., Berghofer, E. (2005). Antioxidative properties and stability of ethanolic extracts of Holy basil and Galangal. *Food Chem.*, 92(2), 193—202. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.04.044>.

Krzepilko, A., Prazak, R., Swiecilo, A. (2017). Chemical Composition, Antioxidant and Antimicrobial Activity of Raspberry, Blackberry and Raspberry-Blackberry Hybrid Leaf Buds, *Molecules*, 26(2). <https://doi.org/10.3390/molecules26020327>.

Majidi, M., Y-ALQubury, H. (2016). Determination of Vitamin C (*ascorbic acid*) Contents in various fruit and vegetable by UV-spectrophotometry and titration methods, *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*, 9(4), 2972—2974, <http://dx.doi.org/10.52155/ijpsat.v15.2.1144>.

Nagendran, B., Kalyana, S., Samir, S. (2006). Phenolic compounds in plants and agriindustrial by-products: Antioxidant activity, occurrence, and potential uses, *Food Chemistry*, 99(1), 191—203.

Neamțu, A.-A., Szoke-Kovacs, R., Mihok, E., Georgescu, C., Turcus, V., Olah, N. K., Mathe, E. (2020). Bilberry (*Vaccinium myrtillus L.*) extracts comparative analysis regarding their phytonutrient profiles, antioxidant capacity along with the In Vivo rescue effects tested on a *Drosophila melanogaster* high-sugar diet model. *Folia Horticulturae*, 32(1), 79—85. <https://doi.org/10.3390/antiox9111067>.

Neri, L., Faieta, M., Di Mattia, C., Sacchetti, G., Mastrocola, D., & Pittia, P. (2020). Antioxidant activity on frozen plant foods: Effect of cryoprotectants, freezing process and frozen storage, *Foods*, 9(1886), 1—35. <https://doi.org/10.3390/foods9121886>.

Noormets, M., Karp, K., Starast, M., Leis, L., Muru, K. (2006). The influence of freezing on the content of ascorbic acid in *Vaccinium* species berries. *Acta Hort.*, 715, 539—544. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.715.83>.

Poiana, M., Moigradean, D., Raba, D., Alda, L.-M., Popa, M. (2010). The effect of long-term frozen storage on the nutraceutical compounds, antioxidant properties and color indices of different kinds of berries. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 8(1), 54—58.

Polka, D., Podsedek, A., Koziołkewicz, M. (2019). Comparison of chemical composition and antioxidant capacity of fruit, flower and bark of *Viburnum opulus*. *Plant Foods for Human Nutrition*, 74(3), 436—442. <https://doi.org/10.1007/s11130-019-00759-1>.

Ponder, Hallmann, (2019). Phenolics and carotenoid contents in the leaves of different organic and conventional raspberry (*Rubus ideaeus* L.) cultivars and their In Vivo activity. *Antioxidants*, 8(10), 458. <https://doi.org/10.3390/antiox8100458>.

Postharvest, (2023). Postharvest handling and storage of berries. URL: <https://www.ontario.ca/page/postharvest-handling-and-storage-berries> (access date 09.03.2024).

Rickman, J. C., Barrett, D. M., Bruhn, C. M. (2007). Nutritional comparison of fresh, frozen and canned fruits and vegetables. Part 1. Vitamins C and B and phenolic compounds, *Journal of Sci Food Agric.*, 87, 930—944. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2825>.

Saltan, G., Süntar, I., Ozbilgin, S., Ilhan, M., Demirel, M., Oz, B., Akkol, E. (2016). *Viburnum opulus* L.: a remedy for the treatment of endometriosis demonstrated by rat model of surgically-induced endometriosis. *J. Ethnopharmacol.*, 193, 450—455. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2016.09.029>.

Sandell, M., Laaksonen, O., Lunden, S. (2012). Flavour properties and chemistry of berries, *Berries: Properties, Consumption and Nutrition*. University of Turku. Nova Science Publisher.

Simakhina, G., Naumenko, N., Bazhay-Zhezherun, S., Kaminska, S. (2019). Impact of Cryoprotection on Minimization of Ascorbic Acid Losses in Freezing of Berries. *Ukrainian Food Journal*, 8(2), 271—283. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2019-8-2-7>.

The Nutrition Source (2023). The Nutrition Source. URL: <https://hsph.harvard.edu/nutritionsource/vitamins> (access date 10.03.2024).

Toor, R. K., Savage, G. P. (2006). Changes in major antioxidant components of tomatoes during post-harvest storage. *Food Chem.*, 99(4), 724—727. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.08.049>.

Viña, S. Z., Chaves, A. R. (2006). Antioxidant response in minimally processed celery during refrigerated storage. *Food Chem.*, 94(1), 68—74. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.10.051>.

Yang, B., Halttunen, T., Raimo, O., Price, K., Kallio, H. (2009). Flavonol glycosides in wild and cultivated berries of three major subspecies of *Hippophae rhamnoides* and changes during harvesting period, *Food Chemistry*, 115(2), 657—664. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.12.073>.

Zlabur, J. S., Mikulec, N., Dozdor, L., Duralija, B., Galic, A., & Voca, S. (2021). Preservation of Biologically Active Compounds and Nutritional Potential of Quick-Frozen Berry Fruits of the Genus *Rubus*. *Processes*, 9(1940), 1—19. <https://doi.org/10.3390/pr9111940>.

ALTERNATIVE SOURCES OF DIETARY FIBER AND THEIR USE IN THE TECHNOLOGY OF EMULSIFIED MEAT PRODUCTS

M. Vorontsov, O. Galenko

National University of Food Technologies

Key words:

*Soluble dietary fibers
Bamboo fiber
Technology of emulsified
sausages*

Article history:

Received 14.07.2024
Received in revised form
31.07.2024
Accepted 16.08.2024

Corresponding author:

O. Galenko
E-mail:
galen@i.ua

Citation: М. А. Воронцов, О. О. Галенко (2024). Альтернативні джерела харчових волокон та їх використання у технології емульгованих м'ясопродуктів. *Наукові праці НУХТ*, 30(4), 189—206.
DOI: 10.24263/2225-2924-2024-30-4-16

ABSTRACT

Dietary fibers are important functional components that have both physiological and technological advantages. They contribute to better assimilation of nutrients, support healthy microflora of the gastrointestinal tract, lower cholesterol levels and promote the removal of toxins from the body. Scientists explore new sources of fiber, such as fiber concentrates from apples and citrus fruits, which contain large amount of dietary fiber and low calories. Oat dietary fibers are of particular interest due to their ability to bind and adsorb fat, which makes them promising material for use in the meat industry. Oat fiber improves stability of emulsions and reduce fat and salt content in products. However, the thermal stability of meat emulsions with the addition of these fibers needs further study. This is opportunity for the development of innovative technologies for the production of meat products with improved functional properties that ensure high quality and health benefits. Another source of fiber is bamboo. It is used to produce isolated fiber as an ingredient for food products. Studies of meat with such isolated fiber showed the increase in shelf life during 28 days of storage that is approved by the stability of the samples — low values of moisture content (5%) and water activity (0.5). The consistency of meat emulsions and pastries with reduced fat content was close to the sample without this additive. The researchers concluded that it is possible to reduce the amount of three ingredients in emulsions and baking (fat, hydrocolloids and sugar) by adding 1—3% bamboo fiber, demonstrating its potential as an ingredient capable of improving the utility of food products.

АЛЬТЕРНАТИВНІ ДЖЕРЕЛА ХАРЧОВИХ ВОЛОКОН ТА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ У ТЕХНОЛОГІЇ ЕМУЛЬГОВАНИХ М'ЯСОПРОДУКТІВ

М. А. Воронцов, О. О. Галенко

Національний університет харчових технологій

Харчові волокна є важливими функціональними компонентами, що мають як фізіологічні, так і технологічні переваги. Вони сприяють кращому засвоєнню поживних речовин, підтримують здорову мікрофлору шлунково-кишкового тракту, знижують рівень холестерину та сприяють виведенню токсинів з організму. Науковці продовжують досліджувати нові джерела волокон, такі як концентрати клітковини з яблук і цитрусових, що характеризуються високим вмістом харчових волокон і низькою калорійністю. Особливий інтерес викликають вівсяні харчові волокна завдяки їхній здатності зв'язувати та адсорбувати жир, що робить їх перспективними для використання в м'ясній промисловості. Дослідження показують, що вівсяні волокна покращують стабільність емульсій і можуть знижувати вміст жиру та солі в продуктах. Однак термічна стабільність м'ясних емульсій з додаванням цих волокон потребує подальшого вивчення. Це відкриває нові можливості для розробки інноваційних технологій виробництва м'ясних продуктів із покращеними функціональними властивостями, що забезпечують високу якість і користь для здоров'я.

Бамбук є джерелом клітковини, яка використовується для виробництва ізолюваної клітковини як інгредієнта для харчових продуктів. Огляд показав, що для більшості груп продуктів зниження колірних параметрів і калорійності оцінено позитивно. Підвищення терміну придатності протягом 28 днів зберігання продемонстровано стабільністю зразків (з низькими значеннями вмісту вологи (5%) та активності води (0,5)). За консистенцією рецептура м'ясних емульсій і випічки зі зниженим вмістом жиру була близькою до контрольної. Дослідники прийшли до висновку, що можна зменшити кількість трьох інгредієнтів в емульсіях і випічці (жир, гідроколіди та цукор), додавши 1–3% бамбукового волокна, що демонструє його потенціал як інгредієнта, здатного покращити корисність харчових продуктів.

Ключові слова: розчинні харчові волокна, бамбукова клітковина, технологія емульгованих ковбас.

Постановка проблеми. Природні функціональні інгредієнти, зокрема харчові волокна, стають об'єктом все більшої зацікавленості серед харчових технологів, які прагнуть розробляти продукти з підвищеною поживною та біологічною цінністю, що сприятливо впливають як на окремі системи організму (наприклад, шлунково-кишковий тракт), так і на організм у цілому. Окрім лікувально-профілактичних властивостей, харчові волокна мають і технологічні переваги, такі як здатність утримувати вологу, забезпечувати стабільність структури готових продуктів, а також загущувати розчини, суспензії та емульсії.

Фізіологічний вплив харчових волокон виявляється в їх здатності впливати на засвоєння білків, ліпідів та інших поживних речовин, а також у стимулюванні виведення продуктів метаболізму. Вони створюють сприятливе середовище для нормальної мікрофлори шлунково-кишкового тракту, сприяють відчуттю ситості, подовжують час спорожнення шлунку, зв'язують і виводять токсини, знижують рівень холестерину в крові, уповільнюють абсорбцію цукру в кишечнику, активують перистальтику та сприяють синтезу вітамінів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Технологічні, сенсорні та харчові властивості м'ясних продуктів безпосередньо залежать від вмісту в них тваринного жиру (Alejandre, Poyato, Ansorena, & Astiasarán, 2016). Додавання тваринного жиру до м'ясних продуктів істотно впливає на їх сенсорні властивості, такі як колір, смак і аромат. Крім того, фізико-хімічні властивості жиру вирішально впливають на текстуру м'ясних продуктів, відіграючи фундаментальну роль у покращенні властивостей в'язкості, кремоподібності, жування, зв'язності та твердості (Font-i-Furnols, & Guerrero, 2014). Однак високий вміст тваринного жиру в м'ясних продуктах робить їх шкідливими для здорового харчування, тому зниження жирності м'ясних продуктів є гострою потребою, але це виклик для дослідників і м'ясної промисловості. Зменшення жиру в м'ясних продуктах без шкоди для якості продукту та з незначним впливом на виробничі витрати є непростим завданням. Таким чином, стратегії зниження вмісту жиру в м'ясних продуктах слід вивчати з обережністю (Henchion, McCarthy, Resconi, & Troy, 2014). Протягом останніх десятиліть було випробувано декілька заміників жиру, але серед усіх них використання борошна та клітковини, гідроколоїдів, грибів та деяких тваринних білків (таких як сироватка та колаген) дало багатообіцяючі результати (French, & Read, 1994). Крім того, численні стратегії желювання олій рослинного походження також є актуальною темою для вивчення, і вони мають певні переваги, такі як їхній зовнішній вигляд (спроби імітувати тваринний жир), а також покращують поживний профіль ліпідної фракції м'ясних продуктів. Однак кожен із цих заміників жиру має як переваги, так і обмеження у їх використанні, які розглянуті в публікаціях щодо можливостей пошуку альтернативних джерел клітковини, включаючи такі джерела, як бамбук і гарбуз (Clark, & Johnson, 2002). У дослідженнях, окрім питання заміни фосфатів у рецептурах ковбасних виробів (Magalhães, Paglarini, Vidal, & Pollonio, 2020), вивчався також вплив заміни лужного фосфату бамбуковим волокном, ізольованим білком гороху та грибним порошком на поживні, технологічні, окисні та сенсорні характеристики мортадели з низьким вмістом натрію (Pinton та ін., 2024). Результати показали, що ця зміна рецептури зберегла поживну якість продуктів. Природні заміники виявилися більш ефективними, ніж лужні фосфати, у зменшенні ексудації води та жиру. Це призвело до зниження показників аналізу профілю текстури, серед яких твердість, міцність, адгезивність і зусилля деформації при надкушуванні. Переформулювання зменшило значення за шкалою L (світлі відтінки) і збільшило значення за шкалою b (яскравість), що призвело до змін кольору від помітних до відчутних відповідно до індексу Національного бюро стандартів. Незважаючи на незначні зміни в окислювальній стабільності, на які вказують підвищення значень вмісту реактивних речовини тіобарбітурової кислоти (від 0,19 до 0,33 мг/кг), карбонілів (від 2,1 до 4,4 нмоль

карбонілу/мг білка) і профілю летких сполук, сенсорний профіль показав сприятливе збільшення в солоний смак, особливо завдяки включенню грибного порошку, який був посилений синергією з бамбуковою клітковиною та білком гороху. Результати підтвердили потенціал природних альтернатив для заміни хімічних добавок у м'ясних продуктах. Включення природних антиоксидантів у майбутні рецептури може вирішити спостережувані незначні проблеми окислення та підвищити універсальність цієї стратегії заміни рецептурних компонентів (Pinton та ін., 2022).

Можливість зменшення жиру в харчових продуктах була розглянута на прикладі шоколаду. Дослідження спрямоване на вивчення можливості виробництва шоколаду для сніданку, замінюючи олію цією клітковиною на п'яти рівнях: 0%, 2,5%, 4,5%, 6,5%, 8,5% (Felisberto та ін., 2021). Результати показали, що заміна олії на клітковину до рівня 8,5% не мала істотного впливу на значення рН і активність води. Було виявлено, що вміст вологи та золи значно збільшився, оскільки підвищився вміст клітковини у складі шоколадного сніданку. Також результат аналізу калорійності показав, що при заміні олії на клітковину до рівня 8,5% рівень калорійності знизився на 13,42%. П'ять сенсорних оцінок рецептури шоколаду для сніданку також вказують на вищу прийнятність зразка, приготовленого з 4,5% бамбукової клітковини. Результати аналізу текстури та вимірювання візуальної в'язкості показали, що параметри візуальної в'язкості, жорсткості, когезії, адгезії та індексу консистенції значно зросли зі збільшенням відсотка клітковини у формулі. Загалом, шоколадний сніданок, виготовлений на 4,5% бамбукової клітковини, може стати доброю заміною жиру в шоколаді для сніданку, а оптимальна формула здатна знизити калорійність на 6,35%.

Мета дослідження: розглянути новітні типи та джерела харчових волокон, які можуть мати обґрунтовані перспективи для застосування в рецептурах емульгованих м'ясопродуктів.

Матеріали і методи. У ході проведення літературного огляду застосовано методи аналізу та синтезу, пошуку інформації та її обробки.

Викладення основних результатів дослідження. Сучасні наукові дослідження свідчать, що традиційними продуктами харчування важко досягти значного лікувального й профілактичного ефекту. У зв'язку з цим на ринках США, Європи та Японії з'явилися продукти профілактичного призначення, зокрема ті, що містять суміші харчових волокон. Обмежений асортимент таких продуктів на українському ринку вказує на недостатню увагу вітчизняних виробників до створення подібних товарів.

Бамбукову клітковину можна класифікувати та поділити на натуральну бамбукову клітковину, клітковину з бамбукової целюлози та клітковину з бамбукового вугілля (Liu, Song, Anderson, Chang, & Hua, 2012). Натуральна бамбукова клітковина — це клітковина, безпосередньо екстрагована з бамбука за допомогою фізичного або мікробного дегумування. Властивості кристалічної структури оригінальної бамбукової клітковини не змінюються в процесі екстракції, що робить клітковину натуральною. Клітковина бамбукової целюлози виготовляється з целюлози бамбука, придатної для виробництва клітковини, з якої потім отримують клітковину. Клітковина бамбукового вугілля виготовляється шляхом обробки поверхні порошку бамбукового вугілля на нанорівні, потім суспензія додається до

віскози та витягується у форму дроту. Цей метод в основному застосовується в текстильній промисловості.

У Китаї (який є основним виробником бамбукової клітковини) бамбукова клітковина в основному поділяється на три вищезазначені категорії. Натуральна бамбукова клітковина зберігає характеристики оригінального бамбука, але для цього потрібно більше сировини, що робить процес виробництва натуральних клітковин технічно неефективним. Нині вироби з бамбукової клітковини на ринку в основному виготовляються з клітковини бамбукової целюлози та клітковини бамбукового вугілля (Hu, & Yu, 2015).

Хімічний склад бамбукової клітковини. Бамбукова клітковина є природним біокомпозитом, а основними хімічними складовими бамбукової клітковини є целюлоза, геміцелюлоза та лігнін. Целюлоза в основному складається з трьох елементів, таких як вуглець, водень і кисень, і це матеріальна основа, яка утворює клітинну стінку бамбукової клітковини. Як правило, целюлоза залишається у формі мікрофібрил у клітинній стінці рослини. У результаті аналізу хімічного складу бамбукової клітковини, яка використовується для текстилю після сепарації, було виявлено, що вміст целюлози в ній досяг 73,83%. Целюлоза є основним фактором, що впливає на міцність на розрив уздовж зерна бамбукової клітковини, а вміст целюлози тісно пов'язаний із віком бамбука. Варто зазначити, що вміст целюлози в тому ж бамбуковому матеріалі зменшується зі збільшенням віку бамбука.

Геміцелюлоза — це аморфна речовина з низьким ступенем полімеризації, яка знаходиться між молекулами клітковини. Геміцелюлоза є складним полісахаридом з ксиланом як переважаючим ланцюгом, гілки в основному включають 4-О-метил-D-глюкуронову кислоту, L-арабінозу та D-ксилозу. Серед іншого вчені з декількох країн досліджували фракцію полісахаридів *Phyllostachys makinoi*, екстрагованих 5% і 17,5% NaOH, і виявили, що її основним компонентом був арабіноксилан, а співвідношення ксилози до арабінози становило 17—18:1. Sun та ін. проаналізували компоненти полісахаридів бамбука, екстраговані двома різними методами, і повідомили, що більшість компонентів полісахаридів після екстракції дистильованою водою були глюкозою, тоді як вміст ксилози був вищим після екстракції лугом (Guo, & Vyambasuren, 2015).

Лігнін є різновидом полімеру зі складною структурою та багатьох типів. Основні одиниці лігніну в основному включають гваяцил, сирингіл мономери та п-гідроксифеніл мономери. Структурні одиниці в лігніні в основному з'єднані ефірними зв'язками та одинарними зв'язками вуглець-вуглець. Лігнін нерівномірно розподілений у вторинній стінці бамбукової клітковини. Як правило, концентрація лігніну в широкому шарі нижча, тоді як концентрація лігніну у вузькому шарі вища. Наявність лігніну також надає бамбуковому матеріалу певний ступінь стабільності.

Основна структура бамбукової клітковини. Клітини бамбука в основному складаються з клітин харчових волокон, клітин паренхіми, проток, клітин епідермісу, ситоподібних трубок, клітин-супутників і деяких інших клітин. Клітини бамбукової клітковини не мають внутрішньої стінки, але середній шар вторинної стінки має багатошарову структуру. Орієнтація мікрОВОЛОКОН різниться між шарами клітинної стінки бамбукової клітковини, а також між різними видами бамбука. На-

прямок мікрОВОЛОКОН у вузькому шарі є майже горизонтальним спіральним розташуванням, тоді як напрямок мікрОВОЛОКОН у широкому шарі є майже осьовим спіральним розташуванням. Через різну орієнтацію волокон у вузькому та широкому шарі бамбук є анізотропним. Різний розподіл судинних пучків призводить до різної поздовжньої проникності бамбукових клітковин, що, у свою чергу, впливає на проникнення хімічних реагентів і має певний вплив на аналіз складу та виробництво бамбукових клітковин.

Повідомлялося про значні дослідження характеристик бамбукової клітковини, підкреслюючи її короткий цикл виробництва й екологічні переваги порівняно з іншими штучними клітковинами. Між бамбуковими клітковинами є великі порожнечі, які можуть вбирати різноманітні запахи, пил та інші шкідливі речовини, а також можуть очищати повітря та контролювати вологість. Клітковина бамбука має сильну антибактеріальну дію і містить натрій-мідь хлорофіл, який забезпечує освіжаючий і антиультрафіолетовий ефект. Однак бамбукова клітковина також має деякі недоліки, включаючи високе водопоглинання, корозію та низьку довговічність. Отже, при використанні бамбукових клітковин слід звернути увагу на водонепроникну обробку та захист від цвілі, щоб підвищити довговічність виробів з бамбукової клітковини.

Екстракція бамбукового волокна часто вимагає комбінації методів для задоволення вимог до кінцевого застосування. В останні роки було розроблено ресурсоощадну інтегровану технологію, що поєднує обробку ультразвуком із подальшою обробкою целюлазою. Ультразвукова обробка зруйнувала кристалічну структуру волокна й оголила його поверхню, що значно підвищило ефективність обробки целюлазою та покращило гнучкість волокна.

Випробування на розтягування окремого волокна відноситься до прямого осьового розтягування волокон на рівні однієї клітини. Наноіндентування полягає у вдавлюванні крихітного алмазного зонда в поверхню матеріалу з дуже невеликою силою та постійному зборі навантаження, що діє на кінчик голки та глибину вдавнення зразка під час процесу завантаження та вивантаження. Випробування на розтягування окремого волокна та наноіндентування є двома широко використовуваними технологіями для вимірювання механічних властивостей клітинних стінок рослин. Повідомлялося про значні дослідження механічних властивостей бамбукового волокна, а модуль Юнга та міцність на розрив становили 11—17 ГПа та 140—230 МПа відповідно (Khoshkish, & Gharachorlo, 2022). Тан та ін. провели тест на вдавнення клітинної стінки бамбукового волокна та повідомили, що модуль пружності на розтягування демонструє тенденцію до зменшення від зовнішньої поверхні бамбука до внутрішньої поверхні. Дослідники порівняли механічні властивості на розтяг чотирьох різних типів волокон: бамбука, кенафу, китайської ялиці та рамі, і результати показали, що властивості на розтягування бамбукового волокна перевершують інші волокна. Також порівняли клітинні стінки бамбука та деревних волокон і виявили, що механічні властивості бамбука перевершують властивості деревини. Внаслідок досліджень механічних властивостей встановлено, що орієнтація фібрил целюлози була майже вздовж осі волокна, щоб максимізувати поздовжній модуль пружності.

Багато факторів впливають на механічні властивості бамбукових волокон, такі як хімічний склад і структура бамбукових волокон, вміст вологи, вік бамбука тощо. Тіан повідомив, що модуль пружності при розтягуванні бамбука зменшився з видаленням геміцелюлози, але не змінився суттєво з видалення лігніну. Міцність на розрив бамбукового волокна також зменшилася з видаленням хімічних компонентів, тоді як пластичність трохи зменшилася з видаленням лігніну, але збільшилася з видаленням геміцелюлози. Будова клітин бамбукового волокна складна, а середній шар вторинної стінки клітини має багатошарову будову. Тому лігнізація тонких і товстих шарів у багатошаровій структурі різна, а орієнтація мікрофібрил різна, що призводить до відносно великої різниці в механічних властивостях між сусідніми шарами стінки. Багатошарова структура клітинної стінки забезпечує кращу стійкість до руйнування та сприяє внутрішньому ковзанню між шарами клітинної стінки під час натягу. Кут мікрофібрил також є важливим фактором, що впливає на механічні властивості волокна; як правило, міцність на розтягування і модуль пружності на розтягування волокна зростають із зменшенням кута мікрофібрил. Отже, менший кут мікрофібрил є важливим фактором, який сприяє чудовим механічним властивостям бамбукового волокна. Між молекулами бамбукового волокна є великі порожнечі, які мають хорошу гігроскопічність. Отже, вміст вологи також є важливим фактором, що впливає на механічні властивості бамбукових волокон. Також протягом 2010—2019 рр. неодноразово досліджували вплив вмісту вологи на механічні властивості бамбука на макроскопічних рівнях і шкалах клітинних стінок і повідомили, що під точкою насичення волокна модуль пружності при стисненні, модуль пружності при вдавненні та твердість бамбукового волокна зменшуються, зі збільшенням вмісту вологи. Колектив вчених використовував випробування на розтягування окремого волокна та наноіндентування, щоб вивчити вплив зміни вмісту вологи на механічні властивості бамбукових волокон і помітив, що зі збільшенням вмісту вологи модуль розтягування та міцність на розрив бамбукових волокон значно зменшуються, але збільшення подовження при розриві. Результати випробувань показали, що міцність і жорсткість чотирирічного волокна були кращими, ніж у однорічного волокна, але різниця в механічних властивостях окремого волокна в поздовжньому та радіальному напрямках стебла бамбука не була очевидною. Попередні дослідницькі проекти з бамбукових волокон в основному зосереджувалися на механічних властивостях і відповідних факторах, що впливають на ці властивості, шляхом використання методів випробування на розтягування та наноіндентування. Повідомлені результати досліджень чітко показують, що бамбукові волокна мають високу стійкість до різних механічних впливів при поздовжньому, поперечному та інших видах розтягування або різання. Потрібні додаткові дослідження для загальної характеристики бамбукових волокон і методів їх вилучення, щоб сприяти їх використанню в різних інженерних і повсякденних продуктах.

Перспективи застосування вівсяної клітковини. Овес, як правило, вважається джерелом компонентів для оздоровчого харчування або функціональних продуктів. Відкриття корисних для здоров'я та зниження рівня холестерину властивостей призвело до більш широкого визнання вівса як їжі для людей (Verbeke, 2006). Овес містить більше розчинної клітковини, ніж будь-яке інше зерно, що призводить до уповільнення травлення й тривалого відчуття ситості. Популярність вівсяної каші

та інших вівсяних продуктів знову зросла після рішення FDA, в якому було доведено факт того, що вживання розчинної клітковини з цільного вівса може знизити ризик серцевих захворювань. Розчинна клітковина в цільному вівсі складається з класу полісахаридів, відомих як бета-D-глюкани. Доведено, що один тип розчинної клітковини, бета-глюкани, допомагає знизити рівень холестерину (Guo, & Yambasuren, 2021). Бета-D-глюкани, які, зазвичай, називають бета-глюканами, включають клас неперетравлюваних полісахаридів, які містяться у природних джерелах, таких як зерно, ячмінь і гриби (Di Lorenzo, Williams, Najina, & Valenzuela, 1988). У вівсі, ячмені та інших зернах злаків вони розташовані переважно в клітинній стінці ендосперму. Бета-глюкан вівса — це розчинна клітковина. Це в'язкий полісахарид, що складається з ланок моносахариду D-глюкози. Бета-глюкан вівса складається зі змішаних полісахаридів. Це означає, що зв'язки між одиницями D-глюкози або D-глюкопіранозилу є зв'язками бета-1,3 або бета-1,4. 1,3-зв'язки руйнують однорідну структуру молекули бета-D-глюкану і роблять її розчинною та гнучкою. Для порівняння, неперетравлювана полісахаридна клітковина також є бета-глюканом, але нерозчинною. Причина його нерозчинності полягає в тому, що клітковина складається лише з 1,4-бета-D-зв'язків. Як епідеміологічні, так і клінічні дослідження свідчать про те, що на ступінь ризику ішемічної хвороби серця впливають харчові фактори, окрім споживання жиру та холестерину. Експерименти на людях чітко показали, що вівсяна клітковина має тенденцію до зниження загального холестерину в плазмі та холестерину. Зернові продукти з низьким глікемічним індексом, такі як овес, корисні для людей з діабетом і можуть знизити рівень ліпідів у плазмі. Доцільним є також розглянути вплив вівсяної клітковини на здоров'я людини, описуючи та оцінюючи їх значення та можливі механізми дії. Було припущено, що зменшення загального споживання жиру зі збільшенням поліненасиченої фракції та зменшення споживання холестерину з їжею може призвести до зниження загальної концентрації холестерину в сироватці крові (Drewnowski, 1998). Потрібна додаткова інформація про вплив різних типів харчових волокон на рівні ліпопротеїнів сироватки. Звіти про епідеміологічні дослідження в західних країнах показали, що споживання харчових волокон забезпечує захист від ішемічної хвороби серця. Зворотний зв'язок зі смертністю від ішемічної хвороби серця спостерігався як для споживання нерозчинних харчових волокон, так і для розчинних харчових волокон. Зворотний зв'язок між харчовими волокнами та ішемічною хворобою серця можна пояснити різними механізмами, такими як зниження артеріального тиску через зменшення абдомінального ожиріння та покращення реактивності судин, усі з них можуть запобігти або затримати розвиток атеросклерозу. Попередні дослідження показали, що ці ефекти були отримані як від нерозчинних харчових волокон, так і від розчинних харчових волокон. Однак розчинні харчові волокна можуть мати сильніший ефект зниження рівня холестерину, тоді як нерозчинні харчові волокна можуть мати сильніший ефект зниження фактору згортання крові. Очевидний захисний ефект клітковини щодо ризику ішемічної хвороби серця може бути зумовлений іншими звичками, пов'язаними зі здоров'ям, такими як регулярні фізичні вправи та відмова від куріння. Бета-глюкан складається з розгалужених ланцюгів. Функціональні продукти, збагачені бета-глюканом переважно з вівса, широко доступні для зниження

рівня холестерину ліпопротеїдів низької щільності у сироватці крові. Деякі дослідження виявили зниження більш ніж на 10%, але кілька досліджень продемонстрували практично відсутність користі. Непослідовність у повідомлених ефектах вівсяних продуктів може бути наслідком кількох факторів, таких як спосіб введення або відмінності в розчинності чи молекулярній масі. Було припущено, що харчова матриця або обробка їжі впливає на гіпохолестеринемічні властивості бета-глюкану. І ця потенційна користь може бути обмежена кількістю клітковини, яку люди повинні споживати (WHO, 2009). Тому фізико-хімічні властивості бета-глюкану вівса слід враховувати при оцінці здатності продуктів, що містять овес, знижувати рівень холестерину. Розчинність у воді та молекулярна маса бета-глюкану також можуть впливати на його гіпохолестеринемічний ефект. Є деякі ознаки того, що молекулярна маса бета-глюкану може частково зменшуватися під час його проходження через верхні відділи шлунково-кишкового тракту. Однак існують суперечливі повідомлення, які не показують кількісних втрат бета-глюкану з вівсяного борошна або висівку у шлунку та верхніх відділах тонкої кишки. Під час проходження через шлунок і тонкий кишечник нерозчинні бета-глюкани частково перетворюються в розчинну форму і можуть утворювати в'язкі розчини в кишечнику (Tapes та ін., 2021). В'язкість розчинів бета-глюкану визначається його молекулярною масою та розчинністю, обидва з яких можуть бути змінені звичайними методами обробки та зберігання. Підвищена в'язкість кишечника знижує реабсорбцію жовчних кислот, що призводить до збільшення екскреції жовчних кислот. Підвищене виділення жовчних кислот сприяє їх синтезу із холестерину, що збільшить поглинання холестерину у печінці. Щоденне споживання бета-глюкану вівса з високою молекулярною вагою в готовій до вживання каші знижує рівень холестерину. Крім того, вплив бета-глюкану вівса на холестерин був значною мірою пов'язаний з його в'язкістю, яка визначалася молекулярною масою та біодоступністю. Мета-аналіз випробувань статинів свідчить про те, що зниження рівня холестерину зменшить ризик ішемічної хвороби серця приблизно на 5%. У деяких дослідженнях порівнювалися ефекти бета-глюканів зернових на зниження рівня холестерину в різних дозах і молекулярних вагах, але вони дають суперечливі або сумнівні результати. Можливі причини полягають у тому, що бета-глюкан не був повністю розчинений у кишечнику або що молекулярна маса бета-глюкану була зменшена в результаті обробки. Висока молекулярна маса може бути пов'язана з підвищеною в'язкістю кишечника, що може зменшити всмоктування холестерину. Проте було показано, що у здорових добровольців бета-глюкан як з високою, так і з низькою молекулярною масою знижує концентрацію загального холестерину та холестерину в сироватці однаково відносно вихідного рівня. Ці результати свідчать про те, що сама по собі молекулярна маса не може передбачити ефект бета-глюкану на зниження холестерину. Оскільки споживання харчових волокон у повсякденному житті зростає, необхідно знати, як ці волокна взаємодіють із введеними ліками. Застосування клітковини може зменшити вираженість опосередкованих дофаміном шлунково-кишкових і серцево-судинних побічних ефектів, забезпечуючи нижчі максимальні концентрації леводопи, а також забезпечуючи більш рівномірну реакцію шляхом підтримки концентрацій у плазмі крові у вужчому діапазоні, коли леводопа вводилася окремо та в присутності

карбідопи (Evans, & Cheung, 1993). Подальше дослідження показало, що спостережалося покращення ступеня абсорбції леводопи при більш високих кінцевих концентраціях при повторних дозах. Недавнє дослідження прийшло до висновку, що введення препарату покращує переваги харчових волокон, запобігаючи їх бактеріальному розкладанню.

Дослідження нових або альтернативних джерел розчинних і нерозчинних харчових волокон стають все більш актуальними і розглядаються в багатьох наукових працях. Наприклад, група вчених із Чилі провела оцінку функціональних властивостей концентратів клітковини, отриманих з відходів переробки яблук і цитрусових, розглядаючи їх як потенційні джерела для збагачення харчових продуктів (Aminzare, Hashemi, Afshari, Noori, & Rezaeigolestani, 2024). Ці концентрати було проаналізовано за основними фізико-хімічними параметрами, такими як вміст вологи, жиру, білка та золи, а також калорійність, склад харчових волокон і функціональні властивості, включаючи вологоутримувальну здатність, здатність до набухання, адсорбцію жиру та текстуру. Всі досліджені зразки клітковини мали високий вміст харчових волокон (від 44,2 до 89,2 г/100 г сухої речовини), а вміст білків і жирів варіювався від 3,12 до 8,42 та 0,89 до 4,46 г/100 г сухої речовини відповідно. Калорійність концентратів була невисокою (50,8—175 ккал/100 г або 213—901 кДж/100 г). Найвищу вологоутримувальну здатність (2,09—2,26 г води/г сухої речовини) продемонструвала клітковина грейпфрута, яка також показала високу здатність до набухання та адсорбції жиру.

Важливість клітковини для підтримки здоров'я людини визнана багатьма установами Європейської комісії і неодноразово обговорювалася на панельних дискусіях в межах ЄС (EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA), 2010). Проте питання використання харчових волокон із вівса та картоплі в м'ясній промисловості для виробництва емульгованих продуктів залишається недостатньо дослідженим.

Вівсяні харчові волокна вирізняються високою здатністю до зв'язування та адсорбції жиру, що є важливим для розробки нових технологій у виробництві емульгованих м'ясопродуктів. Останні дослідження фізико-хімічних та функціональних властивостей вівсяних волокон, проведені китайськими науковцями, показали, що основна частина харчових волокон вівса зосереджена у висівках. Однак висівки в основному використовуються як корм для худоби та птиці, що обмежує їхнє використання і знижує додану вартість. У дослідженні нерозчинні харчові волокна були виділені за допомогою комбінації α -амілази та нейтральної протеази, при цьому оптимальні умови екстракції були визначені методом поверхні відгуку (Guo, & Vyambasuren та ін., 2021).

Вплив вівсяних висівок на властивості м'ясних емульсій був досліджений турецькими науковцями, які вивчали ефекти різних рослинних волокон на стабільність емульсії, її об'ємну щільність, активність, в'язкість, умовну межу текучості та міцність гелю в яловичих м'ясних емульсіях, використовуючи модельну систему (Kurt, & Seylan, 2020). Дослідження показало, що волокна значно впливають на властивості емульсії. Наприклад, волокна яблука і лимона покращували активність емульсії, а морквяні та пшеничні волокна збільшували її щільність. Волокна моркви, лимона та вівса сприяли підвищенню стабільності емульсії, причому ли-

монні волокна були найефективнішими у підтримці стабільності під час зберігання. Інулін і яблучні волокна знижували емульгуючу здатність і міцність гелю, тоді як інші волокна підвищували ці показники. Пшеничні волокна збільшували умовну межу текучості емульсії, тоді як інші волокна знижували цей показник. Загалом, рослинні волокна незначно покращували здатність до емульгування, але підвищували в'язкість емульсії (Alves, Bellucci, Santos, Bertuci, & Barretto, 2022).

Позитивний вплив вівсяних і картопляних волокон на емульсії також підтверджений в кількох дослідженнях. Однією з головних переваг цих волокон є їхня висока здатність поглинати жир і стабілізувати емульсії за наявності білків тваринного походження. Досліджено вплив повної заміни крохмалю сумішшю харчових волокон на якість ферментованої свинячої ковбаси з вмістом бамбукових волокон 1,75%. Для покращення сенсорної оцінки, властивостей текстури, втрат при варінні та кольору було оптимізовано концентрацію суміші, а різницю в харчовій якості досліджували порівняно з ковбасами, що містять 1,75% клітковини та або крохмаль, або суміш харчових волокон. Результати показали, що найвища загальна прийнятність була досягнута при додаванні 8% харчових волокон. Отримана ковбаса мала компактну і м'яку консистенцію, добру пружність, рівний переріз, м'якisto-червоний колір, сильний аромат і хороший смак. При рівнях додавання 5%, 11% і 14% загальна прийнятність і смак були відносно поганими. Втрати при варінні зменшилися з 11,28% до 8,38% при збільшенні додавання харчових волокон з 5% до 14%. Заміна крохмалю дієтичними волокнами призвела до отримання ковбаси з більш м'якою консистенцією, підвищення сенсорних оцінок аромату та смаку, а також до збільшення втрат при варінні з 5,71% до 9,07%. Підсумовуючи, додавання суміші харчових волокон впливає на якість ковбаси, а ковбаса з бамбуковою сіллю має найкращу харчову якість при рівні додавання 8% (Страшинський, Маринін, & Ришканич, 2020).

Жом апельсину як альтернативне джерело харчових волокон. Виробництво апельсинового соку використовує приблизно 50% фруктів, а інші 50% складаються зі шкірки, насіння та альbedo, які можуть становити до 60% від загальної кількості побічних продуктів (Fernández-López та ін., 2009).

Харчові волокна цитрусових мають вищу якість порівняно з альтернативними джерелами, такими як зернові культури, оскільки цитрусові клітковини містять більше розчинних харчових волокон і пов'язаних з ними біологічно активних сполук (флавоноїдів, поліфенолів, каротиноїдів і вітаміну С) з антиоксидантними властивостями, які можуть забезпечити додатковий оздоровчий ефект. В останні роки проведено дослідження, які демонструють фізичні, хімічні та функціональні властивості харчових волокон, отриманих із цитрусових, таких як апельсини та лимони, підкреслюючи їхні антиоксидантні властивості (Figuerola, Hurtado та ін., 2005).

Кілька видів харчових волокон використовувалися в харчових продуктах для визначення їх можливого сприятливого впливу на здоров'я, і завдяки цьому вони мають низку технологічних властивостей, таких як зв'язування води, гелеутворення, формування структури. Їх можна використовувати як потенційні замітники жиру. Функціональність заміників жиру на основі вуглеводів пояснюється їх здатністю збільшувати гелеутворення та в'язкість, надавати смак і текстуру, а також підвищувати здатність до утримання води (Devereux, Jones, McCormack, & Hunter, 2003).

У дослідженні вчених із Бразилії було охарактеризовано волокна з побічних продуктів виробництва апельсинового соку щодо їх функціональних, фізичних і хімічних властивостей. Крім того, клітковина використовувалася як замітник жиру в рецептах шоколадного морозива. Морозиво було проаналізовано на хімічні та сенсорні відмінності. Властивості та застосування клітковини з апельсинових відходів.

Відходи виробництва апельсинового соку (*Citrus sinensis*) були надані компанією «Pure Juice», розташованою в Порту-Алегрі (РС/Бразилія) (Figuerola та ін., 2005). Ці відходи склалися з апельсинової шкірки, м'якоті та насіння, які були розділені вручну на дві групи: цедра, м'якоть (флаведо та альбеда) і насіння (F1); і очищені частини (F2). Сировину збирали протягом одного тижня і зберігали при -18°C для подальшого використання. Було виготовлено два зразки апельсинової клітковини: F1 (шкірка, м'якоть і насіння) і F2 (шкірка). Загальна масова частка харчових волокон (TDF) становила приблизно 63 г/100 г (DM) і не показала суттєвої різниці ($p < 0,05$) між зразками. Згідно з Lagauri (1999), продукти з вмістом клітковини понад 50 г/100 г можна розглядати як багате джерело харчових волокон. Значення TDF були подібні до значень, наведених у (Figuerola, Hurtado, Estévez, Chiffelle, & Asenjo, 2005) для волокна з апельсинових відходів.

Виходячи з результатів випробувань, волокна з побічних продуктів виробництва апельсинового соку можна використовувати як інгредієнти в харчовій промисловості, особливо через їх поживні та функціональні характеристики. Волокна мали високий загальний вміст харчових волокон і добре збалансоване співвідношення між розчинними та нерозчинними волокнами, що важливо для регуляції кишечника та профілактики різних захворювань.

Інший колектив вчених з Бразилії досліджував ферментовані ковбаси зі зниженим вмістом жиру та солі, з додаванням до 2% трьох різних харчових волокон: мікрокристалічної целюлози, резистентного крохмалю та вівсяної клітковини (Dos Santos, Ignácio, Bis-Souza, & da Silva-Barretto, 2021). Виявилося, що додавання волокон не вплинуло на втрати під час термічної обробки, рівень рН та органолептичні характеристики продуктів. Розроблені моделі дали змогу оцінити активність води, ріст кількості молочнокислих бактерій, показники жорсткості та консистенцію при надкушуванні. Включення трьох видів харчових волокон сприяло зниженню активності води, а мікрокристалічна целюлоза підвищила кількість молочнокислих бактерій. Крім того, комбінація вівсяної клітковини з мікрокристалічною целюлозою показала антиоксидантний ефект і покращила показники жорсткості та консистенції ковбас. Ці види харчових волокон мають перспективу як інгредієнти для виробництва ферментованих ковбас із зниженим вмістом жиру та солі (Guardia, Guerrero, Gelabert, Gou, & Arnau, 2006).

Роль клітковини у формуванні функціональних властивостей м'ясопродуктів. Перероблені м'ясні продукти емульсійного типу виготовляються шляхом подрібнення або нарізання м'яса в м'ясорубці після додавання солі, фосфатів і води. Цей процес активує м'язові білки шляхом руйнування сарколеми (набухання) для вивільнення міофібрилярних білків, а саме актину та міозину. Міофібрилярні білки особливо виявляють емульгуючі властивості та взаємодіють з іншими нем'ясними інгредієнтами, впливаючи на технологічні властивості системи м'ясної емуль-

сії, наприклад, здатність до утримання води, властивості утримання жиру, стабільність емульсії, реологічні параметри тощо. Сіль і фосфати додаються першими, оскільки вони розчиняють міофібрилярні білки (Pereira, & Vicente, 2013). Ця солубілізація перетворює нарізану м'ясну масу разом з усіма екстрагованими білками у в'язку масу. Це перетворення відповідає за належне емульгування жиру та зв'язування води в матриці м'ясної емульсії. На останньому етапі під час подрібнення додається жир для утворення емульсії «оля у воді». Гідрофільні групи білків орієнтовані у бік водної фази, а гідрофобні групи — у бік ліпідної фази. Після варіння в'язка маса перетворюється у форму гелю, що забезпечує текстуру та стабілізує жирно-водну структуру білкової сітки вареної м'ясної емульсії. Жири складаються переважно з тригліцеридів і є важливими інгредієнтами у виробництві традиційних м'ясних продуктів. Приблизно 20—30% жиру міститься в подрібнених м'ясних продуктах. Вміст нежирного м'яса впливає на функціональні та сенсорні властивості оброблених м'ясних продуктів. На ці властивості також впливають тип, якість, пропорція та вміст жиру. Жир також впливає на шлунково-нервовий гормональний шлях, який відповідає за сприйняття смаку та ефект змащування. Однак жир не вважається сполукою, що сприяє здоров'ю, тому зменшення жиру є однією з найважливіших проблем у м'ясній промисловості. Вміст жиру було зменшено завдяки використанню нежирного м'яса, але це змінило сенсорний профіль і підвищило вартість виробництва оброблених м'ясних продуктів. Деякі дослідники також використовували воду, але не змогли досягти бажаної якості продукту з точки зору текстури, мікробіологічного благополуччя та виходу продукту. Зрештою, деякі замітники жиру були використані замість жиру (часткового/повного) як дисперсної фази для виробництва м'ясних продуктів із низьким вмістом жиру. Хороший замітник жиру (наприклад, гідроколоїди) — це сполука або суміш сполук, які взаємодіють з білками (безперервна фаза) в'язкої м'ясної емульсії та забезпечують технологічні та функціональні властивості за відсутності (або низького/зниженого) звичайного вмісту жиру. М'язові білки утворюють тонку плівку навколо крапельок жиру під час останнього етапу утворення емульсії, і хороший замітник жиру сприяє утворенню цього тонкого шару, а також діє як емульгатор. Деякі замітники жиру покращують водоутримувальну здатність, що зумовлено буферною здатністю (зрушенням рН) сполук, що зумовлює сприятливе просторове розташування міофібрил у матриці м'ясної емульсії. Отже, ідеальний замітник жиру утворює двофазну стабільну емульсійну систему в м'ясних продуктах емульсійного типу (Rong та ін., 2019). Розробка прийнятних для споживача м'ясних продуктів з низьким вмістом жиру є проблемою, оскільки жир забезпечує бажані органолептичні характеристики та прийнятність з боку споживачів. Жир також є одним із факторів сприйняття смаку після пережовування їжі. Якщо спостерігається зменшення смаку (смаку та запаху) через зменшення будь-якого харчового інгредієнта з рецептури традиційного м'ясного продукту, у більшості випадків споживачі відмовляються від цього продукту. Це видно з ірландського національного опитування щодо харчування дорослих, у якому 41% учасників віддали перше місце «смаку» як найбільшому мотивуючому фактору при виборі їжі (Williams, 2007). Однак споживачі зараз віддають перевагу м'ясним продуктам із зазначеними інгредієнтами, тому перевагу надають продуктам із традиційним профілем сма-

ку, а також продуктам з користю для здоров'я. Загальний харчовий профіль м'ясних продуктів залежить від співвідношення n-6/n-3 жирних кислот, поліненасичених жирних кислот/мононенасичених жирних кислот (ПНЖК/МНЖК) та їх співвідношення. Це призвело до використання джерела жиру з більш здоровим профілем жирних кислот, а не тваринного жиру, для розробки оздоровчих м'ясних продуктів. Рослинні олії та риб'ячий жир досліджувалися замість тваринного жиру, і велика кількість насичених жирних кислот (НЖК) була замінена на MUFA/PUFA. Однак додавання цих олій призвело до меншої окислювальної стабільності м'ясних продуктів через наявність менш стабільних подвійних і потрійних зв'язків у MUFA/PUFA. Попереднє емульгування, інкапсуляція та використання синтетичних антиоксидантів є стратегіями подолання проблеми окислення ліпідів.

Використання синтетичних антиоксидантів, таких як бутильований гідроксилтолуол, для контролю окислення в різних м'ясних продуктах знову ставиться під сумнів багатьма дослідниками та організаціями охорони здоров'я через їхній канцерогенний ефект (Corpet, 2011). Отже, м'ясна промисловість зараз стикається з іншою проблемою пошуку природних антиоксидантів для покращення окислювальної стабільності м'ясних продуктів (Demeyer, Honikel, & De Smet, 2008). Крім того, умови пакування, пакувальні матеріали та інші вимоги до зберігання були неодноразово виступали предметами досліджень для традиційних м'ясних продуктів (Binnie, Barlow, Johnson, & Harrison, 2019). Ці вимоги до інноваційних м'ясних продуктів зі зміненою рецептурою мають бути оптимізовані, що є проблемою, яка постає на шляху успішного маркетингу таких м'ясних продуктів. Стабільність заміників жиру в білковій матриці м'ясної емульсії від виробництва до споживання також важлива, оскільки деякі сполуки виявляють властивості емульгування, модифікації текстури та покращення смаку протягом короткого періоду лише за певних пільгових умов пакування та зберігання (лабораторні дослідження). Багато дослідників намагалися розробити м'ясні продукти з низьким вмістом жиру з бажаними функціонально-технологічними, а головне, органолептичними характеристиками, використовуючи комбінацію підходів, наприклад, заміна частини тваринного жиру водою і рослинним жиром (Kumar, Kairam, Ahmad, & Yadav, 2016); поєднання води/нем'ясних білків або крохмалю чи гідроколоїдних камедей; використання рослинного або риб'ячого жиру; застосування синтетичних заміників жиру або жиरोімітаторів; використання ферментативно або хімічно оброблених дієтичних інгредієнтів (Henning, Tshalibe, & Hoffman, 2016).

Види відхилень від норми або дефектів основних функціонально-технологічних характеристик (збільшення, зниження, подібні до контрольних або еталонних) серед характеристик якості ковбасних виробів також обумовлені вибором замітника жиру. Ці замітники жиру, що являють собою в основному полісахарид або білок за своєю природою, який володіє властивостями гелеутворення та/або водопоглинання (Brewer, 2012). Деякі дослідження також проводилися з використанням побічних продуктів харчової промисловості як замітника жиру в поєднанні з рослинним або риб'ячим жиром (Cherbut, 2002). Здатність білкової матриці іммобілізувати жир, а також воду визначає втрати при варінні або вихід (приріст) при варінні емульсійних або подрібнених м'ясних продуктів. Загалом вищий вміст жиру призводить до збільшення виходу після термічної обробки. Але в нежирних м'ясних продуктах типові властивості матриці змінюються через зміни рецептур.

Отже, нем'ясні інгредієнти відіграють більшу роль у визначенні кулінарних властивостей. Зазвичай, повножирні м'ясні продукти демонструють вищий вміст води або активність води, що може бути пов'язано з тим, що частинки тваринного жиру можуть діяти як бар'єр для води та утримуються в білковій матриці ефективніше, ніж нежирні м'ясні компоненти рецептури (Ali, Alam, & Ali, 2019). У багатьох дослідженнях була помічена нижча стабільність емульсії в нежирних м'ясних продуктах, що може статися через зниження емульгуючої здатності. Це також може бути пов'язане зі здатністю жиру стабілізувати м'ясну емульсію, діючи як спейсер у білковій матриці м'яса. Вищу водоутримувальну здатність або водопоглинальну здатність продемонстрували деякі інгредієнти, наприклад, крохмаль маніюки, каппа-карагенан, желатин/карагенан, борошно з голубого гороху/крохмаль із кукурудзяного борошна, гідролізований колаген, гідролізований колаген/модифікований крохмаль/гуарова камедь в різних м'ясних продуктах; і додавання цих нем'ясних інгредієнтів призвело до більшої ефективності приготування (меншої втрати рідини). Додавання різноманітних білків (соя, канола, порошок сурімі, сир, сироватка, концентрат молочного білка, концентрат сироваткового білка та сухий яєчний білок тощо) покращило водозв'язувальну здатність (Alves та ін., 2016). Вищий рівень утримання води може бути пов'язаний зі здатністю цих нем'ясних інгредієнтів взаємодіяти з полярними групами матричних білків, а також, ймовірно, через утворення водневих зв'язків із вільною водою. Було показано, що деякі нем'ясні інгредієнти (наприклад, інулін) мають більшу здатність утримувати жир, ніж здатність утримувати воду. З іншого боку, збільшення білка плазми великої рогатої худоби (отриманого шляхом ультрафільтрації та ліофільної сушки висушеної розпиленням плазми крові великої рогатої худоби) у рецептурі призвело до вищого рівня утримання води, ніж рівня утримання жиру. Збільшення вмісту білка (2,5% проти 3,0% білка плазми) у складі може сформувати більш щільну високоагреговану білкову матрицю під час приготування, що може чинити тиск на жирові кульки. Тож ці жирові кульки об'єднуються і видавлюються з матриці.

Дослідження, проведене в Кампінаському університеті, було спрямоване на оцінку впливу двох концентрацій бамбукового волокна на технологічні властивості емульгованих ковбас, виготовлених без додавання солі та триполіфосфату натрію (Aminzare, Hashemi, Afshari, Noori, & Rezaeigolestani, 2024). Виявилось, що додавання бамбукового волокна не вплинуло на рівень pH і активність води, але змінило колірні показники: ковбаси з бамбуковим волокном мали світліший відтінок порівняно з контрольними зразками. Підвищення вмісту бамбукового волокна сприяло покращенню стабільності емульсії ковбас. Зразки з додаванням клітковини були значно твердішими за контрольні. Мікроструктура зразків із бамбуковим волокном була більш компактною, а ковбаси з 5,0% волокна мали щільнішу структуру, ніж ті, що містили 2,5%. Це дослідження показало, що бамбукове волокно може стати перспективним функціональним інгредієнтом для виробництва варених ковбас, що сприятиме створенню оздоровчих або функціональних продуктів.

Висновки

На основі наведених даних можна зробити висновок, що термічна стабільність м'ясних емульсій і варених ковбасних виробів із використанням комбінованих харчових волокон (вівсяних і картопляних) залишається недостатньо дослідженою

темою. Це перспективний напрямок, який потребує подальшого вивчення, враховуючи високі функціональні властивості волокон і їхній потенціал для покращення характеристик як емульсій, так і готових м'ясних продуктів.

Також перспективним і малодослідженим напрямком є використання харчових волокон бамбука у технології емульгованих ковбасних виробів. Цей вид сировини широко вивчених через застосування у інших видах промисловості (будівництві, виробництві композитів), проте його властивості та здатність впливати на технологічні характеристики ковбасних виробів залишається малодослідженою сферою застосування, попри те, що чітко встановлено здатність клітковини бамбука імітувати жир у таких продуктах, як шоколад і печиво. Для встановлення впливу клітковини бамбука на емульгованні ковбасні вироби доцільно дослідити функціонально-технологічні властивості білково-жирових емульсій з використанням цього інгредієнта.

Література

Страшинський, І. М., Маринін, А. І., Ришканич, Р. О. (2020). *Харчові волокна як оздоровчий компонент у складі м'ясних продуктів*. 18th International Scientific and Practical Conference "Modern Science, Practice, Society", Boston, USA. 446—448.

Alves, C. A., Bellucci, E. R. B., Santos, J. M. D., Bertuci, M. L., Barretto, A. C. D. S. (2022). L-lysine and dietary fiber improve the physicochemical properties of sausage without added phosphate and reduced salt levels. *Scientia Agricola*, 80, e20220026.

Alves, L. A. A. S., Lorenzo, J. M., Gonçalves, C. A. A., Santos, B. A., Heck, R. T., Cichoski, A. J., Campagnol, P. C. B. (2016). Production of healthier bologna type sausages using pork skin and green banana flour as a fat replacers. *Meat Science*, 121, 73—78. DOI: 10.1016/j.meatsci.2016.06.001.

Aminzare, M., Hashemi, M., Afshari, A., Noori, S. M. A., Rezaeigolestani, M. (2024). Development of functional sausages: a comparative study of the impact of four dietary fibers on the physicochemical properties of mortadella sausages. *Journal of Human Environment and Health Promotion*, 10(2), 83—88.

Binnie, M. A., Barlow, K., Johnson, V., Harrison, C. (2014). Red meats: time for a paradigm shift in dietary advice. *Meat Science*, 98, 445—451. DOI: 10.1016/j.meatsci.2014.06.024.

Brewer, M. S. (2012). Reducing the fat content in ground beef without sacrificing quality: a review. *Meat Science*, 91, 385—395. DOI: 10.1016/j.meatsci.2012.02.024.

Cherbut, C. (2002). Inulin and oligofructose in the dietary fibre concept. *British Journal of Nutrition*, 87, 159—162. DOI: 10.1079/BJNBJN2002532.

Clark, R. L., Johnson, S. K. (2002). Sensory acceptability of foods with added lupin (*Lupinus angustifolius*) kernel fiber using pre-set criteria. *Journal of Food Science*, 67, 356—362. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2002.tb11410.x.

Corpet, D. E. (2011). Red meat and colon cancer: should we become vegetarians, or can we make meat safer? *Meat Science*, 89, 310—316. DOI: 10.1016/j.meatsci.2011.04.009.

Devereux, H. M., Jones, G. P., McCormack, L., Hunter, W. C. (2003). Consumer acceptability of low fat foods containing inulin and oligofructose. *Journal of Food Science*, 68, 1850—1854.

Demeyer, D., Honikel, K., De Smet, S. (2008). The world cancer research fund report 2007: a challenge for the meat processing industry. *Meat Science*, 80, 953—959. DOI: 10.1016/j.meatsci.2008.06.003.

Di Lorenzo, C., Williams, C. M., Hajina, F., Valenzuela, J. E. (1988). Pectin delay gastric emptying and increase satiety in obese subjects. *Gastroenterology*, 95, 1211—1215. DOI: 10.1016/0016-5085(88)90352-6.

Dos Santos, J. M., Ignácio, E. O., Bis-Souza, C. V., da Silva-Barretto, A. C. (2021). Performance of reduced fat-reduced salt fermented sausage with added microcrystalline cellulose, resistant starch

and oat fiber using the simplex design. *Meat Science*, 175, 108433. DOI: 10.1016/j.meatsci.2021.108433.

Drewnowski, A. (1998). Energy density, palatability, and satiety: implications for weight control. *Nutrition Reviews*, 56, 347—353. DOI: 10.1111/j.1753-4887.1998.tb01677.x.

EFSA panel on dietetic products, nutrition and allergies (NDA). (2010). Scientific Opinion on the substantiation of health claims related to dietary fibre (ID 744, 745, 746, 748, 749, 753, 803, 810, 855, 1415, 1416, 4308, 4330) pursuant to Article 13 (1) of Regulation (EC) No 1924/2006. *EFSA Journal*, 8(10), 1735.

Evans, A. J., Cheung, P. C. K. (1993). The carbohydrate composition of cotyledons and hulls of cultivars of *Lupinus angustifolius* from Western Australia. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 61, 189—194.

Felisberto, M. H. F., Miyake, P. S. E., Ferreira, A. R., de Menezes Alves Moro, T., Neves, E. C. A., Clerici, M. T. P. S. (2021). Bamboo fiber as a substitute for fat and/or sugar in cookies. In: Ahmad, Z., Ding, Y., Shahzad, A. (eds) *Biotechnological Advances in Bamboo: The "Green Gold" on the Earth*, 447—461. DOI: 10.1007/978-981-16-1310-4_19.

Fernández-López, J., Sendra-Nadal, E., Navarro, C., Sayas, E., Viuda-Martos, M., Alvarez, J. A. P. (2009). Storage stability of a high dietary fibre powder from orange by-products. *International journal of food science & technology*, 44(4), 748—756. DOI:10.1111/j.1365-2621.2008.01892.x.

Figuerola, F., Hurtado, M. L., Estévez, A. M., Chiffelle, I., Asenjo, F. (2005). Fibre concentrates from apple pomace and citrus peel as potential fibre sources for food enrichment. *Food Chemistry*, 91(3), 395—401. DOI: 10.1016/j.foodchem.2004.04.036.

Font-i-Furnols, M., Guerrero, L. (2014). Consumer preference, behavior and perception about meat and meat products: an overview. *Meat Science*, 98, 361—371. DOI: 10.1016/j.meatsci.2014.06.025.

French, S. J., Read, N. W. (1994). Effect of guar gum on hunger and satiety after meals of differing fat content: relationship with gastric emptying. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 59, 87—91. DOI: 10.1093/ajcn/59.1.87.

Guo, Y., Byambasuren, K., Liu, X., Wang, X., Qiu, S., Gao, Y., Wang, Z. (2021). Extraction, purification, and characterization of insoluble dietary fiber from oat bran. *Transactions of Tianjin University*, 27, 385—393.

Guàrdia, M. D., Guerrero, L., Gelabert, J., Gou, P., Arnau, J. (2006). Consumer Attitude Towards Sodium Reduction in Meat Products and Acceptability of Fermented Sausages with Reduced Sodium Content. *Meat Science*, 73, 484—490. DOI: 10.1016/j.meatsci.2006.01.009.

Henning, S. S. C., Tshalibe, P., Hoffman, L. C. (2016). Physico-chemical properties of reduced-fat beef species sausage with pork back fat replaced by pineapple dietary fibres and water. *LWT*, 74, 92—98. DOI: 10.1016/j.lwt.2016.07.007.

Henchion, M., McCarthy, M., Resconi, V. C., Troy, D. (2014). Meat Consumption: Trends and Quality Matters. *Meat Science*, 98, 561—568. DOI: 10.1016/j.meatsci.2014.06.007.

Hu, G.; Yu, W. (2015). Effect of hemicellulose from rice bran on low fat meatballs chemical and functional properties. *Food Chemistry*, 186, 239—243. DOI: 10.1016/j.foodchem.2014.07.063.

Liu, D., Song, J., Anderson, D. P., Chang, P. R., Hua, Y. (2012). Bamboo fiber and its reinforced composites: structure and properties. *Cellulose*, 19(5), 1449—1480. DOI: 10.1007/s10570-012-9741-1.

Khoshkish, M., Gharachorlo, M., Yeganehzad, S. (2022). Using of bamboo fiber as a fat substitute in breakfast chocolate (chocolate cream) and the study of its sensory, tissue, and physicochemical characteristics. *Food Engineering Research*, 20(2), 151—166. DOI: 10.22092/fooder.2021.351382.1281.

Kumar, Y., Kairam, N., Ahmad, T., Yadav, D. N. (2016). Physico chemical, microstructural and sensory characteristics of low-fat meat emulsion containing aloe gel as potential fat replacer. *International Journal of Food Science & Technology*, 51, 309—316. DOI: 10.1111/ijfs.2016.51.issue-2.

Kurt, Ş., Ceylan, H. G. (2020). The effects of plant fibers on improving the properties of meat emulsion. *Journal of the Hellenic Veterinary Medical Society*, 71(2), 2219-2226. DOI: 10.12681/jhvms.24168.

Rong, L., Lin, Y., He, Q., Zhang, M., Liu, D., Li, R. (2019). Effect of dietary fiber mixture on eating quality of low-salt sausage. *Meat Research*, 33(7), 30—35. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20190505-098.

- Larrauri, J. A. (1999). New approaches in the preparation of high dietary fibre powders from fruit by-products. *Trends in Food Science & Technology*, 10(1), 3—8. DOI:10.1016/S0924-2244(99)00016-3.
- Magalhães, I. M. C., Paglarini, C. D. S., Vidal, V. A. S., Pollonio, M. A. R. (2020). Bamboo fiber improves the functional properties of reduced salt and phosphate-free Bologna sausage. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(12), e14929. DOI: 10.1111/jfpp.14929.
- Pereira, P. M. C. C., Vicente, A. F. R. B. (2013). Meat nutritional composition and nutritive role in the human diet. *Meat Science*, 93, 586—592. DOI: 10.1016/j.meatsci.2012.09.018.
- Pinton, M. B., Lorenzo, J. M., Dos Santos, B. A., Correa, L. P., Padilha, M., Trindade, P. C. O., Cichoski, A. J., Bermúdez, R., Purriños, L., Campagnol, P. C. B. (2024). Evaluation of nutritional, technological, oxidative, and sensory properties of low-sodium and phosphate-free mortadellas produced with bamboo fiber, pea protein, and mushroom powder. *Meat Science*, 216, 109588. DOI: 10.1016/j.meatsci.2024.109588.
- Pinton, M. B., Lorenzo, J. M., Seibt, A. C. M. D., Dos Santos, B. A., da Rosa, J. L., Correa, L. P., Cichoski, A. J., Campagnol, P. C. B. (2022). Effect of high-power ultrasound and bamboo fiber on the technological and oxidative properties of phosphate-free meat emulsions. *Meat Science*, 193, 108931. DOI: 10.1016/j.meatsci.2022.108931.
- Tanes, C., Bittinger, K., Gao, Y., Friedman, E. S., Nessel, L., Paladhi, U. R., Chau, L., Panfen, E., Fischbach, M. A., Braun, J., Xavier, R. J., Clish, C. B., Li, H., Bushman, F. D., Lewis, J. D., Wu, G. D. (2021). Role of dietary fiber in the recovery of the human gut microbiome and its metabolome. *Cell Host & Microbe*, 29(3), 394—407. DOI: 10.1016/j.chom.2020.12.012.
- Verbeke, W. (2006). Functional Foods: Consumer Willingness to Compromise on Taste for Health? *Food Quality and Preference*, 17, 126—131. DOI: 10.1016/j.foodqual.2005.03.003.
- Williams, P. (2007). Nutritional composition of red meat. *Nutrition & Dietetics*, 64, 113—119. DOI: 10.1111/ndi.2007.64.issue-s4.
- WHO (2009). Preventing chronic diseases: a vital investment. Geneva, Switzerland.

RELEVANCE OF DETERMINING ACRYLAMIDE IN FOOD PRODUCTS AND DRINKING WATER

N. Stadnichuk, N. Levytska, A. Demich

L. I. Medved's research center of preventive toxicology, food and chemical safety, ministry of health

O. Kronikovskiy

National University of Food Technologies

Key words:

*Acrylamide
Drinking water
Foodstuffs
Research method*

Article history:

Received 03.07.2024
Received in revised form
17.07.2024
Accepted 02.08.2024

Corresponding author:

O. Kronikovskii

E-mail:

oleg.kronikovskiy@gmail.com

Citation: Стаднічук Н. О., Левицька Н. П., Деміч А. А., Кроніковський О. І. (2024). Актуальність визначення акриламіду в харчових продуктах і питній воді. *Наукові праці НУХТ*, 30(4), 207—215.

DOI: 10.24263/2225-2924-2024-30-4-17

ABSTRACT

The development of new research methods enables the monitoring of substances impact on the overall burden on the human body. The issue of acrylamide exposure is linked to regulatory requirements for its presence in water and food products. Modern instrumentation allows to control acrylamide content in food products and drinking water using various analytical methods, notably high-performance liquid chromatography (HPLC).

The monitoring of acrylamide levels in food products is conducted based on the European Commission Regulation (EU) 2017/2158 of 20 November 2017, which establishes mitigation measures and benchmark levels to reduce the presence of acrylamide in food products. The European Food Safety Authority (EFSA) in 2015 issued an opinion emphasizing the need to control acrylamide levels in food products. Given that acrylamide is present in many food products consumed daily, this concern affects all consumers.

Requirements for acrylamide content in drinking water are regulated considering its use in the synthesis of polyacrylamide, which is employed as a flocculant. These requirements were put forward both in the Council Directive 98/83/EC of 3 November 1998 on the quality of water intended for human consumption, and in the Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption.

An analysis of conducted studies regarding the acrylamide content in drinking water and food products showed that the issue of its negative impact exists and requires monitoring.

АКТУАЛЬНІСТЬ ВИЗНАЧЕННЯ АКРИЛАМІДУ В ХАРЧОВИХ ПРОДУКТАХ І ПИТНІЙ ВОДІ

Н. О. Стаднічук, Н. П. Левицька, А. А. Деміч

ДП «Науковий центр превентивної токсикології, харчової та хімічної безпеки імені академіка Л. І. Медведя Міністерства охорони здоров'я України»

О. І. Кроніковський

Національний університет харчових технологій

Розробка нових методів досліджень дає змогу контролювати вплив речовин на загальне навантаження організму людини. Питання дії акриламід у пов'язано з регламентацією вимог до нього у воді та харчових продуктах. Наявність сучасних приладів забезпечує контроль вмісту акриламід у харчових продуктах і питній воді за допомогою різних методів дослідження, зокрема високоефективної рідинної хроматографії.

Контроль вмісту акриламід у харчових продуктах здійснюється на підставі Регламенту Комісії (ЄС) 2017/2158 від 20 листопада 2017 року щодо встановлення пом'якшувальних заходів і контрольних рівнів для зменшення вмісту акриламід у харчових продуктах. Європейське агентство з безпеки харчових продуктів (EFSA) у 2015 році ухвалило висновок щодо необхідності контролю вмісту акриламід у харчових продуктах. Оскільки акриламід міститься в багатьох харчових продуктах, які споживаються щодня, це занепокоєння стосується всіх споживачів.

Вимоги до вмісту акриламід у питній воді регламентуються з урахуванням використання для синтезу поліакриламід, що застосовується як флокулянти. Ці вимоги висувались як і в Директиві Ради 98/83/ЄС від 3 листопада 1998 року про якість води, призначеної для споживання людиною, так і в Директиві (ЄС) 2020/2184 Європейського парламенту та Ради від 16 грудня 2020 року про якість води, призначеної для споживання людиною.

Аналіз проведених досліджень щодо вмісту акриламід у воді питній і харчових продуктах показав, що проблема негативного впливу існує і потребує контролю.

Ключові слова: акриламід, питна вода, харчові продукти, метод досліджень.

Постановка проблеми. Проблема негативного впливу забруднення навколишнього середовища на здоров'я людини стає все більш актуальною. Водночас успіхи науки безперечно підтверджують реальну можливість здійснювати контроль і регулювати вміст таких шкідливих речовин, а також доводити їх концентрацію в навколишньому середовищі до безпечних меж. Можливість розробки нових методів досліджень дає змогу контролювати вплив цих речовин на загальне навантаження організму людини. Публікації з цієї проблематики з'являються все частіше у вітчизняних і зарубіжних виданнях (Шульга, & Шульга, 2024). Однією з таких шкідливих речовин є акриламід (Сирохман, 2019). Питання визначення акриламід пов'язано насамперед з регламентацією вимог до його вмісту у воді та харчових продуктах (Міністерство юстиції України, 2023).

Наявність сучасних приладів дає змогу контролювати вміст акриламід у харчових продуктах і питній воді за допомогою ряду методів дослідження, зокрема високоефективної рідинної хроматографії.

Вимоги до вмісту акриламід у харчових продуктах контролюються на підставі Регламенту Комісії (ЄС) 2017/2158 від 20 листопада 2017 року щодо встановлення пом'якшувальних заходів і контрольних рівнів для зменшення вмісту акриламід у харчових продуктах, тому при експорті харчової продукції в країни Європейського Співтовариства постає проблема визначення вмісту акриламід.

У країнах ЄС вимоги до вмісту акриламід у питній воді регламентуються згідно з Директивою Ради 98/83/ЄС від 3 листопада 1998 року про якість води, призначеної для споживання людиною, Директивою (ЄС) 2020/2184 Європейського парламенту та Ради від 16 грудня 2020 року про якість води, призначеної для споживання людиною та встановлені на рівні 0,10 мкг/л. Параметричне значення 0,10 мкг/л відноситься до залишкової концентрації мономеру у воді, яке розраховане відповідно до специфікацій максимального вивільнення з відповідного полімеру при контакті з водою питною (Річний звіт RASFF, 2020).

Чинний в Україні ДСанПіН 2.2.4-171-10 «Державні санітарні норми та правила. Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» регламентує вимоги до поліакриламід залишкового (речовина II класу небезпеки), значення якого визначається на рівні $\leq 2,0$ мг/л. Згідно з приміткою, визначення поліакриламід у воді питній проводиться в разі використання в процесі водопідготовки водопровідної питної води з поверхневого джерела питного водопостачання, а також у питній воді фасованій, що отримується шляхом обробки води з водопровідної мережі, води з пунктів розливу та бюветів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основна частина акриламід використовується для синтезу поліакриламід та деяких кополімерів, що застосовуються як флокулянти, отверджувачі та матеріали покриття (Anese, Quarta, & Peloux, 2011), тому в країнах ЄС регламентуються вимоги до вмісту акриламід у питній воді (Кваша, Вакуленко, 2023). Причому ці вимоги висувались як згідно Директиви Ради 98/83/ЄС від 3 листопада 1998 року про якість води, призначеної для споживання людиною, так і в Директиві (ЄС) 2020/2184 Європейського парламенту та Ради від 16 грудня 2020 року про якість води, призначеної для споживання людиною.

Для прикладу, у Британії прийнятий стандарт «BS EN 1410:2008. Хімічні речовини, які використовуються для очищення води, призначеної для споживання людиною — Катіонні поліакриламід». Цей британський стандарт є впровадженням EN 1410:2008 у Великій Британії, в якому передбачено зниження граничного значення для акриламід з 250 мг/кг до 200 мг/кг: «пункт 4.4. Хімічні параметри: продукт повинен містити не більше 200 мг мономеру акриламід на кілограм продукту». Параметричне значення стосується залишкової мономерної концентрації у воді, що обчислюється відповідно до опису максимального викиду з відповідного полімеру при контакті з водою (Salazar, Arambula-Villa, Vazquez-Landaverde, Hidalgo, & Zamora, 2012).

Одне з перших повідомлень про вміст акриламід (2-пропенамід, $\text{CH}_2\text{CHCONH}_2$) у смажених і печених продуктах харчування було опубліковано 2002 року дослідниками з університету Стокгольма та Шведської національної адміністрації з

харчових продуктів (NFA) Дослідження шведських вчених привернули увагу всього світу, оскільки акриламід був позначений як можливий людський канцероген Міжнародним агентством по вивченню раку (IARC Monographson the Evaluation of Carcinogen Risks to Humans, 1994).

Європейське агентство з безпеки харчових продуктів (EFSA) у 2015 році ухвалило висновок щодо необхідності контролю вмісту акриламід у харчових продуктах. Дані були отримані на основі досліджень на тваринах і підтверджені попередньою оцінкою того, що акриламід у харчових продуктах потенційно підвищує ризик розвитку раку у споживачів усіх вікових груп. Оскільки акриламід міститься в багатьох харчових продуктах, які споживаються щодня, це занепокоєння стосується всіх споживачів, але найважливішою віковою групою ризику є діти через свою масу тіла (Islroglu, Kemerli, Sakin-Yilmazer, Guven, & Ozdestan, 2012).

Заходи визначені Регламентом Комісії (ЄС) 2017/2158 від 20 листопада 2017 року щодо встановлення пом'якшувальних заходів та контрольних рівнів для зменшення вмісту акриламід у харчових продуктах базуються на сучасних наукових і технічних знаннях і, як було доведено, призводять до зниження рівнів акриламід без шкоди для якості та мікробіологічної безпеки продукту. Ці заходи пом'якшення наслідків були розроблені після широких консультацій та обговорення з операторами ринку харчових продуктів, споживачами й експертами компетентних органів держав-членів. Заходи пом'якшення наслідків передбачають використання харчових добавок та інших речовин, які застосовуються відповідно до чинного законодавства країн-виробників.

Показники ефективності — референтні рівні, які базуються на досвіді та наявності в широких категоріях харчових продуктів, і які слід використовувати для підтвердження ефективності заходів пом'якшення. Референтні значення аналізів або нормативні значення є тими межами, в яких результати досліджень вважаються нормою для здорової людини (Mulla, Bharadwaj, Annapure, & Singhal, 2011). Вони можуть виражатися або конкретним діапазоном числових параметрів, в які повинен потрапити результат, або мати відповідь «позитивно» або «негативно». Референтні рівні слід визначати з урахуванням найновіших даних про випадки з бази даних EFSA, яка припускає, що в широкій категорії харчових продуктів рівень акриламід у 10—15% продукції з найвищими рівнями, зазвичай, можна знизити за допомогою впровадження належної лабораторної практики. Визнається, що в деяких випадках зазначені категорії харчових продуктів мають специфічні виробничі, географічні чи сезонні умови. Характеристики продукту можуть існувати для конкретних харчових продуктів у цих категоріях, які перешкоджають досягненню контрольних рівнів, незважаючи на застосування всіх заходів пом'якшення (Рекомендація Комісії від 8 листопада 2013 року щодо розслідування рівнів акриламід у продуктах харчування).

Оператори ринку харчових продуктів, що виробляють продукцію, на яку поширюється Регламент Комісії (ЄС) 2017/2158, тобто здійснення експорту продукції в країни ЄС, повинні застосовувати додаткові заходи пом'якшення, які є можливими на більших підприємствах, оскільки ці заходи ще більше зменшують присутність акриламід у продукті харчування (Bent, Maragh, & Dasgupta, 2012). Нещодавно опублікували європейський «Інструментарій з акриламід у продуктах

та напоях, в якому представлено низку заходів щодо зниження рівня акриламідy. Зниження рівня акриламідy можна досягти за допомогою, наприклад, ферментного препарату аспарагінази. Перетворюючи аспарагін на аспарагінову кислоту, аспарагіназа забезпечує зниження вмісту акриламідy до 95% у широкому асортименті продуктів без необхідності внесення змін до рецептури (Palermo, Fiore, & Fogliano, 2012).

«Референтні рівні», зазначені в Додатку IV Регламенту Комісії (ЄС) 2017/2158 від 20.11.2017, використовуються для підтвердження ефективності заходів пом'якшення наслідків і ґрунтуються на досвіді та їх наявності в широких категоріях харчових продуктів акриламідy. Нормативи референтних рівнів для харчових продуктів наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Нормативи референтних рівнів для харчових продуктів

Контрольні рівні вмісту акриламідy в харчових продуктах	Еталонний рівень, мкг/кг
Картопляні чипси зі свіжої картоплі та з картопляного тіста, солоне печиво на основі картоплі. Інші картопляні вироби з картопляного тіста	750
Хліб а) пшеничний	50
б) крім пшеничного	100
Печиво і вафельні коржі	350
Солоні крекери, за винятком солоних крекерів на основі картоплі	400

Мета статті полягає в аналізі результатів проведених досліджень з визначення акриламідy в харчових продуктах і питній воді згідно з вимогами вітчизняних та міжнародних законодавчих актів.

Матеріали і методи. При проведенні досліджень з визначення вмісту акриламідy в харчових продуктах і питній воді використовували метод: МІ.С3.7.2.01-119 «Визначення акриламідy у харчових продуктах, каві, кавових продуктах та питній воді», для цього застосовували рідинний хроматограф Shimadzu LC-30A. Метод розроблений у Дослідницько-випробувальному токсикологічному центрі ДП «Науковий центр превентивної токсикології, харчової та хімічної безпеки імені академіка Л. І. Медведя Міністерства охорони здоров'я України». Дослідження води питної проводили без попередньої пробопідготовки. Для визначення акриламідy в харчових продуктах при пробопідготовці використовували рідкий азот.

Метод МІ.С3.7.2.01-119 «Визначення акриламідy в харчових продуктах, каві, кавових продуктах та питній воді» входить у сферу акредитації ДВТЦ: атестат про акредитацію № 20375 від 22.03.2023 відповідно до вимог ДСТУ ISO/IEC 17025:2019 (EN ISO/IEC 17025:2017, IDT; ISO/IEC 17025:2017, IDT).

Викладення основних результатів дослідження. Акриламід — це органічна сполука, амід акрилової кислоти складу $\text{CH}_2\text{CHCONH}_2$; молярна маса — 71,078 г/моль; номер CAS 79-06-1. Температура плавлення становить 84,5 °С, температура кипіння — 192,6 °С. Легко розчиняється у воді, спирті, ефірі. При нагріванні полімеризується. При додаванні киплячих кислот або лугів утворює

акрилову кислоту. Акриламід є двофункціональною сполукою, оскільки має подвійний зв'язок та амідну групу. Він одночасно проявляє слабкі кислотні та основні властивості. За подвійним зв'язком можливе приєднання багатьох нуклеофілів: аміаку, амінів, фосфінів, в лужному середовищі приєднуються також меркаптани, тіоестери, кетони, нітроалкани та спирти (Moscicki, 2011).

Акриламід утворюється під час термічної обробки при температурі, як правило, вище 120 °C і низькій вологості повітря. В основному він утворюється в запечених або смажених, багатих вуглеводами продуктах, таких як крупи, картопля та кавові зерна. Акриламід також може утворюватися з природних компонентів аспарагіну та цукрів у певних харчових продуктах, що є небезпечним при їх використанні.

Рівень акриламіду в харчових продуктах можна знизити за допомогою підходу до пом'якшення, наприклад, застосування належної гігієнічної практики та процедур, заснованих на принципах аналізу небезпек і критичних контрольних точок (НАССР).

Контроль вмісту акриламіду у воді питній і харчових продуктах здійснюється з використанням МІ.С3.7.2.01-119 «Визначення акриламіду в харчових продуктах, каві, кавових продуктах та питній воді».

У процесі роботи досліджували зразки води різного походження (артезіанська вода та вода централізованих джерел водопостачання).

Таблиця 2. Вміст акриламіду у воді питній

Назва показника	Одиниці вимірювання	Заявлені вимоги	Позначення методу випробування	Результат випробування	Невизначеність вимірювання U (k=2, P=0,95)	Відповідність заявленим вимогам
Акриламід	мкг/л	не більше 0,1	МІ.С3.7.2.01-119	<0,05	—	відповідає

У жодному з досліджених зразках води питної перевищення нормативу акриламіду не було виявлено. Отримані результати були нижчими за межу визначення (<0,05 мкг/л), що не перевищувало вимог 0,10 мкг/л відповідно до Директиви Ради 98/83/ЄС від 3 листопада 1998 року про якість води, призначеної для споживання людиною, та Директиви (ЄС) 2020/2184 Європейського парламенту та Ради від 16 грудня 2020 року про якість води, призначеної для споживання людиною.

Результати дослідження вмісту акриламіду в харчових продуктах наводимо нижче.

Таблиця 3. Вміст акриламіду в харчових продуктах

Назва показника	Одиниця вимірювання	Позначення методу випробувань	Результат випробування	Невизначеність вимірювання U (k=2, P=0,95)
Чипси картопляні зі смаком «Бекон» (температура смаження +150 °C)				
Акриламід	мкг/кг	МІ.С3.7.2.01-019	516,7	±87,8

Чипси картопляні зі смаком «Бекон» (температура смаження +155 °С)				
Акриламід	мкг/кг	МІ.С3.7.2.01-019	524,9±	89,2
Чипси картопляні зі смаком «Бекон» (температура смаження 160 °С)				
Акриламід	мкг/кг	МІ.С3.7.2.01-019	796,0	±135,3
Чипси картопляні зі смаком «Сметана та цибуля» (температура смаження +173 °С)				
Акриламід	мкг/кг	МІ.С3.7.2.01-019	950,4	±161,5
Чипси картопляні зі смаком «Сметана та цибуля» (температура смаження +150 °С)				
Акриламід	мкг/кг	МІ.С3.7.2.01-019	582,8	±98,9
Грінки житньо-пшеничні зі смаком часнику				
Акриламід	мкг/кг	МІ.С3.7.2.01-019	22,6	±3,8
Грінки хвилясті житньо-пшеничні				
Акриламід	мкг/кг	МІ.С3.7.2.01-019	84,9	±14,4
Сухарики пшеничні зі смаком вершки та цибулька				
Акриламід	мкг/кг	МІ.С3.7.2.01-019	30,7	±5,2
Печиво вівсяне «Класичне», виготовлене згідно з ДСТУ 3781:2014 «Печиво. Загальні технічні умови»				
Акриламід	мкг/кг	МІ.С3.7.2.01-019	53,2	±9,0
Печиво вівсяне «Класичне», виготовлене згідно з ДСТУ 3781:2014 «Печиво. Загальні технічні умови»				
Акриламід	мкг/кг	МІ.С3.7.2.01-019	48,9	±8,3
Печиво вівсяне «Елітне», виготовлене згідно з ДСТУ 3781:2014 «Печиво. Загальні технічні умови»				
Акриламід	мкг/кг	МІ.С3.7.2.01-019	61,4	±10,4
Печиво вівсяне «Елітне», виготовлене згідно з ДСТУ 3781:2014 «Печиво. Загальні технічні умови»				
Акриламід	мкг/кг	МІ.С3.7.2.01-019	39,4	±6,7
Печиво вівсяне «Елітне», виготовлене згідно з ДСТУ 3781:2014 «Печиво. Загальні технічні умови»				
Акриламід	мкг/кг	МІ.С3.7.2.01-019	465,8	±7,2

Результати досліджень харчових продуктів, наведені в табл. 3, свідчать про перевищення контрольних рівнів присутності акриламід у деяких харчових продуктах відповідно до вимог Регламенту Комісії (ЄС) 2017/2158 від 20.11.2017. Це стосується насамперед чипсів картопляних зі смаком «Бекон» та чипсів картопляних зі смаком «Сметана та цибуля». Дані зразки чипсів відрізнялись температурою смаження від інших проаналізованих зразків чипсів. Перевищення також зафіксовано для зразка печива вівсяного «Елітне».

Основною речовиною для виготовлення картопляних чипсів є свіжа картопля. При використанні картоплі, що використовується для переробки на картопляні чипси, сировина повинна мати комплекс показників, що сприяють здійсненню технологічних операцій і одночасно отриманню продукту високої якості. Один з основних показників, що регламентується, це кількість редукуючих цукрів, які впливають на вміст акриламід у готовому продукті. Це пов'язано з тим, що при смаженні картоплі при високій температурі 170—180 °С редукуючі цукри вступають в реакцію з амінокислотами з утворенням меланоїдинів і канцерогенних речовин — відбувається так звана реакція Маяра (Salazar, Arambula-Villa, Hidalgo, Vazquez-Landaverde, & Zamora, 2012).

Існують літературні дані, згідно з якими вміст редукуючих цукрів у картоплі всіх сортів при їх закладанні на зберігання був незначним (0,07—0,09%), порівняно з допустимою максимальною кількістю редукуючих цукрів 0,2—0,4%. З надмірною кількістю редукуючих цукрів збільшується вміст меланоїдинів, що надає чипсам гіркуватого присмаку та непривабливого вигляду. Кількість редукуючих цукрів у картоплі в процесі зберігання коливалася залежно від сорту поступово збільшувалася під час зберігання до березня, а починаючи з весняного періоду відбувається незначне зменшення цукрів, що пов'язано з їх ресинтезом (Коваленко, Ковбаса, & Нагорний, 2016).

Висновки

Вимоги до вмісту акриламід у харчових продуктах контролюються на підставі Регламенту Комісії (ЄС) 2017/2158 від 20 листопада 2017 року щодо встановлення пом'якшувальних заходів і контрольних рівнів для зменшення вмісту акриламід у харчових продуктах. У країнах ЄС вимоги до вмісту акриламід у питній воді регламентуються згідно з Директивою Ради 98/83/ЄС від 3 листопада 1998 року про якість води, призначеної для споживання людиною, Директивою (ЄС) 2020/2184 Європейського парламенту та Ради від 16 грудня 2020 року про якість води, призначеної для споживання людиною.

Наявність сучасних приладів дає змогу контролювати вміст акриламід у харчових продуктах і питній воді за допомогою методів дослідження, зокрема високоефективної рідинної хроматографії.

Аналіз проведених досліджень щодо вмісту акриламід у воді питній та харчових продуктах показав, що проблема негативного впливу існує і потребує контролю.

Література

Безпека та якість харчових продуктів. *Міністерство юстиції України*, 2023. Взято з https://msnjust.gov.ua/m/str_45835.

Європейська комісія. Річний звіт RASFF 2020. *Офіс публікацій*, 2021. Взято з https://ec.europa.eu/food/safety/rasff-food-and-feed-safety-alerts_en.

Кваша, С., Вакуленко, В. (2023). Теоретичні основи продовольчої безпеки в умовах сьогодення. *Вісник Херсонського національного технічного університету*, 4(87), 419—428. DOI: <https://doi.org/10/35546/kntu2078-4481.2023.4.55>.

Коваленко, О., Ковбаса, В., Нагорний, В. (2016). Дослідження вмісту акриламід у картопляних чипсах. *Продовольча індустрія АПК*, 4, 14—17. <https://dSPACE.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/1d87faf7-b157-473a-864d-23e617d1e495/content>.

Сирохман, І. (2019). Сучасна оцінка безпечності та якості харчових продуктів за вмістом акриламідy. *Вісник ЛТЕУ. Технічні науки*, 22, 24—28. DOI: <https://doi.org/10.36477/2522-1221-2019-22-04>.

Шульга, О. С., Шульга, С. І. (2024). Зміни в харчовому законодавстві України за 2023 рік. *Наукові праці НУХТ*, 30(2), 31—43. DOI: 10.24263/2225-2924-2024-30-2-3.

Anese, M., Quarta, B., Peloux, L. (2011). Effect of formulation on the capacity of l-asparaginase to minimize acrylamide formation in short dough biscuits. *Food Res. Int.*, 44(9), 2837—2842.

Bent, G-A., Maragh, P., Dasgupta, T. (2012). Akrylamide in Caribbean foods — Residual levels and their relation to reducing sugar and asparagine content. *Food Chem.*, 133(2), 451—457.

IARC Monographson the Evaluation of Carcinogen Risks to Humans. International Agency for Researchon Cancer, 1994.

Isltroglu, H., Kemerli, T., Sakin-Yilmazer, M., Guven, G., Ozdestan, O. (2012). Effect of steam baking on acrylamide formatson and browning kinetics of coories. *Food Sci.*, 7(10), 257—263.

Mulla, M., Bharadwaj, V., Annapure, U., Singhal, R. (2011). Effect of formulation and processing parameters on acrylamide formation: A case study on extrusion of potato flour and semolina, *UWT — Food Sci. and Technol.*, 44(7), 1643—1648.

Moscicki, L. (2011). Akrylamid w zywnosci realny problem czy wyzwanie. *Przem. spoz.*, 65(9), 40—41.

Palermo, M., Fiore, A., Fogliano, V. J. (2012). Okara promoted acrylamide and carboxymetyl-lisine formation in bakery products, *J. Agr. and Food Chem.*, 60(40), 10141—10146.

Salazar, R., Arambula-Villa, G., Vazquez-Landaverde, P., Hidalgo, F., Zamora, R. (2012). Mitigating effect of amaranth (*Anarantus hypo chonandriacus*) protein on acrylamide formation in foods. *Food Chem.*, 135(4), 2293—2298.

Salazar, R., Arambula-Villa, G., Hidalgo, F., Zamora, R. (2012). Mitigating effect of piquin pepper (*Capsicum annum L.*, var. *Aviculare*) oleoresin on acrylamide formation in potato and tortilla chips. *LWT — Food Sci. and Technol.*, 48(2), 261—267.

75-РІЧНИЙ ЮБІЛЕЙ КАФЕДРИ ТЕХНОЛОГІЇ ХЛІБОПЕКАРСЬКИХ І КОНДИТЕРСЬКИХ ВИРОБІВ ТА ЇЇ ЗДОБУТКИ

В. М. Ковбаса, А. М. Грищенко, О. О. Кохан
Національний університет харчових технологій

У 2024 році виповнюється 140 років від дня заснування Національного університету харчових технологій. У 1884 р. у місті Сміла було відкрито технічні класи на базі училища графів Бобринських, яке у 1917 р. було реорганізовано в технікум харчової промисловості. Навчальний заклад зазнав чимало реорганізацій і перейменувань.



Високі результати підготовки фахівців для харчової промисловості сприяли розвитку закладу та визнанню на міжнародному рівні, найбільш відомим за назвою «Київський технологічний інститут харчової промисловості» (КТІХП). У 1993 р. КТІХПу було надано статус вищого державного навчального закладу IV рівня акредитації та назву «Український державний університет харчових технологій» (УДУХТ), а в 2002 р. — «Національний університет харчових технологій» (НУХТ).

Сучасний НУХТ, завдяки кропіткій праці та спільним зусиллям колективів кафедр, став потужним освітнім і науковим центром. Чимало зусиль для розвитку начального закладу доклали колективи кафедри технології хлібопекарських і кондитерських виробів, яка в цьому році святкує ювілей — 75 років.

Створював кафедру в 1949 р. декан технологічного факультету доц. Жура К. Д. Лабораторії створювали Берзіна Н. І., Сурганова Л. А., згодом — Черноус Т. Х.

З 1951 р. по 1954 р. кафедру очолював Литвак І. І. Першими викладачами кафедри були Ройтер І. М., Міхелев А. А., Куликовський І. М. Протягом 23 років (з 1954 р. по 1977 р.) кафедру очолював професор Міхелев А. А., який поєднував роботу викладача і головного інженера «Укрголовхлібу». У різні роки кафедру також очолювали професор Лісовенко О. Т. (1978—1980 рр.), доцент Берзіна Н. І. (1980—1983 рр.), доцент Острик О. С. (1983—1993 рр.) Тривалий час кафедрою керувала проф., чл.-кор. НААН України Дробот В. І. З 2006 р. кафедру очолює проф. Ковбаса В. М.

У 1958 р. на кафедрі організовано аспірантуру. Першим аспірантом був Лісовенко О. Т.

В усі роки на кафедрі працювали висококваліфіковані викладачі, які мали значний досвід роботи в промисловості. Серед них: проф. Дорохович А. М., доценти Берзіна Н. І., Демчук А. П., Коваленко А. Я., Вечерський П. О., Чубенко Н. Г., Лях Є. В., Руденко-Грицюк О. А., Маркіанова Л. М., Чумаченко Н. О., Годунова Л. Ю., Сисоєв І. А., Теличкун В. І., Сидоренко С. І., Скорикова А. І., Прокопенко А. Д., Бондаренко Є. Г., Неделіна Л. М., Степаненко Т. О., Лазаренко Л. С., Доценко В. Ф., Перегуда М. А., Вдовиченко А. С., Устинов Ю. В., ст. викладач Кокарева В. У., які зробили вагомий внесок у розвиток і удосконалення методичної та наукової роботи, що забезпечило високий рівень підготовки фахівців хлібопекарської й кондитерської галузей.

Назву кафедри кілька разів змінювали, що пов'язано з розширенням напрямів підготовки та спеціалізацій. Спочатку це була кафедра хлібопекарського, кондитерського і макаронного виробництв, згодом — кафедра технології хлібопекарського, кондитерського, макаронного виробництв і харчоконцентратів. У 1993 р. після отримання ліцензії на підготовку за спеціальністю «Зберігання і переробка зерна» назву кафедри було змінено на «Кафедра технології хлібопекарського, кондитерського, макаронного виробництв і зерна».

У 1993 р. на замовлення Держхарчопрому розпочалася підготовка фахівців за спеціалізацією «Харчова технологія багатопрофільних підприємств». Відкриття нових напрямів підготовки спеціалістів вимагало створення відповідних умов для навчального процесу, проведення практичної підготовки. Організація нових лабораторій, облаштування їх сучасними приладами й обладнанням відбувалися за активної участі зав. лабораторій Берзіної І. М., Цирик Н. А., Чистякової Г. І. та Герасименко А. В.

З метою виховання у студентів любові до майбутньої професії, розуміння її суспільного значення, шанобливого ставлення до хліба та хлібних ресурсів у 1990 р. силами кафедри було створено Музей хліба. У цьому процесі активну участь брала доц. Скорикова Г. І. В експозиції музею зібрано унікальні матеріали з історії злакових культур з далекої давнини до нашого часу. Показано історію розвитку хлібопекарської галузі, внесок діячів науки і практики у хлібопекарську справу.

У 1980 р. зі складу кафедри відокремилася кафедра «Машини і апарати хлібопекарського виробництва». Перший випуск інженерів-технологів відбувся в

1950 році. Випускницю Демчук А. П. було направлено на роботу на посаду асистента кафедри.

З 1961 р. на кафедрі почали готувати фахівців на заочній, а з 1965 р. — на вечірній формі навчання. На кафедрі готували фахівців для Угорщини, Куби, Монголії. У різні часи підготовку на кафедрі проходили до 350 здобувачів за всіма формами навчання (денна, заочна, вечірня).

У 2001 р. на кафедрі розпочали підготовку магістрів за освітньою програмою «Технології хліба, кондитерських, макаронних виробів і харчоконцентратів», а в 2018 р. започатковано підготовку фахівців за новою освітньою програмою «Технології органічних харчових продуктів».

Колектив кафедри сприяв також відкриттю філій університету в коледжах таких міст, як Кам'янець-Подільський, Суми, Сміла, Львів, Сімферополь. Сьогодні викладачі продовжують роботу зі студентами заочно-дистанційної форми навчання філій НУХТ у містах Суми та Кам'янець-Подільський.

За час свого існування колектив кафедри підготував понад 8000 фахівців. Випускники кафедри обіймають посади державних службовців, директорів, головних інженерів, начальників змін, завідувачів лабораторій, змінних технологів, інженерів-технологів на великих і малих підприємствах, у міжнародних компаніях в Україні та за кордоном.

Викладачі кафедри зробили значний внесок у розвиток навчальної, методичної, наукової та організаційної роботи в університеті.

У 60-і та 70-і роки ХХ ст. факультет ТХ очолював доц. Руденко-Грицюк О. А. Тривалий час заступником декана факультет ТХ (згодом факультет технології хлібопекарських і кондитерських виробництв, ТБХ) працювала доц. Берзіна Н. І. Доц. Теличкун В. І. працював деканом новоствореного факультету ТБХ в період з 1975 р. по 1977 рік.

З 1977 р. по 1999 р. деканом факультету технології бродильних і хлібопекарських виробництв працювала проф. Дробот В. І. За час її роботи на факультеті було започатковано нову спеціальність «Технологія зберігання і переробки зерна» та дві спеціалізації — «Технологія виноробства» і «Технологія багатопрофільних харчових виробництв».

З 1992 р. по 2004 р. проф. Дробот В. І. очолювала Науково-методичну комісію МОН України з харчових технологій. За її безпосередньої участі розроблено освітньо-професійні програми і кваліфікаційні характеристики та навчальні плани з підготовки бакалаврів, спеціалістів і магістрів відповідно до вимог ступеневої підготовки фахівців з напрямку «Харчова технологія та інженерія». З 1992 р. по 2001 р. Дробот В. І. працювала заступником голови Фахової ради МОН з харчової технології та інженерії з акредитації та ліцензування закладів вищої освіти, пізніше — секретарем цієї ради. З 2001 р. по 2007 р. проф. Дробот В. І. була членом експертної комісії ДАК України з харчової, легкої промисловості та сільського господарства.

З 1999 р. по 2002 р. деканом факультету ТБХ працював проф. Ковбаса В. М., якого у 2002 р. було призначено проректором НУХТ з навчальної та виховної роботи. З 2008 р. по 2011 р. він працював проректором з наукової роботи.

З 2007 р. по 2014 р. проф. Ковбаса В. М. був членом експертної комісії ДАК України з харчової, легкої промисловості та сільського господарства. З 2019 р. —

член галузевої експертної ради в галузі знань «Виробництво та технології» Національного агентства із забезпечення якості вищої освіти. Більше 10 років працював вченим секретарем наукової секції МОН «Біологія, біотехнологія, харчування». З 2023 р. — голова експертної ради секції 24 за фаховим напрямом «Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології» Наукової ради МОН.

Викладачі кафедри постійно беруть участь у роботі новоствореного у 2016 р. Навчально-наукового інституту харчових технологій. Секретарем ННІХТ була обрана доц. Бондаренко Ю. В., відповідальною за методичну роботу та інноваційні методи навчання призначена проф. Білик О. А., відповідальною за організацію дистанційного навчання — доц. Грищенко А. М.

Викладачі кафедри беруть активну участь у роботі професійних об'єднань. Так, проф. Дробот В. І. є членом дегустаційної комісії Укрхлібпрому; проф. Білик О. А. та доц. Михонік Л. А. — членами технічного комітету 153 «Хлібобулочні та макаронні вироби»; проф. Камбулова Ю. В. — член технічного комітету 152 «Продукція кондитерська та харчоконцентратна» і член дегустаційної комісії ВАП (Всеукраїнська асоціація пекарів); доц. Фалендиш Н. О. та доц. Бобель І. М. — члени Федерації органічного руху України.

Викладачі кафедри постійно удосконалюють проведення лабораторних, практичних і лекційних занять із застосуванням сучасних навчальних технологій. Протягом кількох років викладачі пройшли стажування в університетах Болгарії, Німеччини, Польщі, Словачії, Фінляндії, Чехії, Швейцарії (професори Ковбаса В. М., Білик О. А., Камбулова Ю. В., Махинько В. М., доценти Грищенко А. М., Бобель І. М., Шевченко А. О., Фалендиш Н. О.) та впровадили передовий досвід закладів вищої освіти Європи у навчальний процес, в тому числі викладання іноземною мовою (доц. Грищенко А. М.). До навчального процесу залучено іноземних фахівців, роботодавців, керівників асоціацій галузі. Здобувачі вищої освіти мають можливість проходити практику за кордоном.

Колектив кафедри активно долучається до участі у міжнародних проектах, зокрема в період 2020—2023 рр. на кафедрі за грантової підтримки ЄС за програмою Erasmus + Модуль Жана Моне реалізовано міжнародний проект «Регулювання використання харчових добавок у різних технологіях та гармонізація європейських регламентів в Україні на шляху євроінтеграції». Проект реалізовано командою, яку очолював завідувач кафедри проф. Ковбаса В. М., до складу проекту входили проф. Білик О. А. та доц. Грищенко А. М. У період дії проекту розроблено та впроваджено в навчальний процес однойменну дисципліну, яку продовжує викладати на кафедрі проф. Білик О. А.

На кафедрі оснащено спеціалізовані лабораторії, функціонує хлібопекарська лабораторія компанії «Leiprigin», організовано роботу комп'ютерного класу, створено спеціалізовану аудиторію «Музей хліба». Тривалий час кафедра мала філії на Хлібозаводі № 12 м. Києва та Київській кондитерській фабриці ім. К. Маркса для проведення занять, науково-дослідної роботи та практики.

Кафедра активно співпрацює з галузевими асоціаціями, науково-дослідними інститутами НАН України, НААН України, НАМН України, профільними закладами вищої освіти з розроблення інноваційних технологій харчових продуктів оздоровчого і функціонального призначення. Укладено договори з Інститутом продовольчих ресурсів НААН України, Інститутом технічної теплофізики НАН

України, Інститутом ендокринології і обміну речовин ім. Комісаренка НАМН України, Інститутом геронтології ім. Д. Ф. Чеботарьова НАМН України, Інститутом картоплярства НААН України та Інститутом сільського господарства Полісся НААН України, Об'єднанням підприємств хлібопекарської промисловості «Укрхлібпром», Всеукраїнською асоціацією пекарів, Асоціацією «Укркондпром», ПАТ «Укроптбакалія», Федерацією органічного руху України, Українською горіховою Асоціацією, Одеським національним технологічним університетом, Державним біотехнологічним університетом, Полтавським аграрним університетом, Харківським національним університетом ім. В. Н. Каразіна тощо.

Наукова робота кафедри розпочалася з досліджень професорів Міхелева А. А. та Ройтера І. М. Проф. Міхелеву А. А. належать праці з дослідження роботи хлібопекарських печей та їхнього удосконалення, що переросло в науковий напрям розроблення прогресивної технології й обладнання хлібопекарського і кондитерського виробництва.

На замовлення Міністерства харчової промисловості України у 1966 р. на кафедрі було створено Галузеву науково-дослідну лабораторію по хлібопекарських і кондитерських печах, яка працювала понад 30 років. Тривалий час завідував лабораторією к.т.н. Сігал М. Н., пізніше її очолювали Кулінченко В. Р., Нікончук В. Н. У лабораторії створено та впроваджено в серійне виробництво нові оригінальні конструкції високопродуктивних тунельних печей ПХС площею поду 16, 25, 50 м² та під ХПС-100.

Над створенням обладнання працювали д.т.н. Лісовенко О. Т., д.т.н. Володарський О. В., к.т.н. Бурковська Н. А., к.т.н. Дудко С. Д., к.т.н. Литовченко І. М., старші інженери Ісхакова Н. А., Мертвеченко Р. О., Максимчук О. А., Антушевич Л. А., Василенко Л. М., Мартинов Л. Ф., Шульгін І. М., Циганенко О. І., Захарченко Н. А., Дубко С. С. та інші. До роботи лабораторії долучилися й співробітники кафедри: к.т.н. Теличкун В. І., к.т.н. Ковальов О. В. (обладнання для виробництва національних сортів хлібних виробів); к.т.н. Сидоренко С. І. (печі з інфрачервоним обігрівом); к.т.н. Неделіна Л. М. (лінія виробництва хлібних паличок); к.т.н. Руденко-Грицюк О. А. (лінія виробництва сухариків до пива) та ін.

Печі, створені співробітниками лабораторії, тривалий час працювали на багатьох хлібопекарських підприємствах України, Молдови, Болгарії, Узбекистану, Казахстану, Киргизії.

Вагомий вклад у розвиток наукових досліджень кафедри здійснили чл.-кор. НААНУ, проф. Дробот В. І., професори Дорохович А. М., Ковбаса В. М., Юрчак В. Г., Оболкіна В. І., які сформували свої наукові школи. Їхні розробки впроваджено в Україні, вони відомі далеко за її межами. Певний час на кафедрі працювали проф. Доценко В. Ф., проф. Арсенєва Л. Ю. У 2016 р. вагомим здобутком було присвоєння звання лауреатів Державної премії в галузі науки і техніки професорам Дробот В. І. та Ковбасі В. М.

Копітка праця колективу над науковими розробками галузі зумовила формування чотирьох основних напрямів науково-дослідної роботи кафедри.

Напрямок розробки прогресивних технологій хлібобулочних і макаронних виробів започаткував проф. Ройтер І. М., який продовжила та розвинула проф. Дробот В. І. Під її керівництвом захищено 30 кандидатських та шість докторських

дисертацій. Більшість з них присвячено використанню в хлібопеченні нетрадиційної сировини: молочних продуктів, овочевих порошоків, продуктів перероблення олійних культур, цільнозернового борошна пшениці та борошна круп'яних культур (доц. Михонік Л. А.), бобових культур і білкових ізолятів (проф. Махинько В. М.), борошна тритікале (доц. Федорова Т. О.), нетрадиційної цукровмісної сировини та цукрозамінників (доц. Бондаренко Ю. В., Місечко Н. О., Семенова А. Б.), насіння льону (Іжевська О. П.), кукурудзяного борошна (Писарець О. П.), борошна сорго (Сорочинська Ю. С.), пектиновмісних порошоків (доц. Удворгелі Л. І.); удосконаленню технологій безглютенових хлібобулочних виробів (доц. Грищенко А. М.), виробництва заморожених напівфабрикатів, хлібобулочних виробів спеціального призначення. З метою інтенсифікації технологічних процесів комплексно досліджено технологічні властивості дріжджів різних виробників, вплив інтенсивності замішування на перебіг процесів та якість виробів (доц. Фалендиш Н. О., доц. Тесля О. Д.), заквасок спонтанного бродіння (проф. Сильчук Т. А.). Також було проведено значні дослідження з використання поліпшувачів (сухої пшеничної клейковини, ферментних препаратів, добавок окисно-відновної та структуроутворювальної дії) з метою корегування якості борошна (проф. Білик О. А., Савчук Н. І.). Багато напрямів досліджень були продовжені учнями наукової школи проф. Дробот В. І., які також керували науковою роботою аспірантів. Були захищені дисертації Черниш Л. М. (керівник проф. Махинько В. М.), Андронович Г. М. (керівник доц. Бондаренко Ю. В.), Гетьман І. А. (керівник доц. Михонік Л. А.).

Актуальність цих досліджень під час перероблення хлібопекарського борошна різної якості та для подовження термінів зберігання хлібобулочних виробів привела до формування нової наукової школи на кафедрі під керівництвом проф. Білик О. А., результатом якої стали успішні захисти трьох дисертаційних робіт, спрямованих на розроблення функціональних комплексних поліпшувачів (Халікова Е. Х., Васильченко Т. О., асист. Бурченко Л. М.).

Нині за напрямом використання рослинної сировини у виробництві хлібобулочних виробів для осіб із захворюваннями шлунково-кишкового тракту закінчує дисертаційну роботу докторантка кафедри доц. Шевченко А. О.

Дослідження технологій різних груп кондитерських виробів розвинула проф. Дорохович А. М. Під її керівництвом захищено 20 кандидатських та 3 докторських дисертації. Вперше в Україні розроблено технології безглютенового печива (Бабіч О. В.), маршмелоу (Яценко В. М.), мафінів (Лазаренко Н. П.), жувальної карамелі (Божок О. С.); досліджено технологічні властивості цукрозамінників нового покоління (лактитолу, ізомальту, еритритолу тощо) та їхнього застосування у виробництві кондитерських виробів; створено рецептури виробів для різних вікових груп населення з урахуванням рекомендацій геродієтики та виробів з редукованою енергетичною цінністю і глікемічністю (проф. Дорохович В. В., Костенко О. М., Петренко М. М., Мазур Л. С.), помадних цукерок із подовженим терміном зберігання (доц. Кохан О. О., асист. Дорожинська О. С.).

Під керівництвом проф. Дорохович А. М. виконала та захистила докторську дисертацію Камбулова Ю. В., яка глибоко дослідила технологію кондитерських виробів пінодраглеподібної структури. Вже під її керівництвом за напрямом розроблення кондитерських виробів зі зниженим цукровмістом успішно захистили

кандидатські роботи, присвячені зниженню калорійності та цукровмісту білкових і вершкових кремів, а також різних видів мармеладу Соколовська І. О., Матяс Д. С., Звягінцева-Семенець Ю. П. та Оверчук Н. О.

Розробленню технології комбінованих кондитерських виробів холодною екструзією присвячено роботи проф. Оболкіної В. І. Під її керівництвом також розроблено технології цукерок із комбінованими корпусами (доц. Кияниця С. Г., Каліновська Т. І.), борошняних і цукристих кондитерських виробів, збагачених продуктами перероблення плодів, ягід та овочів (Скрипко А. П., Дзигар О. О., Сивній І. І.).

Напрямок розробки інноваційних технологій харчоконцентратного виробництва започатковано захистом дисертації проф. Ковбасою В. М. Під його керівництвом проведено дослідження широкого асортименту екструзійних та коеструзійних продуктів (доц. Терлецька В. А., доц. Махенько Л. В., проф. Миронова Н. Г., проф. Запотоцька О. В., проф. Шульга О. С.), харчоконцентратів швидкого приготування (доц. Кобилінська О. В., Ромашко О. В.), чипсів картопляних (асист. Коваленко О. А., асист. Ковтун А. В.), удосконалено технології харчоконцентратів солодких обідніх страв (Пічкур В. Я.) та дитячого харчування. Під керівництвом доц. Терлецької В. А. захищено дисертаційну роботу з розроблення снєків із підвищеною харчовою цінністю та радіопротекторними властивостями (доц. Бобель І. М.) тощо. За цим напрямом підготовлено та захищено 10 кандидатських та одну докторську дисертації.

Значно поглиблено дослідження технології макаронних виробів завдяки роботі проф. Юрчак В. Г., під керівництвом якої розроблено рецептури виробів з яєчним білком (Голікова Т. П.), добавками структуроутворювальної дії (Паливода С. Д.). Вагомими є дослідження технології макаронних виробів із кукурудзяного борошна для хворих на целиацію (Рошно О. В.). Комплекс досліджень щодо виробництва та використання хмелевих заквасок у технології пшеничного хліба проведено з доц. Рак В. П. Під керівництвом проф. Юрчак В. Г. захищено шість кандидатських дисертацій.

Викладачі кафедри (проф. Білик О. А., доц. Кохан О. О., доц. Шевченко А. О.) активно співпрацюють з Проблемною науково-дослідною лабораторією, залучені до виконання держбюджетних тематик.

Інноваційні розробки вчених кафедри демонструються на всеукраїнських і міжнародних конференціях та виставках, впроваджуються у виробництво. Безліч нагород на конкурсах «Солодкий тріумф» та Всеукраїнської дегустаційної комісії України отримали вироби, розроблені під керівництвом професорів Дорохович А. М., Оболкіної В. І., Дробот В. І., Камбулової Ю. В., Білик О. А., доцентів Бондаренко Ю. В., Михонік Л. А.

Про результати величезної праці колективу на науковій та освітній ниві, його вклад у розвиток університету свідчать видані 40 підручників і навчальних посібників, монографій та розділів у колективних монографіях, понад 2000 наукових статей, у т. ч. в наукометричних виданнях Scopus, Veb of Science, одержані понад 300 авторських свідоцтв і патентів на винаходи.

Вагомим результатом діяльності кафедри, що сприяє розвитку науки і техніки, розширює міжнародне співробітництво, є організація Міжнародних науково-

практичних конференцій, присвячених проблемам хлібопекарської та кондитерської промисловості, проведених на базі галузевих виставок «Хліб-Кондитер-Експо» та «Sweets&BakeryUkraine». Неодноразово проводилися конференції на базі університету, зокрема «Використання заквасок у технології хлібобулочних виробів» за участі фахівців з Німеччини та Фінляндії.

У 2024 р. на кафедрі працює 16 викладачів. Професорів залучено до роботи у спеціалізованих вчених радах із захисту дисертацій (Ковбаса В. М., Дробот В. І., Камбулова Ю. В., Юрчак В. Г., Дорохович В. В., Білик О. А.). Значна частина викладачів входять до складу редколегій наукових журналів (проф. Ковбаса В. М., проф. Дробот В. І., проф. Камбулова Ю. В., проф. Білик О. А., доц. Бондаренко Ю. В., доц. Шевченко А. О.), беруть участь у роботі дегустаційних комісій, оргкомітетів міжнародних конференцій, круглих столів тощо.

Колектив кафедри постійно опікується підготовкою аспірантів і докторантів. На сьогодні на кафедрі підготовлено та захищено понад 100 кандидатських і 9 докторських дисертацій.

На кафедрі активно залучають до наукової роботи студентів. Під керівництвом професорів і доцентів студенти неодноразово ставали переможцями II етапу Всеукраїнського та Міжнародного конкурсів студентських наукових робіт (керівники — проф. Камбулова Ю. В., проф. Ковбаса В. М., проф. Махинько В. М., проф. Дорохович В. В., доц. Кохан О. О., доц. Бондаренко Ю. В., доц. Михонік Л. А., доц. Грищенко А. М.), виборювали призові місця у II етапі Всеукраїнської студентської олімпіади зі спеціальності «Харчові технології». Щороку колектив кафедри організовує конкурси «Кращий технолог» серед бакалаврів і «Кращий технік-технолог» — серед студентів коледжів НУХТ.

Велику увагу на кафедрі приділяють вихованню молоді. Проводяться тематичні вечори («Сім чудес України», «Свято хліба» тощо), організовуються екскурсії на підприємства, фахові виставки тощо.

Святуючи 75-річний ювілей кафедри, споглядаючи минуле та зважаючи на внесок кожного, хто доклав зусиль у її розвиток, маємо низько поклонитися всім і подякувати. Шануючи традиції, сформовані в університеті та на кафедрі, прагнути примножувати їх та крокувати вперед, враховуючи всі сучасні тенденції в освіті та розвитку технологій, бажано колективу творчого натхнення, нових здобутків на освітній та науковій ниві, зміцнення міжнародного співробітництва.

ВЧИТЕЛЬ, НАУКОВЕЦЬ, КЕРІВНИК**В. М. Ковбаса, Л. А. Михонік***Національний університет харчових технологій*

У цьому році виповнюється 90 років Вірі Іванівні Дробот — Вчителю з великої літери, професору кафедри технології хлібопекарських і кондитерських виробів Національного університету харчових технологій (НУХТ). Її життєлюбність та енергійність заряджає позитивом як колектив кафедри, так і студентів.



Віра Іванівна пройшла шлях від студентки, виробничника й аспірантки до професорки, завідувачки кафедри і декана. З 1990 р. по теперішній час є членом-кореспондентом Національної академії аграрних наук України.

В. І. Дробот у 1957 р. закінчила Київський технологічний інститут харчової промисловості за спеціальністю «Технологія хлібопекарного, кондитерського і макаронного виробництва». Після закінчення інституту 11 років присвятила роботі в харчовій промисловості. З 1957 р. до 1962 р. обіймала посади завідувача лабораторії та головного інженера хлібозаводу в м. Ташкент (Узбекистан).

З 1963 р. до 1968 р. працювала на інженерних посадах в організаціях харчової промисловості:

1963—1964 рр. — інженер-технолог Київського міського тресту промисловості продовольчих товарів; 1964 р. — інженер-технолог Головного управління харчової промисловості Уккранаргоспу; 1964—1965 рр. — старший інженер-економіст Головного управління харчової промисловості Уккранаргоспу; 1965—1966 рр. — старший інженер Головного управління харчової промисловості Уккранаргоспу; 1965—1968 рр. — старший інженер Укрголовхліб МХП УРСР.

Подальший шлях Віри Іванівни був пов'язаний з наукою і викладацькою діяльністю. Після закінчення аспірантури з 1971 р. вона працювала в Київському технологічному інституті харчової промисловості (зараз НУХТ) на кафедрі технології хлібопекарного, макаронного і кондитерського виробництва.

У 1972 р. успішно захистила кандидатську дисертацію на тему «Використання молочної сироватки у хлібопекарському виробництві» і отримала науковий ступінь кандидата технічних наук, а в 1988 р. — докторську дисертацію на тему «Розробка і наукове обґрунтування технології використання у хлібопекарському

виробництві нових видів сировини з метою підвищення харчової цінності хліба та економії сировинних ресурсів». В 1990 р. отримала вчене звання професора й обрана член-кореспондентом Української академії аграрних наук, в 1998 р. — академіком Академії інженерних наук України.

Віра Іванівна обіймала посади асистента, старшого викладача, доцента та професора. З 1977 р. до 1999 р. працювала деканом факультету технології бродильних і хлібопекарських виробництв. За час роботи деканом на факультеті була започаткована нова спеціальність — «Технологія зберігання і переробки зерна» та дві спеціалізації «Технології виноробства» та «Технологія багатопрофільних харчових виробництв».

З 1993 р. до 2005 р. Віра Іванівна працювала завідувачкою кафедри технології хліба, макаронних, кондитерських виробів та харчоконцентратів (зараз кафедра технології хлібопекарських і кондитерських виробів).

З 1992 р. до 2004 р. В. І. Дробот очолювала Науково-методичну комісію МОН України з харчових технологій. За її безпосередньою участю розроблені освітньо-професійні програми і кваліфікаційні характеристики та навчальні плани з підготовки бакалаврів, спеціалістів і магістрів відповідно до вимог ступеневої підготовки фахівців з напрямку «Харчова технологія та інженерія».

Працювала заступником голови фахової ради МОН з харчової технології та інженерії по акредитації та ліцензуванню вищих навчальних закладів, пізніше — секретарем цієї ради (1992—2001 рр.).

З 2001 р. до 2007 р. В. І. Дробот була членом експертної комісії ДАК України з харчової, легкої промисловості та сільського господарства.

Протягом професійної діяльності Віра Іванівна працювала у складі спеціалізованих вчених рад, була членом науково-технічної ради НУХТ, а також членом дегустаційної комісії об'єднання підприємств хлібопекарної промисловості «Укр-хлібпром», членом багатьох редакцій науково-практичних журналів.

Віра Іванівна має величезний науковий і методичний доробок. Одноосібно підготувала і видала з грифом МОН України два перших україномовних вітчизняних підручники і перший навчальний посібник з технології хлібопекарського виробництва. Загалом, є автором близько 700 наукових і навчально-методичних праць, серед яких три підручники, п'ять навчальних посібників, 6 монографій та більше 70 патентів.

Професор В. І. Дробот є провідним вченим в Україні в галузі хлібопекарського виробництва. Нею започаткована і успішно працює наукова школа з дослідження технологічних властивостей сировинної бази хлібопекарської промисловості з метою її використання у виробництві дієтичних та оздоровчих хлібобулочних виробів, яка знайшла широке визнання в Україні та за її межами. Під керівництвом Віри Іванівни підготовлено 6 докторів і 30 кандидатів технічних наук. Для більшості своїх учнів вона і сьогодні є кращим порадиником і наставником.

Учні видатної вченої обіймають керівні посади на підприємствах, в організаціях і установах харчової промисловості, а також в закладах освіти — проректора, завідувача кафедри, професора, доцента. Студенти, які навчалися за її підручниками, працюють на сотнях підприємств хлібопекарської галузі у нашій країні і за кордоном.

За свої здобутки та досягнення Віра Іванівна нагороджена орденами «Знак пошани» (1986 р.), «Княгині Ольги III ступеня» (2000 р.), є лауреатом Державної премії України в галузі науки і техніки (2016 р.). Також нагороджена знаками «Відмінник освіти України» (2003 р.), «Петро Могила» (2005 р.), почесною відзнакою Української академії аграрних наук (2009 р.), знаком «За наукові досягнення» (2011 р.), грамотою Комітету з питань аграрної політики та земельних відносин Верховної Ради України (2013 р.), почесною грамотою ОПХП «Укр-хлібпром» (2019 р.), дипломом Міністерства аграрної політики та продовольства України (2019 р.), медаллю «100 років Національній академії аграрних наук України» (2019 р.), трудовою відзнакою «Почесний пекар України» (2019 р.), подякою Всеукраїнської асоціації пекарів (2021 р.).

Але основним здобутком Віри Іванівни є її учні, з якими вона щедро ділилася своїми знаннями, віддавала частку своєї душі і серця, допомогла обрати професійний шлях. Ці учні зараз готують фахівців харчових технологій для нашої країни, розвивають науку, працюють на провідних підприємствах харчової промисловості України і за кордоном.

Колектив кафедри технології хлібопекарських і кондитерських виробів щиро бажає Вірі Іванівні міцного здоров'я, добробуту, життєвого оптимізму та творчої наснаги під мирним небом рідної країни.

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@ukr.net) 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 необов'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 вчитаних роздруковок 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. **Бібліографічні описи оформляються згідно з міжнародним стилем АРА.** 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 практики 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.

8. 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.

9. 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.

10. 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).

11. 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.

12. 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, кім. 412,
м. Київ, 01601
Контактні телефони:
міський — (044) 287-92-95, внутрішній — 92-95.
E-mail: npnuht@ukr.net

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@ukr.net):

- 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.

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.

7. 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.

8. 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.

9. 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).

10. 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.

11. 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 B, room 41201601
Kyiv, Ukraine
E-mail: npnuht@ukr.net