



2025

НАУКОВІ ПРАЦІ

НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Том 31 № 4

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

КИЇВ ✦ НУХТ ✦ 2025

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

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

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

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

- Index Copernicus
- EBSCOhost
- Google Scholar

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

Editorial office address:

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

Recommended for publication by the Academic Council of the National University of Food Technologies. Protocol No. 1 from 4th of September, 2025

© NUFT, 2025

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

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

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

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

- Index Copernicus
- EBSCOhost
- Google Scholar

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

Адреса редакції:

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

Рекомендовано вченою радою Національного університету харчових технологій. Протокол № 1 від 4 вересня 2025 року

© НУХТ, 2025

Редакційна колегія

Склад редакційної колегії журналу

«Наукові праці Національного університету харчових технологій»

Головний редактор

Editor-in-Chief

Олександр Шевченко
Oleksandr Shevchenko

д-р техн. наук, проф., Україна
Dr. Sc., Prof., National University of Food Technologies,
Ukraine

Відповідальний секретар

Managing secretary

Анастасія Шевченко
Anastasiia Shevchenko

д-р техн. наук, доц., Україна
Dr. Sc., As. Prof., National University of Food Technologies,
Ukraine

Члени редакційної колегії:

Агота Гєдре Райшене
Agota Giedre Raisiene

д-р екон. наук, Литва
Dr. Sc., Lithuanian Institute of Agrarian Economics,
Lithuania

Андрій Маринін
Andrii Marynin

канд. техн. наук, ст. наук. сп., Україна
Ph. D., As. Prof., National University of Food Technologies,
Ukraine

Валерій Мирончук
Valerii Myronchuk

д-р техн. наук, проф., Україна
Dr. Sc., Prof., National University of Food Technologies,
Ukraine

Василь Кишенько
Vasyl Kyshenko

канд. техн. наук, доц., Україна
Ph. D., As. Prof., National University of Food Technologies,
Ukraine

Василь Пасічний
Vasyl Pasichnyi

д-р техн. наук, проф., Україна
Dr. Sc., Prof., National University of Food Technologies,
Ukraine

В'ячеслав Івашук
Vyacheslav Ivaschuk

д-р техн. наук, проф., Україна
Dr. Sc., Prof., National University of Food Technologies,
Ukraine

Віктор Стабніков
Viktor Stabnikov

д-р техн. наук, проф., Україна
Dr. Sc., Prof., National University of Food Technologies,
Ukraine

Володимир Зав'ялов
Volodymyr Zavialov

д-р техн. наук, проф., Україна
Dr. Sc., Prof., National University of Food Technologies,
Ukraine

Галина Полішук
Halyna Polishchuk

д-р техн. наук, проф., Україна
Dr. Sc., Prof., National University of Food Technologies,
Ukraine

Герхард Шльонінг
Gerhard Schleining

д-р техн. наук, Австрія
Dr. Sc., Prof., University of Natural Resources, Austria

Дайва Лєскаускайте
Daiva Leskauskaite

д-р техн. наук, проф., Литва
Dr. Sc., Prof., Kaunas University of Technology, Lithuania

Кристина Сильва
Cristina L. M. Silva

д-р техн. наук, проф., Португалія
Dr.Sc., Prof., University de Catolica, Portuguesa

Лада Шірінян
Lada Shirinyan

д-р екон. наук, проф., Україна
Dr. Sc., Prof., National University of Food Technologies,
Ukraine

Лариса 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 Балота 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., Founder of the Global Harmonization Initiatives, the Netherlands

Автоматизація та інформаційні технології

Новак М. С., Смітюх Я. В. Визначення допустимих відхилів теплового стану сталевих конструкцій під час валідаційних експериментів

Поддукін В. В. Дослідження адаптивних людино-машинних інтерфейсів та їхньої інтеграції в автоматизовані системи хлібопекарського виробництва

Паровенко М. Д., Климченко О. М. Оптимізація керування технологічним процесом кип'ятіння суслу з використанням спостерігача для оцінки стану системи

Струзік В. А. Застосування рефакторингу для підвищення безпеки програмного забезпечення

Біотехнології

Воронцов О. О., Стабніков В. П., Воронцов О. О. Аналіз перспектив розвитку біотехнологій отримання біометану

Кравченко В. В., Ковшар І. Д., Резніченко Ю. М. Біотехнологічні аспекти та практичне значення одержання полігидроксibuтирату ціанобактеріями

Економіка, менеджмент і маркетинг

Роганова Г. О., Прозорова А. Р. Оцінка кредитоспроможності малого підприємства

Механічна та електрична інженерія

Козак О. С., Десик М. Г., Теличкун В. І. Аналіз способів і обладнання для охолодження хлібобулочної продукції на сучасних хлібопекарських підприємствах

Слюсенко А. М., Лементар С. Ю., Пonomarenko В. В. Дослідження аеродинаміки сушильного агента у флюїдному днищі розпилювальної сушарки

Романюк В. Т., Шпак В. В., Зінкевич П. О. Дослідження властивостей покриття з охолоджувальним ефектом на основі карбонату кальцію для проводів повітряних ліній електропередавання

Петренко В. П., Прядко М. О., Пилипенко О. Ю., Максименко Д. В. Дослідження про-

Automation and information technologies

7 *Novak M., Smityukh Y.* Determination of permissible deviations of the thermal state of steel structures during validation experiments

23 *Poddukin V.* Study of adaptive human-machine interfaces and their integration into automated bakery production systems

40 *Parovenko M., Klymenko O.* Wort boiling process control optimization using system state estimation

52 *Struzik V.* Applying refactoring to improve software security

Biotechnologies

67 *Vorontsov O., Stabnikov V., Vorontsov O.* Analysis of the prospects for the development of biotechnology for biomethane production

89 *Kravchenko V., Kovshar I., Reznichenko Yu.* Biotechnological aspects and practical significance of polyhydroxybutyrate production by cyanobacteria

Economy, Management and Marketing

107 *Rohanova H., Prozorova A.* Assessment of the creditworthiness of a small enterprise

Mechanical and Electrical Engineering

119 *Kozak O., Desyk M., Telychkun V.* Analysis of methods and equipment for cooling bakery products in modern bakeries

136 *Sliusenko A., Lementar S., Ponomarenko V.* Study of the aerodynamics of the drying agent in the fluidized bottom of a spray dryer

149 *Romaniuk V., Shpak V., Zinkevych P.* Research of the properties of a coating with a cooling effect based on calcium carbonate for overhead power line wires

158 *Petrenko V., Prydko M., Pylipenko O., Maksymenko D.* Study of heat exchange processes in dense

цесів теплообміну в густих стікаючих плівках розчинів, циклічно збурених хвильовими напливами під час випаровування

flowing films of solutions cyclically disturbed by wave flows during evaporation

Зьоменко О. С., Губеня О. О. Вплив густини таблеток на її міцність і зусилля пресування

172 *Zomenko O., Gubenia O.* Effect of tablet density on its strength and compression force

Харчові технології

Food Technologies

Белінський О. В., Галенко О. О. Вплив біоактивних компонентів чорнозерного борошна і кукурудзяного молока на маркери здорового старіння

182 *Belinskyi O., Galenko O.* The effect of bioactive components of black-grain flour and corn milk on markers of healthy aging

Сімахіна Г. О., Кочубей-Литвиненко О. В., Маслійчук О. Б. Удосконалення системи і структури харчування військовослужбовців ЗСУ: теоретичні і практичні аспекти

194 *Simakhina G., Kochubey-Lytvynenko O., Masliychuk O.* Improving the system and structure of AFU personnel nutrition: theoretical and practical aspects

Авдєєва Л. Ю., Макаренко А. А. Реологічні властивості комплексу гарбузового пюре з мальтодекстрином

210 *Avdieieva L., Makarenko A.* Rheological characteristics of a composite based on pumpkin puree and maltodextrin

Шевченко А. О., Камбулова Ю. В. Практики органічних агротехнологій і біодинаміки в Данії

221 *Shevchenko A., Kambulova Yu.* Organic and biodynamic agricultural practices in Denmark

Тележенко Л. М., Атанасова В. В., Козонова Ю. О., Білик К. О. Інноваційні технологічні підходи до виробництва печива для закладів ресторанного господарства з використанням альтернативних видів борошна

232 *Telezhenko L., Atanasova V., Kozonova Yu., Bilyk K.* Innovative technological approaches to cookie production for the foodservice industry using alternative types of flour

Бартошак І. В., Поліщук Г. Є. Вплив коагулянтів різного походження на показники якості сиру вершкового

246 *Bartoshak I., Polishchuk G.* Influence of coagulants of different origin on the quality indicators of cream cheese

Якименко А. В., Мельник Л. М. Дослідження впливу фракційності палигорськіта на ступінь вилучення небажаних домішок із сортівків за нормальних умов та при розрідженні

257 *Yakimenko A., Melnyk L.* Study of the effect of palygorskite fractionation on efficiency of removing undesirable impurities from sortivkas under normal and reduced pressure conditions

Хімічні науки

Chemical sciences

Кроніковський О. І., Чебаненко Х. В., Іщенко В. М., Кроніковська О. П., Стаднічук Н. О. Аналітичні можливості карбоксилатних комплексів пллобуму з краун-етерами

267 *Kronikovskiy O., Chebanenko K., Ischenko V., Kronikovska O., Stadnichuk N.* Analytical potentials of lead carboxylate complexes with crown ethers

DETERMINATION OF PERMISSIBLE DEVIATIONS OF THE THERMAL STATE OF STEEL STRUCTURES DURING VALIDATION EXPERIMENTS

M. Novak, Y. Smityukh

National University of Food Technologies

Key words:

*Automated control
Validation experiment
Fire protection coating
Permissible deviation
Steel structure
Standard temperature regime
Thermal state*

Article history:

Received 14.07.2025
Received in revised form
31.07.2025
Accepted 11.08.2025

Corresponding author:

M. Novak

E-mail:

novak.mikhailo.work@gmail.com

Citation: Новак М. С., Смітюх Я. В. (2025). Визначення допустимих відхилів теплового стану сталевих конструкцій під час валідаційних експериментів. *Наукові праці НУХТ*, 31(4), 7—22.
DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-4-3

ABSTRACT

To determine the degree of compliance of the results of the assessment of the thermal performance of fire protection coatings of steel structures of food industry buildings with their actual values, it is promising to apply a validation methodology based on the automated control of the thermal state of these structures under the influence of the standard fire temperature regime given in EN 1363-1:2020. Insufficient certainty of the procedure for determining the permissible deviations between the measured and set values of the time interval before reaching critical temperatures on these structures during validation experiments hinders the implementation of this methodology, which makes it relevant to conduct research in this field.

A procedure for determining such permissible deviations, which is based on taking into account the instrumental errors of the measuring equipment used and deviations of the real from the nominal temperature regime in the furnace and the real from the nominal initial temperature of steel structures was proposed. To determine the analytical dependencies acceptable for calculating the components of permissible deviations, using the method of mathematical modelling of the thermal state of building structures under the influence of a standard temperature regime and linear regression analysis, the relationship between the values of these components and the deviation of the real from the nominal temperature regime in the furnace, the deviation of the real from the nominal initial temperature of the steel structure, the time interval until the critical temperature reached was evaluated.

It was found that due to the deviation of the real from the nominal temperature regime in the furnace, the difference between the measured and the specified time intervals before reaching the specified critical temperatures can vary from –6.2% to 5.6%, and due to the deviation of the real initial temperature of the steel structure from its nominal value, this difference can vary from –2.8% to 1.4%. The influence of a given time interval before reaching the critical temperature of a steel structure and its value on these components of permissible deviations was revealed and analytical dependencies acceptable for their assessment were determined.

ВИЗНАЧЕННЯ ДОПУСТИМИХ ВІДХИЛІВ ТЕПЛООВОГО СТАНУ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ПІД ЧАС ВАЛІДАЦІЙНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

М. С. Новак, Я. В. Смітюх

Національний університет харчових технологій

Для визначення ступеня відповідності результатів оцінювання теплових показників вогнезахисних покривів сталевих конструкцій будівель харчової промисловості їхнім дійсним значенням перспективним є застосування методики валідації, яку засновано на автоматизованому керуванні тепловим станом цих конструкцій за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі, поданого в EN 1363-1:2020. Нечіткість процедури визначення допустимих відхилів між вимірними і заданими значеннями проміжку часу до досягнення критичних температур на цих конструкціях під час валідаційних експериментів стримує впровадження цієї методики, що обумовлює актуальність проведення досліджень у цьому напрямі.

У статті запропоновано процедуру визначення таких допустимих відхилів, яка ґрунтується на врахуванні інструментальних похибок застосованих засобів вимірної техніки та відхилів фактичного від номінального температурного режиму в печі й фактичної від номінальної початкової температури сталевих конструкцій. Для визначення аналітичних залежностей, прийнятних для обчислення складових допустимих відхилів, шляхом застосування методу математичного моделювання теплового стану сталевих конструкцій в умовах впливу стандартного температурного режиму і лінійного регресійного аналізу проведено оцінювання взаємозв'язку між значеннями цих складових і показником відхилення фактичного від номінального температурного режиму в печі, відхиленням фактичної від номінальної початкової температури сталевих конструкцій, проміжком часу до досягнення критичної температури і її величиною.

Встановлено, що через відхил фактичного від номінального температурного режиму в печі різниця між вимірним і заданим проміжками часу до досягнення заданих критичних температур може змінюватись від $-6,2\%$ до $5,6\%$, а через відхил фактичної початкової температури сталевих конструкцій від її номінальної величини — від $-2,8\%$ до $1,4\%$. Виявлено вплив заданого проміжку часу до досягнення критичної температури сталевих конструкцій та її величини на зазначені складові допустимих відхилів і визначено аналітичні залежності, прийнятні для їхнього оцінювання.

Ключові слова: автоматизоване керування, валідаційний експеримент, вогнезахисний покрив, допустимий відхил, сталева конструкція, стандартний температурний режим, тепловий стан.

Постановка проблеми. Для методів визначення фізичних величин, в яких використовують математичні моделі або алгебраїчні рівняння, зазвичай, застосовують найбільш поширений спосіб їхньої валідації, що полягає у порівнянні резуль-

татів, отримуваних за методом, який валідують, з результатами натурного (валідаційного) експерименту (Godoy, & Dardati, 2001; Archambeault, & Connor, 2008). Такий спосіб впроваджено і в процедурі валідації методів визначення теплових показників вогнезахисних покривів (далі — покривів) на сталевих конструкціях будівель харчової промисловості, таких як колони та балки виробничих приміщень і приміщень для обробки, охолодження, заморожування і зберігання продуктів (Новак, & Смітюх, 2024). Цю процедуру засновано на автоматизованому керуванні тепловим станом сталевих конструкцій будівель харчової промисловості за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі, поданого в EN 1363-1:2020. Вона полягає у визначенні значень товщини покриву (управляючого параметра (вхідної величини)) на сталевих конструкціях (ненавантажених колонах заввишки 1,0 м), розташованих всередині вогневої печі, за яких при впливі стандартного температурного режиму відхили між фактичними (поточними) і заданими значеннями проміжку часу до досягнення заданих критичних температур на цих конструкціях — регульованого параметра (вихідної величини), не перевищують допустимих значень. Для здійснення автоматизованого керування в цій процедурі застосовано інтелектуальну систему керування, яка містить математичну модель, що встановлює взаємозв'язок між проміжком часу до досягнення критичної температури і товщиною покриву. За цією моделлю визначають розрахункові значення товщини покриву на сталевих конструкціях для заданих проміжків часу до досягнення заданих критичних температур. Ці розрахунки здійснюють за номінальними значеннями температури в печі й початкової температури сталевих конструкцій.

Значення проміжку часу до досягнення критичної температури для сталевих конструкцій з певними параметрами за умов впливу стандартного температурного режиму залежить не тільки від товщини покриву. На його величину впливають й інші чинники, зокрема, температурний режим у печі й початкова температура цієї конструкції (Новак, Добростан, Пустовий, & Новак, 2024). Відхили цього температурного режиму і початкової температури від їхніх номінальних значень під час проведення валідаційних експериментів, які здійснюють у процесі автоматизованого керування тепловим станом сталевих конструкцій, можуть призвести до неоднозначності результату визначення фактичної величини проміжку часу до досягнення критичної температури. Вплив зазначених відхилів можна врахувати під час визначення допустимих відхилів між фактичними (вимірними) і заданими значеннями проміжку часу до досягнення критичних температур сталевих конструкцій. Також під час визначення цих допустимих відхилів необхідно врахувати показники точності застосованих у валідаційних експериментах засобів виміральної техніки й інші чинники, які впливають на фактичне (вимірне) значення проміжку часу до досягнення критичних температур сталевих конструкцій. Нечіткість такої процедури визначення цих допустимих відхилів обумовлює актуальність проведення досліджень у цьому напрямку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як показано в праці (Круковський, Новак, Поклонський, Єременко, & Фролов, 2021), експериментальне визначення теплового стану сталевих конструкцій під час оцінювання теплових показників їхніх покривів, зазвичай, здійснюють згідно з EN 13381-4:2013 і EN 13381-8:2013.

Під час цих експериментів встановлюють проміжки часу до досягнення критичних температур сталевих конструкцій за умов впливу стандартного температурного режиму, номінальні значення і допустимі відхили для якого подані в EN 1363-1:2020. Процедура проведення зазначених експериментів передбачає використання термоелектричних перетворювачів (термопар типу К) для вимірювання температур на металевій поверхні сталевих конструкцій і початкову температуру цих конструкцій у межах від 10 °С до 40 °С.

Через наявність похибки засобів вимірювальної техніки і варіацій температурного режиму в печі й початкової температури для сталевих конструкцій, які мають однакові параметри (коефіцієнт поперечного перерізу і товщину покриву), можливе отримання різних результатів їхнього експериментального визначення проміжків часу до досягнення критичних температур. Так, у праці (Новак, Добростан, Долішній, & Ратушний, 2017) наведено результати трьох експериментів щодо визначення теплового стану трьох конструкцій у формі сталеві квадратної пластини зі стороною 500 мм і товщиною 5 мм з покривом із гіпсокартонної плити завтовшки 12,5 мм, в яких мали місце різні відхили температурного режиму в печі від номінального і різні значення початкової температури. Отримані результати цих експериментів показують, що різниця між проміжками часу до досягнення критичних температур для цих сталевих конструкцій досягає 7,7%.

Відхил результату вимірювання фізичної величини від її дійсного значення, як показано в праці (Курилов, & Козін, 2015), зазвичай залежить від похибки методу вимірювання, пов'язаної з недосконалістю принципу вимірювання, інструментальної похибки засобу вимірювання і похибки, яка виникає від впливу теплових і повітряних потоків, магнітних, електричних, гравітаційних та інших полів, зміни атмосферного тиску, вологості, опромінення тощо.

Стосовно інструментальної похибки засобу вимірювання, то в праці (Kee, Asako, Ken, & Sidik, 2020) розглянуто чотири джерела похибки, які можуть впливати на похибку вимірювання температури термопарами, серед яких такі: обмеження роздільної здатності пристрою реєстрації даних, похибка вимірювання температури на основі вимірюваної напруги, похибка компенсації температури холодного спаю та нестабільність даних. У цій праці запропоновано процедуру отримання невизначеності вимірюваної температури з урахуванням зазначених похибок і показано, що при застосуванні реєстратора даних серії HIOKI LR8400-20 значення невизначеності для термопар типу К складає 0,42 °С (без урахування похибки термопар). Згідно з EN 60584-1:2013 максимально допустимі відхили електрорушійної сили від її номінальних значень, які фактично означають максимально можливі похибки, що вносяться у вимірювання термопарами, для термопар типу К у діапазоні вимірювання від -40 °С до 1200 °С складають: $\pm 2,5$ °С для температури до 333 °С і $\pm 0,75\%$ для більшої температури (Pansiot, Allard, Désilets, Lalancette, & Blais, 2024). У працях (Васильків, 2010; Кочан, 2020) розглянуто похибку, зумовлену неоднорідністю термопар, і методи її коригування. Існуючі методи ідентифікації динамічної похибки вимірювання температури внаслідок теплової інерції термопар проаналізовано у працях (Гуз, Козир, & Червона, 2015; Sultan, 2010).

Дослідженню методичної похибки вимірювання температури термопарами присвячено значну кількість публікацій. Так у працях (Pope, Hidalgo, & Torero, 2021;

Pope, Hidalgo, Hadden, & Torero, 2022) представлено результати оцінювання похибки вимірювання, пов'язаної з тепловим збуренням, яке виникає в матеріалі у разі, коли термопару встановлюють перпендикулярно до його ізотермічних ділянок. У праці (Woolley, & Woodbury, 2011) визначено величину похибки вимірювання температури, викликану зсувом термопар. У праці (Pansiot, Allard, Désilets, Lalancette, & Blais, 2024) розглянуто похибки, які мають місце через контактний опір, ефект ребра і макроскопічне звуження. У цих працях, крім шляхів виявлення методичних похибок, визначено процедури їхніх коригувань, які ґрунтуються на результатах експериментальних і чисельних досліджень із застосуванням 2D і 3D скінченно-елементних моделей теплопровідності й дають змогу значно зменшити похибку вимірювання температури. У праці (Кочан, 2009) представлено результати експериментального оцінювання похибки вимірювання, пов'язаної зі зміною профіля температурного поля вздовж електродів термопар, та спосіб її зменшення.

Чисельні дослідження із застосуванням одномірної скінченно-різницевої моделі теплопровідності, які наведено в працях (Новак, Добростан, & Пустовий, 2023; Новак, Новак, & Пустовий), спрямовано на виявлення впливів відхилю фактичної температури в печі від номінального температурного режиму і відхилю фактичної від номінальної початкової температури сталевих конструкцій на їхній проміжок часу до досягнення критичних температур. За результатами цих досліджень визначено, що відсоткова різниця між значеннями цього проміжку часу, отриманими за фактичним і номінальними температурними режимами в печі, залежить від відносного відхилю площі під кривою фактичної температури в печі від площі під кривою номінального температурного режиму та від проміжку часу до досягнення критичної температури. Також встановлено, що відсоткова різниця між значеннями проміжку часу до досягнення критичної температури, отриманими за допустимими початковими температурами і номінальною початковою температурою, залежить від величини цього проміжку часу і з його підвищенням вона зменшується. Результати цих чисельних досліджень дали змогу зробити висновок, що теплофізичні властивості нанесеного покриття і коефіцієнт поперечного перерізу сталевих конструкцій несуттєво впливають на значення зазначених відсоткових різниць.

Підсумовуючи, варто зазначити, що існуючі методи, зазвичай, дають змогу визначити похибку вимірювання температури термопарами з достатньою точністю. Для виявлення та виправлення (коригування) методичних похибок вимірювання широко використовують методи, які ґрунтуються на застосуванні моделей теплопровідності. Результати, отримані за цими моделями, використовують для генерації коригувальних поправок з метою усунення похибок у показаннях термопар. Має місце недостатня визначеність даних, необхідних для обґрунтування допустимих відхилів проміжку часу до досягнення критичних температур сталевих конструкцій під час проведення валідаційних експериментів, які здійснюють у процесі автоматизованого керування тепловим станом цих конструкцій, тому існує потреба в розробленні процедури, придатної для визначення зазначених допустимих відхилів.

Мета дослідження: виявлення взаємозв'язку між відхилом від номінального температурного режиму в печі, відхилом від номінальної початкової температури

сталевих конструкцій та проміжком часу до досягнення критичних температур і розробка процедури визначення допустимих відхилів їхнього теплового стану.

Матеріали і методи. Застосовано метод дослідження, складовими якого є обчислювальна процедура чисельного моделювання теплового стану сталевих конструкцій, оснащених вогнезахисним покривом із заданими теплофізичними властивостями, за умов впливу стандартного температурного режиму, процедури аналізування, порівняння, узагальнення, апроксимації та систематизації отриманих розрахункових даних з використанням лінійного регресійного аналізу. Основні матеріали для дослідження — наукові публікації зарубіжних і вітчизняних учених у провідних періодичних і спеціалізованих світових виданнях, що стосуються ідентифікації відхилів результатів вимірювання фізичної величини від її дійсного значення і методів їхнього коригування.

Викладення основних результатів дослідження. Згідно з методикою автоматизованого керування тепловим станом сталевих конструкцій за умов впливу стандартного температурного режиму, викладеною в праці (Новак, & Смітюх, 2024), прийнятність експериментально отриманих результатів визначають шляхом порівняння відхилів фактичних (вимірюваних) від заданих значень проміжку часу до досягнення заданих критичних температур для сталевих конструкцій, які мають різний коефіцієнт поперечного перерізу і різну товщину покриву, з допустимою величиною.

Запропонована в цьому дослідженні й подана нижче процедура визначення допустимих відхилів фактичних від заданих значень цього проміжку часу ґрунтується на врахуванні інструментальних похибок застосованих засобів вимірювальної техніки та відхилів фактичного від номінального температурного режиму в печі й фактичної від номінальної початкової температури сталевих конструкцій.

Експериментально отримані результати вважають прийнятними, якщо відхил вимірюваного проміжку часу до досягнення критичної температури від його заданого значення для кожної сталеві конструкції знаходиться в таких межах:

$$\delta t_{permis,min} \leq \delta t_{fr,meas} \leq \delta t_{permis,max}, \quad (1)$$

де $\delta t_{fr,meas}$ — відхил результату вимірювання проміжку часу до досягнення критичної температури від його заданого значення, %, який обчислюють за формулою (2); $\delta t_{permis,min}$ — мінімальне значення допустимого відхилення результату вимірювання проміжку часу до досягнення критичної температури від його заданого значення, %, яке обчислюють за формулою (3); $\delta t_{permis,max}$ — максимальне значення допустимого відхилення результату вимірювання проміжку часу до досягнення критичної температури від його заданого значення, %, яке обчислюють за формулою (4).

$$\delta t_{fr,meas} = 100(t_{fr,meas} - t_{fr,requ})/t_{fr,requ}; \quad (2)$$

$$\delta t_{permis,min} = \delta t_{syst} - |\delta t_{inst}|; \quad (3)$$

$$\delta t_{permis,max} = \delta t_{syst} + |\delta t_{inst}|, \quad (4)$$

де $t_{fr,meas}$ — результат вимірювання проміжку часу до досягнення критичної температури (див. рис. 1), хв; $t_{fr,requ}$ — задане значення проміжку часу до досягнення критичної температури (див. рис. 1), хв; δt_{syst} — складова $\delta t_{fr,meas}$, що зумовлена відхилом фактичного від номінального температурного режиму в печі й відхилом фактичної від номінальної початкової температури, %; δt_{inst} — складова $\delta t_{fr,meas}$, що зумовлена властивостями засобів вимірювальної техніки, %, яку обчислюють за такою формулою:

$$\delta t_{inst} = \pm 1,1((\delta t_{thermo})^2 + (\delta t_{device,\theta})^2 + (\delta t_{device,d})^2)^{0,5}, \quad (5)$$

де δt_{thermo} і $\delta t_{device,\theta}$ — значення межі відносної інструментальної похибки термопары й приладу реєстрації даних про температуру, які є в вимірювальному ланцюгу, %; $\delta t_{device,d}$ — значення межі відносної інструментальної похибки засобу вимірювання товщини покритву, %.

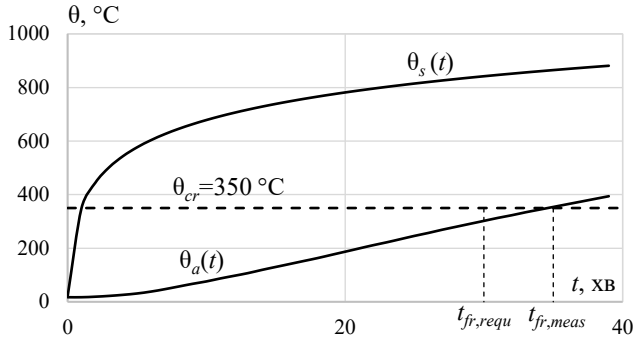


Рис. 1. Типова залежність температури сталевій конструкції θ_a від проміжку часу теплового впливу t за стандартного температурного режиму $\theta_s(t)$

Значення інструментальних похибок зазначених засобів вимірювання визначають за результатами їхнього калібрування або за даними, наведеними в нормативних документах.

Значення відхилення δt_{syst} визначають за такою формулою:

$$\delta t_{syst} = \delta t_{fr,\theta e} + \delta t_{fr,\theta o}, \quad (6)$$

де $\delta t_{fr,\theta e}$ — похибка, зумовлена відхилом фактичного від номінального температурного режиму в печі, %; $\delta t_{fr,\theta o}$ — похибка, зумовлена відхилом фактичної від номінальної початкової температури сталевій конструкції, %.

Для визначення аналітичних залежностей, прийнятних для обчислення $\delta t_{fr,\theta e}$ і $\delta t_{fr,\theta o}$, проведено оцінювання взаємозв'язку між значеннями цих похибок і показником відхилення фактичного від номінального температурного режиму в печі, відхилом фактичної від номінальної початкової температури сталевій конструкції, проміжком часу до досягнення критичної температури і її величиною, що висвітлене нижче.

За номінальних значень температури в печі θ_s згідно з EN 1363-1:2020, обчислених за формулою (7), і номінальної початкової температури сталевій конструкції $\theta_{0,not}$, яка становить 20 °С, за процедурою, поданою в праці (Новак, Дріжд, Добростан, & Новак, 2022), шляхом розв'язання прямої задачі теплопровідності визначали товщину покритву $d_{p,min}$, за якої для певного заданого (далі — номінального) проміжку часу t_{fr} розрахункова температура θ_a на металевій поверхні сталевій конструкції (під шаром покритву) дорівнює заданій критичній температурі θ_{cr} . Ці розрахунки виконували за таких значень коефіцієнта теплопровідності й питомої об'ємної теплоємності покритву і коефіцієнта поперечного перерізу сталевій конструкції: $\lambda_p = 0,2$ Вт/(м×°С), $c_p \rho_p = 0,5$ МДж/(м³×°С), $A_m/V = 150$ м⁻¹. Зазначена величина коефіцієнта поперечного перерізу відповідає, наприклад, товщині стінки порожнистої сталевій конструкції прямокутного перерізу, яка дорівнює 6,67 мм.

Значення (мінімальні, проміжні й максимальні) критичної температури і номінального проміжку часу, застосовні під час розрахунків, були обрані такими: $\theta_{cr,min} = 350$ °C, $\theta_{cr,med} = 500$ °C, $\theta_{cr,max} = 700$ °C; $t_{fr,min} = 30$ хв, $t_{fr,med} = 90$ хв, $t_{fr,max} = 240$ хв. Отримані результати цих розрахунків наведено в табл. 1.

$$\theta_s = 20 + 3451g(8t + 1), \tag{7}$$

де t — проміжок часу від початку теплового впливу, хв.

Таблиця 1. Результати розрахунку товщини $d_{p,min}$

Товщина $d_{p,min}$ (мм) для:								
$\theta_{cr,min},$ $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,med},$ $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,max},$ $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,min},$ $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,med},$ $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,max},$ $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,min},$ $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,med},$ $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,max},$ $t_{fr,max}$
15,81	8,780	2,815	48,12	32,97	17,80	105,0	80,38	53,26

Із використанням отриманих даних щодо товщини $d_{p,min}$ шляхом розв’язання прямої задачі теплопровідності визначали значення проміжку часу $t_{fr,i}$ до досягнення критичної температури θ_{cr} для таких варіантів:

№ 1: температурний режим в печі відповідає мінімально допустимому температурному режиму згідно з EN 1363-1:2020, а початкова температура сталевій конструкції дорівнює її номінальному значенню $\theta_{0,nom} = 20$ °C;

№ 2: температурний режим у печі відповідає максимально допустимому температурному режиму згідно з EN 1363-1:2020, а початкова температура сталевій конструкції дорівнює її номінальному значенню $\theta_{0,nom} = 20$ °C;

№ 3: температурний режим у печі відповідає номінальному температурному режиму $\theta_s(t)$ згідно з EN 1363-1:2020, а початкова температура сталевій конструкції дорівнює її мінімально допустимому значенню $\theta_{0,min} = 10$ °C;

№ 4: температурний режим у печі відповідає номінальному температурному режиму $\theta_s(t)$ згідно з EN 1363-1:2020, а початкова температура сталевій конструкції дорівнює її максимально допустимому значенню $\theta_{0,max} = 40$ °C.

Європейський стандарт EN 1363-1:2020 регламентує відносний відхил d_e площі під кривою фактичної температури в печі $\theta_e(t)$ від площі під кривою номінального температурного режиму $\theta_s(t)$, допустимий під час експериментального визначення проміжку часу до досягнення критичної температури. Фактичний відносний відхил d_e (%) обчислюють за такою формулою:

$$d_e = 100(A_e - A_s)/A_s, \tag{8}$$

де A_e — площа під кривою фактичною температурного режиму в печі $\theta_e(t)$, °C·хв; A_s — площа під кривою номінального температурного режиму $\theta_s(t)$, °C·хв.

Залежності мінімально і максимально допустимих відхилів ($d_{e,min}$ і $d_{e,max}$) від проміжку часу t наведено на рис. 2. Значення температури в печі $\theta_{e,min}$ і $\theta_{e,max}$, необхідні для створення температурних режимів, які мають мінімально і максимально допустимі відхилення $d_{e,min}$ і $d_{e,max}$ (назвемо їх мінімально і максимально допустимими температурними режимами), а також їхні графічні залежності ($\theta_{e,min}(t)$ і $\theta_{e,max}(t)$) наведено в праці (Новак, Новак, & Пустовий, 2023). На рис. 2 подано залежності відхилів цих значень температури в печі від номінальних θ_s , які обчислено за такими формулами:

$$\delta\theta_{e,min} = 100(\theta_{e,min} - \theta_s)/\theta_s; \tag{9}$$

$$\delta\theta_{e,max} = 100(\theta_{e,max} - \theta_s)/\theta_s. \tag{10}$$

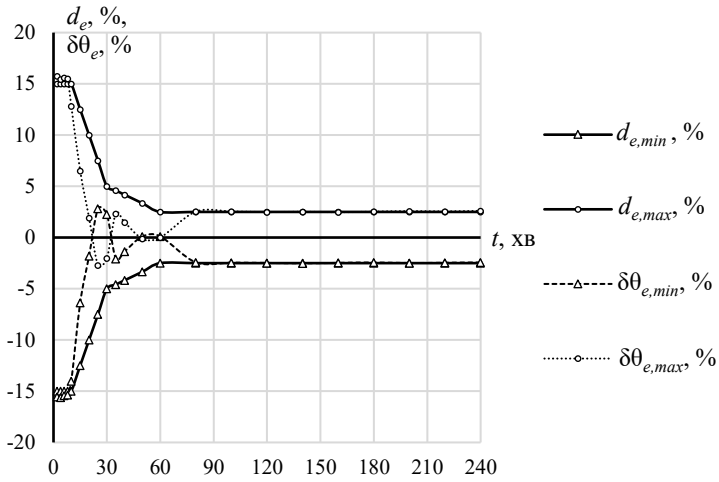


Рис. 2. Залежності відхилів площі $d_{e,min}$ і $d_{e,max}$ та відхилів температури $\delta\theta_{e,min}$ і $\delta\theta_{e,max}$ від проміжку часу t

Результати розрахунків проміжку часу $t_{fr,i}$ до досягнення критичної температури для зазначених вище варіантів наведено в табл. 2, де $d_{p,min,30}$, $d_{p,min,90}$, $d_{p,min,240}$ — це значення товщини покриття, які дорівнюють величинам його товщини $d_{p,min}$, отриманим відповідно для проміжків часу $t_{fr,min} = 30$ хв, $t_{fr,med} = 90$ хв, $t_{fr,max} = 240$ хв і поданим в табл. 1.

Таблиця 2. Результати розрахунку проміжку часу $t_{fr,i}$

Номер варіанту i	Проміжок часу $t_{fr,i}$ (хв) для:								
	$\theta_{cr,min},$ $d_{p,min,30}$	$\theta_{cr,med},$ $d_{p,min,30}$	$\theta_{cr,max},$ $d_{p,min,30}$	$\theta_{cr,min},$ $d_{p,min,90}$	$\theta_{cr,med},$ $d_{p,min,90}$	$\theta_{cr,max},$ $d_{p,min,90}$	$\theta_{cr,min},$ $d_{p,min,240}$	$\theta_{cr,med},$ $d_{p,min,240}$	$\theta_{cr,max},$ $d_{p,min,240}$
1	31,68	31,55	31,47	91,75	92,03	92,67	244,67	245,88	248,17
2	28,15	28,22	28,25	88,27	88,03	87,52	235,53	234,30	232,30
3	30,40	30,20	30,05	91,23	90,70	90,28	243,31	242,09	241,08
4	29,16	29,60	29,90	87,47	88,54	89,38	233,23	235,80	237,86

У табл. 3 наведено дані щодо різниці $\delta t_{fr,i}$ між значеннями проміжку часу, отриманими для варіантів № 1—4, і відповідними номінальними значеннями t_{fr} ($t_{fr,min} = 30$ хв, $t_{fr,med} = 90$ хв, $t_{fr,max} = 240$ хв), яку обчислювали за такою формулою:

$$\delta t_{fr,i} = 100(t_{fr,i} - t_{fr})/t_{fr}, \tag{11}$$

де $t_{fr,i}$ — проміжок часу, отриманий для певного варіанту i і поданий в табл. 2, хв.

Таблиця 3. Результати розрахунку різниці $\delta t_{fr,i}$

Номер варіанту i	Різниця $\delta t_{fr,i}$ (%) для:								
	$\theta_{cr,min},$ $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,med},$ $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,max},$ $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,min},$ $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,med},$ $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,max},$ $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,min},$ $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,med},$ $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,max},$ $t_{fr,max}$
1	5,61	5,17	4,90	1,94	2,26	2,97	1,95	2,45	3,40
2	-6,17	-5,94	-5,83	-1,92	-2,19	-2,76	-1,88	-2,36	-3,19
3	1,34	0,66	0,17	1,37	0,78	0,31	1,38	0,87	0,45
4	-2,79	-1,32	-0,33	-2,81	-1,62	-0,69	-2,82	-1,75	-0,89

Із аналізу даних, наведених в табл. 3, випливає, що через відхил фактичного від номінального температурного режиму в печі різниця між вимірним і заданим проміжками часу до досягнення критичної температури (позначимо цю різницю $\delta t_{fr,\theta_e}$) може бути в межах від $-6,17\%$ до $5,61\%$. Величина цієї різниці залежить від проміжку часу t_{fr} і критичної температури θ_{cr} . На рис. 3 зображено залежності від проміжку часу t_{fr} різниці $\delta t_{fr,\theta_e,min}$, отриманої за умови створення в печі мінімально допустимого температурного режиму (варіант № 1), і різниці $\delta t_{fr,\theta_e,max}$ — для максимально допустимого температурного режиму (варіант № 2). Найбільша величина цих різниць має місце за проміжку часу, який становить 30 хв, а найменша — в інтервалі проміжку часу від 90 хв до 240 хв. Для цього ж інтервалу з підвищенням критичної температури величина різниць $\delta t_{fr,\theta_e,min}$ і $\delta t_{fr,\theta_e,max}$ збільшується, а для проміжку часу 30 хв — зменшується.

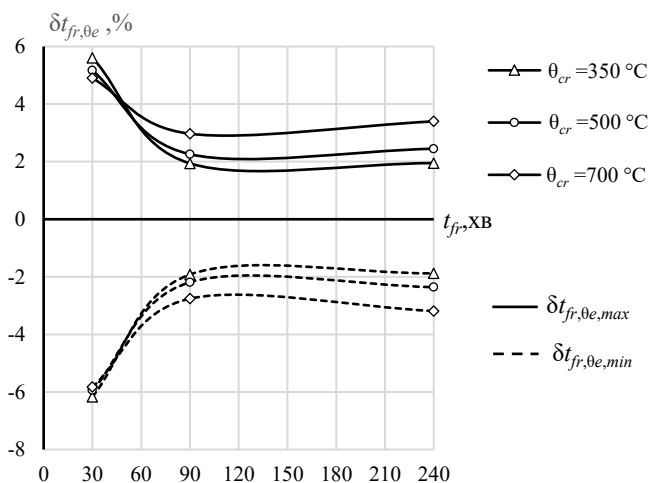


Рис. 3. Залежності різниць $\delta t_{fr,\theta_e,min}$ і $\delta t_{fr,\theta_e,max}$ від проміжку часу t_{fr} для різних значень критичної температури θ_{cr}

Для опису залежності різниці $\delta t_{fr,\theta_e}$ від відхилу d_e , проміжку часу t_{fr} і критичної температури θ_{cr} застосовано таке рівняння (модель) лінійної регресії:

$$\delta t_{fr,\theta_e} = a_0 + a_1 d_e + a_2 d_e t_{fr} + a_3 \theta_{cr} + a_4 d_e \theta_{cr} + a_5 d_e t_{fr} \theta_{cr} + a_6 t_{fr} \theta_{cr} + a_7 t_{fr}, \quad (12)$$

де a_0 — a_7 — коефіцієнти регресії.

Розв'язуючи рівняння (12) за даними щодо різниці $\delta t_{fr,\theta_e}$, поданими в табл. 4, із використанням програми для роботи з електронними таблицями Microsoft Excel визначено значення коефіцієнтів регресії, які наведено в табл. 5. В табл. 4 також подано розрахункові значення різниці $\delta t_{fr,\theta_e,calc}$, отримані за рівнянням (12) із використанням визначених коефіцієнтів регресії, а також відхил між різницями $\delta t_{fr,\theta_e,calc}$ і $\delta t_{fr,\theta_e}$ (стандартний (середньо квадратичний) відхил дорівнює $0,22\%$). За показником коефіцієнта детермінації R^2 оцінено якість моделі. R^2 має значення $0,997$, що свідчить про її гарну якість. За результатами перевіряння моделі за критерієм Фішера ($F = 794,6$) з рівнем надійності $0,95$ визначено, що модель є адекватною.

Таблиця 4. Дані для розрахунку коефіцієнтів регресії, наведених у рівнянні (12)

$\delta t_{fr, \theta_{cr}}, \%$	$d_{cr}, \%$	$t_{fr}, \text{хв}$	$\theta_{cr}, \text{°C}$	$\delta t_{fr, \theta_{cr}, calc}, \%$	$\delta t_{fr, \theta_{cr}, calc} - \delta t_{fr, \theta_{cr}}, \%$
-6,17	5,925	30	350	-6,12	0,05
-5,94	5,890	30	500	-5,98	-0,04
-5,83	5,875	30	700	-5,84	-0,01
-1,92	2,5	90	350	-2,29	-0,37
-2,19	2,5	90	500	-2,46	-0,27
-2,76	2,5	90	700	-2,68	0,08
-1,88	2,5	240	350	-1,74	0,14
-2,36	2,5	240	500	-2,38	-0,02
-3,19	2,5	240	700	-3,22	-0,03
0	0	30	350	0,12	0,12
0	0	30	500	0,08	0,08
0	0	30	700	0,03	0,03
0	0	90	350	0,08	0,08
0	0	90	500	0,07	0,07
0	0	90	700	0,04	0,04
0	0	240	350	0,00	0,00
0	0	240	500	0,03	0,03
0	0	240	700	0,07	0,07
5,61	-4,861	30	350	5,24	-0,37
5,17	-4,871	30	500	5,10	-0,07
4,90	-4,878	30	700	4,91	0,01
1,94	-2,5	90	350	2,46	0,52
2,26	-2,5	90	500	2,59	0,33
2,97	-2,5	90	700	2,77	-0,20
1,95	-2,5	240	350	1,73	-0,22
2,45	-2,5	240	500	2,43	-0,02
3,40	-2,5	240	700	3,37	-0,03

Таблиця 5. Результати розрахунку коефіцієнтів регресії, наведених у рівнянні (12)

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
0,249	-1,253	0,00492	-0,000318	0,000428	-0,0000092	0,00000225	-0,00138

Із аналізу даних, наведених в табл. 3, також впливає, що через відмінність фактичної початкової температури сталевих конструкцій від її номінальної величини різниця між вимірним і заданим проміжками часу до досягнення критичної температури (позначимо цю різницю $\delta t_{fr, \theta_0}$) може змінюватись у межах від $-2,82\%$ до $1,38\%$. Величина цієї різниці суттєво залежить від значення критичної температури, а вплив проміжку часу t_{fr} значно менший. На рис. 4 зображено залежності від критичної температури різниці $\delta t_{fr, \theta_0, min}$, отриманої за умови, що початкова температура сталевих конструкцій дорівнює її мінімально допустимому значенню (варіант № 3), і різниці $\delta t_{fr, \theta_0, max}$ — для максимально допустимого значення (варіант № 4). З підвищенням критичної температури від 350 °C до 700 °C величина зазначених різниць зменшується в середньому у 4,5 раза. Підвищення проміжку часу t_{fr} від 30 хв до 240 хв призводить до збільшення величини різниць в середньому у 1,4 раза.

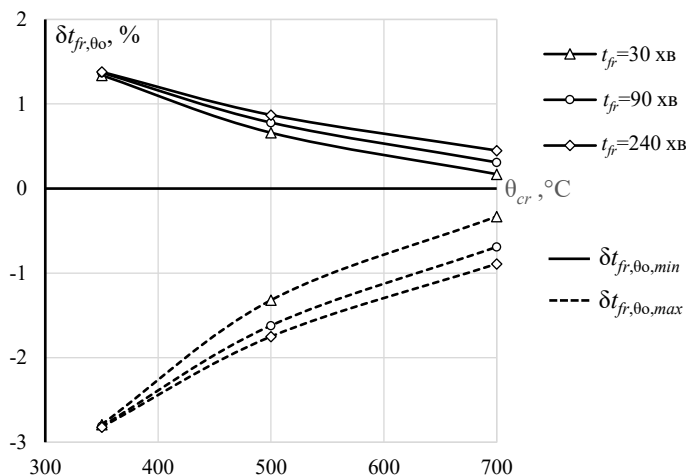


Рис. 4. Залежності різниць $\delta t_{fr,\theta_0,min}$ і $\delta t_{fr,\theta_0,max}$ від критичної температури θ_{cr} для різних значень проміжку часу t_{fr}

Для опису залежності різниці $\delta t_{fr,\theta_0}$ від початкової температури θ_0 , проміжку часу t_{fr} і критичної температури θ_{cr} застосовано таке рівняння (модель) лінійної регресії:

$$\delta t_{fr,\theta_0} = a_0 + a_1\theta_0 + a_2\theta_0 t_{fr} + a_3\theta_{cr} + a_4\theta_0\theta_{cr} + a_5\theta_0 t_{fr}\theta_{cr} + a_6 t_{fr}\theta_{cr} + a_7 t_{fr}, \quad (13)$$

де a_0 — a_7 — коефіцієнти регресії.

Розв'язуючи рівняння регресії (13) за даними щодо різниці $\delta t_{fr,\theta_0}$, поданими в табл. 6, із застосуванням програми для роботи з електронними таблицями Microsoft Excel, визначено значення коефіцієнтів регресії, які наведено в табл. 7. В табл. 6 також подано розрахункові значення різниці $\delta t_{fr,\theta_0,calc}$, отримані за рівнянням (13) із використанням визначених коефіцієнтів регресії, а також відхил між різницями $\delta t_{fr,\theta_0,calc}$ і $\delta t_{fr,\theta_0}$ (стандартний відхил дорівнює 0,12%). Коефіцієнт детермінації R^2 має значення 0,992, що свідчить про гарну якість моделі. Модель є адекватною за критерієм Фішера ($F = 346,0$) з рівнем надійності 0,95.

Таблиця 6. Дані для розрахунку коефіцієнтів регресії, наведених у рівнянні (13)

$\delta t_{fr,\theta_0}$, %	θ_0 , °C	t_{fr} , XB	θ_{cr} , °C	$\delta t_{fr,\theta_0,calc}$, %	$\delta t_{fr,\theta_0,calc} - \delta t_{fr,\theta_0}$, %
1,34	10	30	350	1,30	-0,04
0,66	10	30	500	0,81	0,15
0,17	10	30	700	0,15	-0,02
1,37	10	90	350	1,31	-0,06
0,78	10	90	500	0,85	0,07
0,31	10	90	700	0,23	-0,08
1,38	10	240	350	1,35	-0,03
0,87	10	240	500	0,96	0,09
0,45	10	240	700	0,43	-0,02
0,00	20	30	350	-0,02	-0,02
0,00	20	30	500	-0,01	-0,01
0,00	20	30	700	0,00	0,00

Продовження таблиці 6

0,00	20	90	350	-0,02	-0,02
0,00	20	90	500	-0,01	-0,01
0,00	20	90	700	0,00	0,00
0,00	20	240	350	-0,01	-0,01
0,00	20	240	500	-0,01	-0,01
0,00	20	240	700	0,00	0,00
-2,79	40	30	350	-2,65	0,14
-1,32	40	30	500	-1,65	-0,33
-0,33	40	30	700	-0,31	0,02
-2,81	40	90	350	-2,67	0,14
-1,62	40	90	500	-1,73	-0,11
-0,69	40	90	700	-0,47	0,22
-2,82	40	240	350	-2,73	0,09
-1,75	40	240	500	-1,93	-0,18
-0,89	40	240	700	-0,86	0,03

Таблиця 7. Результати розрахунку коефіцієнтів регресії, наведених у рівнянні (13)

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
4,967	-0,25	0,0000873	-0,00677	0,000341	-0,000000313	0,0000062	-0,00169

Запропонована процедура визначення допустимих відхилів проміжку часу до досягнення критичної температури сталевих конструкцій під час проведення валідаційних експериментів у процесі автоматизованого керування тепловим станом цих конструкцій є такою: в експерименті вимірюють температуру сталевих конструкцій θ_a у різні проміжки часу теплового впливу t за стандартного температурного режиму $\theta_s(t)$ (див. рис. 1). За цими даними для кожної сталеві конструкції визначають фактичний (вимірний) проміжок часу $t_{fr,meas}$ до досягнення заданої критичної температури θ_{cr} і за формулою (2) обчислюють його відхил $\delta t_{fr,meas}$ від заданого значення $t_{fr,requ}$.

За формулою (5) для кожної сталеві конструкції розраховують відхил δt_{inst} , що зумовлений властивостями засобів вимірювальної техніки. Значення інструментальних похибок засобів вимірювання δt_{thermo} , $\delta t_{device,\theta}$ і $\delta t_{device,d}$, необхідні для цього розрахунку, визначають за результатами їхнього калібрування або за даними, наведеними в нормативних документах.

За рівняннями (12) і (13) для кожної сталеві конструкції обчислюють відхили $\delta t_{fr,\theta e}$ і $\delta t_{fr,\theta o}$, що зумовлені відхилом фактичного від номінального температурного режиму в печі й відхилом фактичної від номінальної початкової температури, а за формулою (6) — значення відхилу δt_{syst} .

За формулами (3) і (4) для кожної сталеві конструкції розраховують мінімальне і максимальне значення допустимого відхилу $\delta t_{permis,min}$ і $\delta t_{permis,max}$ результату вимірювання проміжку часу $t_{fr,meas}$ до досягнення заданої критичної температури θ_{cr} від його заданого значення $t_{fr,requ}$.

Наведемо приклад застосування запропонованої процедури для сталевій конструкції, що має товщину покриву 8,78 мм та задані значення проміжку часу і критичної температури, які становлять 30 хв і 350 °С. Нехай в експерименті початкова температура сталевій конструкції складала 30 °С, а вимірний проміжок часу до досягнення заданої критичної температури дорівнює 31,0 хв.

Обчислений за формулою (2) відхил $\delta t_{fr, meas}$ фактичного від заданого значень проміжку часу становить 3,33%.

Задамо такі значення інструментальної похибки засобів вимірювання δt_{thermo} , $\delta t_{device, \theta}$ і $\delta t_{device, d}$. Для термодатчиків типу *K* згідно з EN 60584-1:2013 похибка δt_{thermo} становить $\pm 0,75\%$. Для вимірювальної системи на основі аналого-цифрового перетворювача за результатами калібрування похибка $\delta t_{device, \theta}$ дорівнює $\pm 0,35\%$. Для засобу вимірювання товщини покриву за результатами калібрування визначено абсолютну похибку, яка складає $\pm 0,10$ мм. Тоді для сталевій конструкції, яка має товщину покриву 8,78 мм, відносна похибка $\delta t_{device, d}$ дорівнює $\pm 1,14\%$. Обчислений за формулою (5) відхил δt_{inst} , що зумовлений властивостями засобів вимірювальної техніки, становить $\pm 1,55\%$.

Розглянемо два варіанти стосовно відносного відхилення d_e фактичного від номінального температурного режиму в печі під час експерименту. Для одного з них припустимо, що розрахований за формулою (8) для проміжку часу $t_{fr, meas}$ відхил d_e дорівнює $-2,0\%$, а для іншого $-3,0\%$. Обчислені для цих варіантів за рівняннями (12) і (13) відхилення $\delta t_{fr, \theta e}$ і $\delta t_{fr, \theta o}$, а також розраховані за формулами (3) і (4) мінімальне і максимальне значення допустимого відхилення $\delta t_{permis, min}$ і $\delta t_{permis, max}$ результату вимірювання проміжку часу $t_{fr, meas}$ до досягнення заданої критичної температури θ_{cr} від його заданого значення $t_{fr, requ}$ подані в табл. 8.

Таблиця 8. Результати розрахунку допустимих відхилів $\delta t_{permis, min}$ і $\delta t_{permis, max}$

d_e	$\delta t_{fr, \theta e}$	$\delta t_{fr, \theta o}$	δt_{syst}	δt_{inst}	$\delta t_{permis, min}$	$\delta t_{permis, max}$	$\delta t_{fr, meas}$
-2,0	2,22	-1,33	0,89	$\pm 1,55$	-0,66	2,44	3,33
-3,0	3,28	-1,33	1,95	$\pm 1,55$	0,62	3,50	3,33

Із аналізу даних, наведених в табл. 8, випливає, що умова (1) щодо прийнятності результату ($t_{fr, meas} = 31,0$ хв), отриманого для наведеної вище сталевій конструкції, виконується для варіанта з відхиленням d_e , який становить $-3,0\%$, а для іншого варіанта з відхиленням $-2,0\%$ фактичний відхил $\delta t_{fr, meas}$ знаходиться за межами допустимого інтервалу $[\delta t_{permis, min}; \delta t_{permis, max}]$.

Варто зазначити, що для прийнятності результатів валідаційних експериментів, які виконують у процесі автоматизованого керування тепловим станом сталевих конструкцій, необхідно виконання умови (1) для всіх застосованих сталевих конструкцій. Враховуючи те, що задані значення проміжку часу і критичної температури для цих сталевих конструкцій не є однаковими, різними для них будуть також розраховані за рівняннями (12) і (13) відхилення $\delta t_{fr, \theta e}$ і $\delta t_{fr, \theta o}$ і допустимі відхилення $\delta t_{permis, min}$ і $\delta t_{permis, max}$, обчислені за формулами (3) і (4).

У подальшому потенційно перспективними є дослідження, які спрямовані на верифікацію запропонованої процедури визначення допустимих відхилів теплового стану сталевих конструкцій шляхом застосування методів імітаційного і натурного експериментів.

Висновки

Розроблено процедуру визначення допустимих відхилів фактичних (вимірних) від заданих значень проміжку часу до досягнення критичних температур сталевих конструкцій під час проведення валідаційних експериментів у процесі автоматизованого керування тепловим станом цих конструкцій, яка ґрунтується на врахуванні інструментальних похибок застосованих засобів вимірювальної техніки та відхилів фактичного від номінального температурного режиму в печі й фактичної від номінальної початкової температури сталевих конструкцій.

Оцінено значення складових зазначених допустимих відхилів і встановлено, що через відхил фактичного від номінального температурного режиму в печі під час валідаційних експериментів різниця між вимірним і заданим проміжками часу до досягнення заданих критичних температур може змінюватись від $-6,2\%$ до $5,6\%$, а через відмінність фактичної початкової температури сталевих конструкцій від її номінальної величини — від $-2,8\%$ до $1,4\%$. Виявлено вплив заданого проміжку часу до досягнення критичної температури сталевих конструкцій й її величини на зазначені складові допустимих відхилів і визначено аналітичні залежності, прийнятні для їхнього оцінювання.

Це дало змогу сформуванати ефективні алгоритми автоматизованого керування тепловим станом сталевих конструкцій з урахуванням валідації запропонованих методів оцінювання теплових показників вогнезахисних покриттів.

Література

Васильків, Н. (2010). Метод корекції похибки вимірювання температури неоднорідними термопарами. *Вісник Хмельницького національного університету*, 2, 168—173. https://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/2010_2/32vas.pdf.

Кочан, В. (2020). Зменшення впливу неоднорідності термопар на результат вимірювання температури. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*, 3(13), 129—137. <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2020.13.129>.

Кочан, О. (2009). Експериментальне дослідження методичної похибки термоелектричних перетворювачів з керованим профілем температурного поля. *Видавництво Львівська політехніка*, 639, 62—69. https://vlp.com.ua/files/09_4.pdf.

Круковський, П., Новак, С., Поклонський, В., Єременко, С., Фролов, Г. (2021). *Оцінка вогнестійкості металевих будівельних конструкцій та вогнезахисної здатності покриттів (розрахунково-експериментальний підхід)* (російською мовою). Київ: Франко Пак.

Курилов, А., Козін, В. (2015). *Теплотехнічні вимірювання і прилади*. Суми: Сумський державний університет.

Новак, С., Добростан, О., Долішній, Ю., Ратушний, О. (2017). Оцінювання збіжності результатів експериментального визначення тривалості вогневого впливу до досягнення критичної температури сталі. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*, 2(4), 67—72. http://nbuv.gov.ua/UJRN/sbcps_2017_2_11.

Новак, С., Дрижд, В., Добростан, О., Новак, М. (2022) Вплив теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів на тепловий стан сталевих колон за стандартного температурного режиму. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*, 1(13), 88—110. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.1.88-110>.

Новак, С., Новак, М., Пустовий, М. (2023). Вплив відхилю температури в печі від номінального режиму на результати випробування сталевих конструкцій на вогнестійкість. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*, 2(16), 88—104. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2.88-104>.

Новак, С., Добростан, О., Пустовий, М. (2023). Визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості несучих сталевих конструкцій з різною початковою температурою. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*, 2(16), 4—21. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2.4-21>.

Новак, С., Добростан, О., Пустовий, М., Новак, М. (2024). Коригування проміжку часу до досягнення критичної температури для випробних зразків захищених сталевих конструкцій. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*, 1(17), 71—84. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2024.1.71-84>.

Новак, М., Смітюх, Я. (2024). Автоматизація керування тепловим станом сталевих конструкцій будівель харчової промисловості на основі валідації модифікованих методів визначення теплових показників їхніх вогнезахисних покривів. *Наукові праці НУХТ*, 30(5), 7—24. <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2024-30-5-3>.

Туз, Ю., Козир, О., Червона В. (2015). Ідентифікація динамічних характеристик термоперетворювачів. *Механіка гіроскопічних систем*, 30, 53—61. <http://dx.doi.org/10.20535/0203-377130201570288>.

Archambeault, B., Connor, S. (2008). Proper model validation is important for all EMI/EMC applications. *Proc. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility EMC 2008*, 1—8. <https://doi.org/10.1109/IEMC.2008.4652152>.

Godoy, L., Dardati, P. (2001). Validación de modelos en mecánica computacional. *Mecanica Computacional*, 20, 663—670.

Kee, Y., Asako, Y., Ken, T., Sidik, N. (2020) Uncertainty of temperature measured by thermocouple. *Journal of advanced research in fluid mechanics and thermal sciences*, 68(1), 54—62. <https://doi.org/10.37934/arfmts.68.1.5462>.

Pansiot, B., Allard, F., Désilets, M., Lalancette, F., Blais, A. (2024). Error correction for temperature measurement in insulating material: Application to the aluminum electrolysis cell. *International journal of thermal sciences*, 195, 108682. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108682>.

Pope, I., Hidalgo, J., Torero, J. (2021). A correction method for thermal disturbances induced by thermocouples in a low-conductivity charring material. *Fire safety journal*, 120, 103077. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103077>.

Pope, I., Hidalgo, J., Hadden, R., Torero, J. (2022). A simplified correction method for thermocouple disturbance errors in solids. *International journal of thermal sciences*, 172(A), 107324. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.107324>.

Sultan, M. (2010). Performance of Different Temperature Sensors in Standard Fire Resistance Test Furnaces. *Fire Technology*, 46(4), 853—881. <https://doi.org/10.1007/s10694-010-0166-9>.

Woolley, J., Woodbury, K. (2011). Thermocouple data in the inverse heat conduction problem. *Heat transfer engineering*, 32(9), 811—825. <https://doi.org/10.1080/01457632.2011.525468>.

УДК 681.5

STUDY OF ADAPTIVE HUMAN-MACHINE INTERFACES AND THEIR INTEGRATION INTO AUTOMATED BAKERY PRODUCTION SYSTEMS

V. Poddukin

National University of Food Technologies

Key words:

*Automation
Bakery industry
Robotics
Intelligent sensors
Machine vision
Process monitoring
Operator interface
Automation*

Article history:

Received 11.07.2025
Received in revised form
29.07.2025
Accepted 13.08.2025

Corresponding author:

V. Poddukin

E-mail:

poddukinvladimir@gmail.com

Citation: Поддукін В. В. (2025). Дослідження адаптивних людино-машинних інтерфейсів та їхньої інтеграції в автоматизовані системи хлібопекарського виробництва. *Наукові праці НУХТ*, 31(4), 23—39. DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-4-4

ABSTRACT

An analysis of current trends in the automation of bakery production processes is presented in the article. The key directions of development of automated process control systems (APCS) in the bakery industry, including the introduction of robotic systems, intelligent sensor systems and machine vision technologies, were considered. The issues of improving the subsystem of technological monitoring and control of emergency situations in bakery production were considered. The existing problems of data visualization by the operator were analyzed and the introduction of the High Performance HMI (HP HMI) concept as a tool for improving the efficiency of detecting, diagnosing and responding to emergency situations was proposed. The advantages of using HP HMI over traditional approaches in the context of decision-making speed, reducing the likelihood of human error and increasing the reliability of the technological process were substantiated. Based on a review of the research, the main advantages of automation related to increasing production efficiency, ensuring product quality stability and cost optimization were highlighted. The factors limiting the pace of automation of bakery enterprises, in particular, the high cost of equipment and the lack of qualified personnel, were analyzed. A promising concept of "Bakery 4.0", which is based on the comprehensive digitalization of production processes and the introduction of cyber-physical systems was proposed. The need to develop scientifically methods for the design and operation of automated bakery complexes, taking into account the specifics of technological processes and requirements for the quality of finished products, was emphasized. It was concluded that there was a significant potential for further automation of the bakery industry and the expediency of conducting interdisciplinary research at the intersection of food engineering, robotics and information technology.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-4-4

ДОСЛІДЖЕННЯ АДАПТИВНИХ ЛЮДИНО-МАШИНИХ ІНТЕРФЕЙСІВ ТА ЇХНЬОЇ ІНТЕГРАЦІЇ В АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ ХЛІБОПЕКАРСЬКОГО ВИРОБНИЦТВА

В. В. Поддукін

Національний університет харчових технологій

У статті представлено аналіз сучасних тенденцій автоматизації процесів хлібобулочного виробництва. Визначено ключові напрями розвитку автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУ ТП) у хлібопекарській промисловості, включаючи впровадження роботизованих систем, інтелектуальних сенсорних систем і технологій машинного зору. Розглянуто питання удосконалення підсистеми технологічного моніторингу та контролю позаштатних ситуацій у хлібопекарському виробництві. Проаналізовано існуючі проблеми візуалізації даних оператором і запропоновано впровадження концепції High Performance HMI (HP HMI) як інструменту підвищення ефективності виявлення, діагностики та реагування на позаштатні ситуації. Обґрунтовано переваги використання HP HMI над традиційними підходами в контексті швидкості прийняття рішень, зниження ймовірності людської помилки та підвищення надійності технологічного процесу.

На основі огляду сучасних досліджень виділено основні переваги автоматизації, пов'язані з підвищенням ефективності виробництва, забезпеченням стабільності якості продукції та оптимізацією витрат. Проаналізовано фактори, що обмежують темпи автоматизації хлібопекарських підприємств, зокрема високу вартість обладнання та недостатність кваліфікованого персоналу. Запропоновано перспективну концепцію «Пекарня 4.0», яка базується на комплексній цифровізації виробничих процесів і впровадженні кіберфізичних систем. Наголошується на необхідності розробки науково обґрунтованих методів проєктування та експлуатації автоматизованих хлібопекарських комплексів з урахуванням специфіки технологічних процесів і вимог до якості готової продукції. Зроблено висновки про значний потенціал для подальшої автоматизації хлібопекарської промисловості та доцільність проведення міждисциплінарних досліджень на стику харчової інженерії, робототехніки та інформаційних технологій.

Ключові слова: *автоматизація, хлібопекарська промисловість, робототехніка, інтелектуальні датчики, машинний зір, технологічний моніторинг, операторський інтерфейс, автоматизація.*

Постановка проблеми. Хлібопекарська галузь України охоплює підприємства різного масштабу — від великих комбінатів до мініпекарень. Щоб задовольнити попит населення, виробники дедалі частіше впроваджують автоматизовані рішення, які спрощують виробничі процеси та підвищують ефективність. Це дає змогу підтримувати широкий асортимент продукції з традиційних інгредієнтів, зберігаючи якість і доступність хлібобулочних виробів.

Хлібопекарська галузь характеризується високими вимогами до стабільності технологічного процесу, точності дотримання рецептур і термічних режимів. Позаштатні ситуації, пов'язані з порушенням параметрів або виходом обладнання з ладу, можуть призводити до зниження якості продукції або зупинки виробництва. У цьому контексті надзвичайно важливою є ефективна система моніторингу, яка дає змогу оператору оперативно виявляти відхилення та приймати обґрунтовані рішення (Hollifield, Oliver, Nimmo, & Habibi, 2008).

Мета дослідження: дослідити адаптивні людино-машинні інтерфейси та можливість їхньої інтеграції в автоматизовані системи управління на харчових підприємствах.

Матеріали і методи. Матеріалами дослідження є людино-машинні інтерфейси та автоматизовані системи управління.

Методи дослідження: аналітичні, методи оцінювання і порівняння існуючої графіки з людино-машинними інтерфейсами, інтеграція високоефективних ЛМІ в автоматизовані системи хлібопекарського виробництва.

Викладення основних результатів дослідження. Хлібопекарська галузь України займає одне з ключових місць в агропромисловому комплексі країни, оскільки постачає населенню важливу для здоров'я продукцію, впливає на харчову безпеку держави та перебуває під контролем цінової політики країни.

У сучасних автоматизованих виробництвах однією з ключових складових ефективного функціонування є система моніторингу та керування технологічними процесами. Особливо це стосується галузі хлібопекарства, де постійний контроль за технологічними параметрами забезпечує високу якість продукції. Одним з основних елементів таких систем є людино-машинні інтерфейси (НМІ), які використовуються для взаємодії операторів з автоматизованими системами управління (рис. 1).

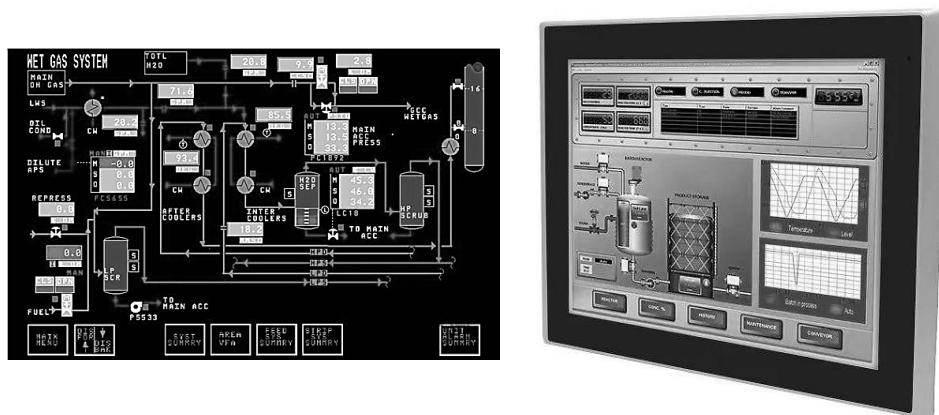


Рис. 1. Людино-машинний інтерфейс

Згідно з офіційними даними Держстату, найбільшу частку виробництва хліба в Україні займає пшеничний хліб — 52%. На хліб житній і хліб, виготовлений із суміші пшеничного та житнього борошна, припадає 33%. Булочні вироби складають 24% від загального обсягу виробництва хліба нетривалого зберігання. З 2000 р. виробництво хліба та хлібобулочних виробів в Україні зменшилось з 2,55 млн т

до 1,15 млн т.

Ці зміни, а також інші фактори, призвели до того, що хлібопекарська галузь стала менш привабливою як для українських інвесторів, так і іноземних. На сьогодні в Україні майже немає хлібо заводів, де використовуються іноземні інвестиції.

Ці процеси негативно впливають на розвиток галузі: спостерігається відставання від сучасних світових тенденцій у технології виробництва хліба та інших борошняних виробів. Оскільки підприємства працюють в умовах обмеженої рентабельності, вони не мають можливості впроваджувати новітні технології або закуповувати сучасне обладнання, адже це призводить до значного збільшення собівартості продукції, що робить такі інвестиції економічно недоцільними.

Розвиток новітніх технологій призвів до появи High Performance HMI (HP HMI) — інтерфейсів високої ефективності, що суттєво покращують процеси моніторингу та управління (рис. 2). У пропонованій статті розглядається порівняння традиційних підходів до створення HMI з новітніми розробками в цій галузі, а також вплив їх інтеграції на ефективність роботи оператора лінії випікання хліба. Людино-машинний інтерфейс (HMI) — це система, яка дає змогу операторам взаємодіяти з автоматизованими системами управління за допомогою графічних або текстових елементів. У традиційних системах HMI основна увага приділяється простому відображенню інформації, а також забезпеченню базових функцій моніторингу і керування технологічним процесом. В автоматизованих системах хлібопекарського виробництва HMI використовується для контролю температури, вологості, часу випікання, а також для відстеження технічних параметрів, таких як стан обігрівачів, конвеєрних ліній, дозаторів тощо.



Рис. 2. HP HMI

Традиційно HMI в автоматизованих системах характеризуються пасивними інтерфейсами, що відображають лише поточний стан процесів, а оператору необхідно вручну здійснювати налаштування та корекцію параметрів. Такі інтерфейси часто перевантажені великою кількістю даних, які оператору важко швидко інтерпретувати. Вони не забезпечують інтерактивність, а тому оператор отримує лише

статичні дані про стан технологічних процесів. Перевантаження інформацією знижує швидкість прийняття рішень, оскільки оператору доводиться фокусуватися на великій кількості не завжди актуальних показників. Ба більше, такі інтерфейси часто не включають індикації про критичні відхилення або несправності, що може привести до втрати важливого часу на виправлення помилок (Beysolow, 2017).

З іншого боку, High Performance HMI є еволюцією традиційних людино-машинних інтерфейсів, які враховують сучасні вимоги до швидкості, зручності й точності взаємодії оператора з автоматизованою системою. HP HMI спрямовані на покращення інтерфейсу користувача, зокрема через адаптивний дизайн, інтерактивність, використання кольорових індикацій і спрощене подання даних. Вони надають оператору не просто інформацію про стан технологічного процесу, а й дають змогу швидко реагувати на зміни. Такі інтерфейси забезпечують динамічне відображення даних, адаптуючи інтерфейс до змін у виробничих процесах. Візуальні сигнали, кольорові індикатори і спрощені графічні елементи дають змогу операторам швидше реагувати на відхилення від нормальних параметрів (Adobe Sensei AI Adobe Business).

Основною перевагою HP HMI є покращене сприйняття даних завдяки інтуїтивно зрозумілому поданню важливої інформації. Замість того, щоб переглядати всі показники одночасно, оператор отримує лише ті, які вимагають уваги, і візуально виділені на екрані. Крім того, кольорові індикатори (наприклад, червоний для критичних ситуацій або жовтий для попереджень) надають оператору можливість швидко зреагувати на зміни. Це значно підвищує ефективність прийняття рішень. Інтерактивність, що включає прості кроки для корекції налаштувань, а також автоматичні сповіщення про можливі проблеми, також підвищують надійність процесів. Система HP HMI виявляє аномалії на ранніх стадіях і знижує ймовірність помилок операторів, оскільки він отримує точну інформацію, яка не вимагає додаткової обробки.

Щоб продемонструвати різницю між традиційним HMI і HP HMI, можна порівняти приклади інтерфейсів на лінії випікання хліба. У традиційній системі оператор може бачити всі параметри технологічного процесу, але для того, щоб дізнатися про потенційні проблеми, йому доводиться вручну перевіряти всі показники. В той же час інтерфейс HP HMI візуально виділяє такі критичні показники, як температура або вологість, і дає чіткі вказівки на можливі корекції. Такі інтерфейси забезпечують швидку реакцію оператора, що є особливо важливим в умовах виробництва, де кожна затримка може призвести до втрати якості продукції або збільшення витрат (табл. 1).

Таблиця 1. Порівняльна характеристика HMI і HP HMI

Критерій	HMI	HP HMI
Дизайн	Яскравий, зображення обладнання, 3D-графіка, анімації	Мінімалістичний, монохромний або приглушені кольори, акцент на даних
Кольори	Насичені, часто без чіткої логіки (декоративні)	Використання кольору тільки для сигналізації проблем або відхилень

Інформативність	Орієнтований на вигляд (візуалізація обладнання)	Орієнтований на оперативну інформацію — дані, графіки, тренди
Навігація	Часто складна, з багатьма вкладками та кнопками	Оптимізована, швидкий доступ до ключових показників та функцій
Продуктивність оператора	Може знижуватись через візуальний шум і перенавантаження	Підвищується завдяки чіткості, простоті та зменшенню когнітивного навантаження
Виявлення аварій	Залежить від уваги оператора до кольорових зон або зображень	Проблеми виділяються одразу (через сигнальні кольори, графіки, алерти)
Навчання персоналу	Потрібно більше часу на освоєння інтерфейсу	Швидше навчання завдяки логіці, стандартизації, інтуїтивному підходу
Гнучкість і масштабованість	Часто прив'язаний до конкретного дизайну або об'єкта	Легко масштабується, стандартизується для всіх рівнів системи
Підтримка стандартів	Часто нестандартизований, залежить від розробника	Відповідає ISA-101, принципам HMI-дизайну в Індустрії 4.0

Традиційні НМІ створюють красиву «картинку», але можуть перевантажувати оператора і знижувати ефективність прийняття рішень. НР НМІ — це сучасний, функціональний, стандартизований підхід, який дає змогу операторам швидше реагувати на відхилення, краще контролювати процес і зменшити кількість помилок.

Інтеграція НР НМІ в автоматизовану систему хлібопекарського виробництва значно підвищує ефективність прийняття рішень. Оператори, маючи доступ до чіткої та структурованої інформації, здатні швидше реагувати на зміни в процесі, що, у свою чергу, знижує ймовірність помилок та підвищує якість кінцевої продукції. Встановлено, що впровадження НР НМІ позитивно впливає на оперативне управління виробництвом, оскільки значно скорочує час, необхідний для виявлення та усунення проблем.

Майже три десятиліття тому перед інженерами-контролерами постало нове завдання, до якого вони були погано підготовлені. Були встановлені системи управління з можливістю відображення графіки управління процесом у режимі реального часу для оператора. На той час не було доступних рекомендацій щодо того, що вважати «хорошою» графікою. В результаті була встановлена низькопродуктивна парадигма того, як повинен виглядати людино-машинний інтерфейс системи управління (НМІ), а інерція зробила все інше (Hollifield, 2021).

Недосконала робота ЛМІ спричиняла великі аварії. Тепер доступні принципи проєктування правильної технологічної графіки. Високопродуктивний людино-машинний інтерфейс (НРНМІ) має багато переваг, включаючи покращену обізнаність оператора про ситуацію та спостереження за процесом, краще виявлення та реагування на аномальну ситуацію, а також скорочення часу навчання для нових операторів. Багато промислових компаній докладають зусиль для вдосконалення графіки.

Високопродуктивні дисплеї відображають інформацію. Інформація — це дані, в контексті, які стають корисними. Графіки НРНМІ показують не тільки значення

процесу, але і те, де воно знаходиться відносно «що добре». Аномальні умови створені для того, щоб чітко виділятися. Колір використовується послідовно, ефективно й економічно. Графіка розроблена з дотриманням правильної ієрархії (Hollifield, 2021).

Кодуючи інформацію на дисплей, оператор може ефективно сканувати десятки значень за кілька секунд. Це сприяє спостереженню за процесом і ранньому виявленню відхилень. Ми не чекаємо сигналу тривоги, який вкаже на проблему. Найкращі знання про бажані умови експлуатації кодуються на дисплеї та в полі зору весь час, а не поховані в письмових процедурах. Зменшується варіативність у кваліфікації та знаннях окремих операторів.

Час навчання оператора також значно скорочується, оскільки важливі знання не набуваються випадково з досвідом. Це важливо, тому що більшість компаній втраять більше половини своїх досвідчених операторів та інженерів у найближчі 10 років.

Варто уникати надмірного і неправильного використання кольору. Один з важливих принципів полягає в тому, що колір сам по собі не використовується як єдиний дискримінатор важливої статусної умови. Ті ж самі кольори, призначені для сигналізації, не повинні використовуватися і для інших тривіальних цілей, зводячи до мінімуму їх значення.

Сигнали тривоги, зазвичай, позначаються простою зміною кольору значення процесу або його фону, що є поганою практикою. Стан тривоги повинен відображатися резервно закодованим (форма, колір, текст) елементом, що вказує на наявність і пріоритет сигналізації. Натискання на індикатор сигналу може викликати інформацію про його раціоналізацію. Кольори будильника не використовуються для цілей, не пов'язаних із сигналізацією.

Яскраві кольори використовуються для того, щоб привернути увагу до позаштатних ситуацій, а не показати нормальні. Сірий фон і приглушені кольори мінімізують відблиски та відблиски на екрані, сприяючи яскравому освітленню диспетчерської. Колірна палітра і правильне використання кожного кольору визначаються заздалегідь. НРНМІ — це не або усунення кольору, або просто перетворення графіки у відтінки сірого. Вбудовані тренди з індикаціями бажаного діапазону використовуються у всіх графіках НРНМІ. Можливість системи управління «тренд на вимогу» в реальній практиці працює погано.

Розробка ієрархії не повинна бути складною і дорогою роботою. Для існуючих систем більшість переваг НРНМІ можна отримати, створивши близько 20 нових дисплеїв, як правило, рівень 1, дюжина або близько того рівня 2 і кілька нових дисплеїв з ненормальною ситуацією. Існуючі графіки позначаються як Level 3. Це буде дещо непослідовно, але більшість існуючих графіків вже суперечливі. З часом рівень 3 можна покращувати.

У 2009 р. Науково-дослідний інститут електроенергетики (EPRI) провів масштабну перевірку цих концепцій людино-машинного інтерфейсу. Була підготовлена доповідь на тему «Приклад людино-машинного інтерфейсу оператора: оцінка існуючої «традиційної» графіки оператора порівняно з високопродуктивною графікою в симуляторі вугільної електростанції, ID 1017637». Обрана силова установка використовувала тренажер для навчання заводів протягом більше десятка

років. Під час тесту кілька операторів виявили та вирішили різні аномальні сценарії, використовуючи як звичну існуючу графіку, так і нову, графіку НРНМІ. НРНМІ забезпечив значне покращення роботи оператора в кількох сферах. Реакцію оператора на загальний тест найкраще можна підсумувати в цій цитаті: «Як тільки ви звикнете до цієї нової графіки, повернення до старих буде пеклом».

Як приклад сили інерції, багато сценаріїв заводу вимагають негайного зниження ставок вдвічі, або «зворотного ходу», щоб не опуститися до небажаного нульового виходу. Щоб виконати це стресове і важке завдання, оператори протягом десяти років навчалися використовувати свою звичайну графіку. Це передбачало використання дюжини різних екранів, деякі з них використовувалися для налаштування лише одного елемента. До цього випробування заводу не спадало на думку розробити будь-які спеціальні екрани для використання під час зворотного ходу, які містили б усі елементи керування й тенденції, необхідні для цього завдання. Для тесту було створено і використано кілька екранів НРНМІ runback.

Існує перевірена методологія із семи кроків для розробки високопродуктивного людино-машинного інтерфейсу:

Крок 1. Прийміть високопродуктивну філософію та посібник зі стилю НМІ з відповідними принципами.

Крок 2. Оцініть і порівняйте існуючу графіку з філософією НМІ.

Крок 3. Визначте конкретні показники продуктивності та цілі/завдання для управління процесом, такі як параметри безпеки, швидкість виробництва, ефективність, витрати та якість.

Крок 4. Аналіз завдань визначає, які елементи контролю необхідно контролювати та маніпулювати для досягнення виконання та цілей мети, визначаючи зміст кожного графіка 2 та 3 рівня.

Крок 5. Створюйте високопродуктивну графіку, дотримуючись філософії НМІ, вирішуючи визначені завдання.

Крок 6. Встановіть і введіть в експлуатацію та проведіть навчання щодо нового НМІ.

Крок 7. Контролюйте, підтримуйте та періодично переоцінюйте продуктивність людино-машинного інтерфейсу.

Інерція, а не вартість, є основною силою, що перешкоджає вдосконаленню ЛМІ. Оператори відразу ж бачать переваги порівняно з їхніми існуючими екранами, коли їм показують приклади концепцій НРНМІ. Дивно, але інженери, як правило, найбільш стійкі до змін. З огляду на реальні історії інцидентів, НРНМІ може забезпечити значну економію коштів.

Людино-машинний інтерфейс (НМІ) є основним інструментом для успішного виконання процесу. Оператор повинен досягти успіху, щоб завод досяг успіху. Системам сигналізації приділяється значна увага, але вони є лише невеликою частиною людино-машинного інтерфейсу оператора. Замість того, щоб виправдовувати створення хорошого ЛМІ, ми б запитали себе: «Чи було виправдання для встановлення поганого ЛМІ взагалі?» Виправимо те, що зламалося.

Складні системи управління нині працюють за допомогою неефективних і проблемних людино-машинних інтерфейсів, розроблених без належних знань. Продуктивність оператора може бути значно покращена за допомогою людино-машинного інтерфейсу, що відображає правильні принципи. Високопродуктивний

людино-машинний інтерфейс є практичним, досяжним і доступним (Hollifield, 2021).

Коли інтерфейси SCADA (рис. 3) були вперше представлені, не існувало жодних рекомендацій чи стандартизації для графіки. Незважаючи на те, що існували загальні зображення НМІ, вони часто були неефективними через такі фактори, як невідповідності, неправильне використання кольорів і недостатня видимість тенденцій та інформації про стан обладнання, що були важливими для швидкого визначення того, як відбувається перебіг процесу. Зі збільшенням обчислювальної потужності зростала і доступна графіка, але практика дизайну зберігалася, хоча потреби операторів ігнорувалися. Часто оператори не могли легко визначити, що працює, або які відхилення відбулися (Nimmo, 2020).



Рис. 3. SCADA

Як правило, при проектуванні людино-машинного інтерфейсу недосконала графіка призводить до неефективних методів експлуатації. Людська помилка є основною причиною інцидентів безпеки в таких галузях, як видобуток нафти та газу, переробка нафти, хімічна промисловість, енергетика, гірничодобувна промисловість та залізничний транспорт, і витрати можуть бути катастрофічними. Наприклад, у 2015 р. під час аварії на нафтопереробному заводі в Техас-Сіті, в результаті якої загинуло 15 людей, 180 людей отримали поранення, а збитків було завдано на 1,5 млрд дол. США, недосконалий НМІ був названий важливим фактором, оскільки оператори не мали інструментів для прийняття обґрунтованих рішень.

У 2015 р. був опублікований стандарт проектування людино-машинного інтерфейсу ISA-101 (ISA-101: Enhancing Human-Machine Interface Design for Safer, Smarter Automation, 2019). Цей стандарт встановлює мінімальні вимоги до дисплеїв НМІ, включаючи їх дизайн, документацію та керування змінами. Дуже стисло ISA-101 надає загальні рекомендації з проектування та робочого процесу для розробки й управління системами людино-машинного інтерфейсу, включаючи управління змінами. Однак для ефективного проектування людино-машинного інтерфейсу необхідно зосередитися на ефективності оператора та створити екрани для

ситуаційної обізнаності та завдань оператора. Крім того, компаніям необхідно вийти за рамки ISA-101, щоб навчити операторів використовувати людино-машинні інтерфейси. Власники закладів повинні розробити чіткий документ з філософії НМІ та керівництво щодо стилю для системи НМІ. Для подальшого підвищення ефективності та зменшення людських помилок слід розробити програмні набори багаторазових елементів екрану. Важливо створити по-справжньому високопродуктивний людино-машинний інтерфейс (ISA-101 Human machine interfaces for process automation systems, 2022).

Мета високопродуктивного людино-машинного інтерфейсу полягає в наданні спрощених інтерфейсів, які прискорюють час реакції оператора та покращують вирішення проблем і сигналів тривоги, одночасно зменшуючи кількість помилок. Замість того, щоб відображати реальне представлення машини або процесу, операторам потрібна інформація, яка відображається таким чином, що її легко сканувати на наявність аномалій і виявляти області, які потребують подальшого дослідження та дій. Високопродуктивні людино-машинні інтерфейси включають екрани, орієнтовані на додатки, і персоналізовані екрани, які допомагають операторам досягати своїх цілей, витратити менше часу на пошук і навігацію, а також дають змогу приймати швидші та обґрунтовані рішення. Простота людино-машинного інтерфейсу також полегшує навчання наступного покоління операторів. Ефективний інтерфейс простий в освоєнні, забезпечує швидший час відгуку, а також безпечнішу роботу та вищу продуктивність (ISA-101: Enhancing human-machine interface design for safer, smarter automation, 2019).

Основні концепції високопродуктивного дизайну людино-машинного інтерфейсу: при розробці високопродуктивного людино-машинного інтерфейсу одним з основних принципів є використання рухомих аналогових індикаторів замість просто числових дисплеїв. Аналогові індикатори відобразять радіус дії приладу, покажуть аномально високі і низькі значення, а також високі-високі і низькі-низькі значення процесу. З цими аналоговими індикаторами оператору достатньо лише одного погляду, щоб зрозуміти статус процесу.

Основні поняття ІСА-101 включають, але не обмежуються ними (Human machine interfaces for process automation systems, 2022):

- використання вузької шкали дає змогу оператору бачити зміни миттєво без необхідності натискання клавіш;

- ефективне використання кольору є основоположним для високопродуктивних людино-машинних інтерфейсів, і кольори повинні використовуватися послідовно;

- використання світло-сірого кольору фону сприяє зменшенню відблисків та втоми оператора;

- мінімальна кількість кольорів переднього плану та використання їх помірно, щоб вказати на позаштатні ситуації та привернути увагу оператора;

- мінімізація використання статичного тексту, що називає або описує об'єкти, і збереження послідовності в абрєвіатурах;

- зображення реальних даних відрізняється від статичного тексту іншим кольором (зазвичай, синім) і вказівкою одиниць виміру.

Оптимізація інтерфейсу користувача (UI) зосереджується на зовнішньому ви-

гляді, відчутті та функціональності НМІ, тоді як оптимізація користувацького досвіду (UX) зосереджена на максимізації позитивного досвіду оператора під час використання НМІ. І те, і інше дуже важливо для загального успіху дизайну людино-машинного інтерфейсу. Коли обидва працюють разом (простий, приємний досвід, доповнений гарним зовнішнім виглядом і відчуттям), створюється ідеальний інтерфейс оператора.

Проектування людино-машинного інтерфейсу з урахуванням кінцевого користувача (оператора) вимагає концентрації та розуміння того, як оператор контролює та керує процесом, які його потреби, обмеження й очікування. Досвід має бути інтуїтивно зрозумілим, максимально простим і орієнтованим на реальні потреби, а не на «гарні картинки» (Best design practices: creating a high-performance HMI, 2024).

При проектуванні для передбачуваного користувача, оператора, не обов'язково намагатися врахувати потреби інших (керівників, інженерів та обслуговуючого персоналу). Мета полягає в тому, щоб оператори могли швидко виявляти відхилення від норми або пристрої, які потребують діагностики, без необхідності використання навчених сервісних інженерів для інтерпретації інформації.

При впровадженні ЛМІ на вже існуючому об'єкті (перепроєктування існуючого ЛМІ) може виникнути опір змінам, оскільки завжди здається, що легше дотримуватися відомого. Саме тут на допомогу приходить посібник з філософії та стилю НМІ. Ці документи можуть пояснити переваги високопродуктивного людино-машинного інтерфейсу та потенційні вигоди для операторів і компанії. Створення документа з філософії НМІ закладає основу для проектування НМІ та надає рекомендації щодо забезпечення наступності між кількома управлінськими рішеннями.

Посібник зі стилю — це детальний документ, специфічний для проекту, який включає всі аспекти макета екрана, включаючи колір, розмір лінії, розмір шрифту, об'єкти для насосів, клапанів і резервуарів, а також елементи навігації. Посібник із філософії та стилю НМІ допоможе отримати максимальну віддачу від системи керування та збільшити шанси на успіх проекту.

Посібник зі стилю також документує та допомагає стандартизувати об'єкти екрана, які використовуються для створення дисплеїв. Кожен об'єкт, розроблений відповідно до ISA-101, має свою функцію в системі управління і буде використовуватися в незмінному вигляді на всіх дисплеях. Об'єкти містяться в бібліотеці, що дає змогу спроектувати систему управління з використанням середовища перетягування. Ця методологія розробки призводить до меншої кількості помилок, коротшого часу розробки та нижчих витрат, а також до підвищення прибутковості.

Одні лише індивідуальні номери не підтримують операторів, особливо недосвідчених операторів, які можуть бути не в змозі інтерпретувати дані. Важливо надати шкалу, бажаний робочий діапазон, дальність сигналізації та індикатор хорошої, нормальної або поганої роботи. Також важливо вбудовувати інформацію в НМІ, де оператори можуть детально описати тривоги, потенційні проблеми і кроки до їх вирішення. Індикатори тривоги повинні відображатися декількома способами, різними кольорами, формами та текстом. Постійне надання видимих тенденцій, а не окремих екранів трендів або спливаючих вікон, дає змогу операторам

краще розуміти операції.

Сучасний високопродуктивний людино-машинний інтерфейс виходить далеко за рамки красивої, вражаючої графіки, щоб буквально максимізувати ефективність і точність оператора. Така ефективність, у свою чергу, впливає на продуктивність, зменшує кількість помилок, запобігає зупинкам і підвищує прибутковість. Незважаючи на страх змін, зручність у використанні та простоту високопродуктивних ЛМІ, таких як платформа Movicon.NExT, яка швидко завойовує операторів та забезпечує швидкі результати завдяки високомодульній та масштабованій платформі, економить час на розвиток та навчання операторів.

Movicon.NExT — це економічно ефективний та простий у впровадженні високопродуктивний НМІ, який є невеликою інвестицією для великих і позитивних змін. Це потужна платформа для проектів НМІ на базі Windows або Linux, систем диспетчерського управління SCADA та рішень корпоративної аналітики, створена для легкого розгортання з використанням технології перетягування, HTML 5, NET Framework та графіки WPF наступного покоління для покращення видимості підприємства.

У результаті дослідження було встановлено, що інтеграція високоефективних людино-машинних інтерфейсів в автоматизовані системи хлібопекарського виробництва має значний позитивний вплив на моніторинг і оперативне керування технологічними процесами. Порівняння традиційних НМІ з НР НМІ показує, що останні забезпечують значно більшу швидкість прийняття рішень і покращують якість взаємодії оператора з автоматизованою системою. Впровадження НР НМІ дає змогу зменшити час реакції на зміни в процесах і підвищити загальну ефективність виробництва, що робить цей підхід важливим етапом для модернізації хлібопекарських підприємств (Beysolow, 2017).

На сьогодні, в умовах розвитку цифрових систем управління підприємствами харчової та переробної промисловості для виготовлення безпечних продуктів здорового харчування, автоматизація є ключовим напрямом розвитку Індустрії 4.0 в Україні. Підприємство в ринкових умовах являє собою відкриту соціально-технічну систему, яка взаємодіє зі своїм зовнішнім середовищем і зацікавленими сторонами, відповідно, до теорії систем.

Апарат управління підприємством, який забезпечує отримання прибутку через виробничу діяльність, а також забезпечує комунікацію та інформаційне забезпечення з працівниками, є основним елементом існування підприємства, згідно з теорією прийняття рішень.

Управлінський підхід, заснований на теорії систем, дає змогу визначити основну модель підприємства, під якою розуміється цілеспрямована структура, де люди (кадри підприємства) визначають конкретні цілі та здійснюють необхідні дії для їх досягнення, працюючи з виробничими об'єктами та використовуючи ресурси підприємства. Як відомо, ефективність систем контролю та управління значною мірою залежить від правильного вибору функцій і типу технічних засобів. Функції таких систем можна поділити за призначенням на основні та допоміжні, а за змістом — на інформаційні, обчислювальні та керуючі. До основних функцій належать ті, що забезпечують досягнення цілей управління об'єкта або здійснення обміну інформацією між суміжними автоматичними системами контролю й авто-

мативованими системами керування. Допоміжні функції спрямовані на досягнення необхідного рівня точності, надійності та інших важливих показників якості роботи систем контролю та управління.

Функції управління — це комплекс операцій і процедур, які сприяють формуванню та реалізації керуючих впливів на об'єкт управління або систему автоматичного керування. Інформаційні функції управління включають набір операцій і процедур, що забезпечують отримання, обробку та представлення інформації про стан об'єкта управління або системи контролю й управління оперативному персоналу. Крім того, ці функції взаємодіють із системами планування, такими як MRP (планування виробничих ресурсів), а також надають інформацію про зовнішнє середовище (Winata та ін., 2021).

Серед основних проблем, що виникають під час технологічного моніторингу в умовах хлібопекарських підприємств, можна виокремити (Vovkina, 2022):

- низький рівень структурованості інформації на екранах НМІ;
- складність виявлення критичних ситуацій на фоні нормальної роботи системи;
- перевантаження інтерфейсів графічними деталями, що ускладнює аналіз;
- висока залежність від інтуїції та досвіду оператора під час прийняття рішень;
- відсутність інтегрованого механізму пріоритизації тривоги.

Ці чинники знижують ефективність оперативного реагування та підвищують ризик помилкових дій персоналу (Cohen, 1999).

High Performance HMI — це підхід до створення людино-машинного інтерфейсу, який ґрунтується на принципах когнітивної ергономіки, зменшення когнітивного навантаження та забезпечення швидкої обробки критичної інформації. Основні принципи HP HMI (Bishop, 1995):

- мінімалізм: відсутність надмірних графічних елементів, спрощення схем;
- колір як функція: кольори використовуються лише для індикації відхилень або тривоги;
- пріоритетність: акцент на ключових параметрах, що впливають на безпеку та якість;
- контекстна візуалізація: подання інформації у зрозумілому для оператора вигляді.

Упровадження HP HMI дає змогу:

- зменшити час реакції оператора на критичну подію;
- підвищити точність прийнятих рішень;
- поліпшити ситуаційну обізнаність;
- сприяти стандартизації візуалізації в межах підприємства.

Для впровадження HP HMI у хлібопекарському виробництві запропоновано такі кроки (Vovkina, 2022):

1. Виокремлення критичних вузлів (печі, тістоміси, бродильні камери).
2. Розробка єдиних шаблонів HMI-екранів відповідно до принципів HP HMI.
3. Створення системи візуального ранжування повідомлень за рівнем критичності.
4. Проведення тренінгів із нової логіки візуалізації та роботи з тривожними сигналами.
5. Інтеграція з SCADA-системою: забезпечення централізованого моніторингу

та аналітики позаштатних ситуацій.

Пілотне впровадження на одному з підприємств показало зниження середнього часу реакції оператора на аварійну ситуацію з 21 до 9 секунд та зменшення кількості помилкових втручань на 34% (Beysolow, 2017).

«Пекарня 4.0» — це концепція цифрової трансформації хлібопекарського виробництва, яка ґрунтується на принципах Індустрії 4.0. Її мета — інтеграція сучасних технологій для підвищення ефективності, якості продукції, гнучкості та сталого розвитку підприємств хлібопекарської галузі (рис. 4).

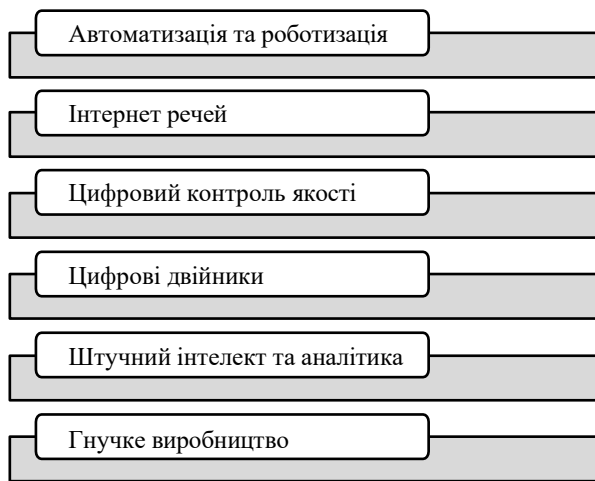


Рис. 4. Концепція «Пекарня 4.0»

Цілі «Пекарні 4.0» — підвищення енергоефективності, зменшення втрат і браку, прозорість і трасування всього виробничого процесу, швидка адаптація до змін на ринку, покращення санітарно-гігієнічних умов виробництва.

У хлібопекарському виробництві адаптивні НМІ можуть бути використані для моніторингу всіх етапів технологічного процесу, починаючи від прийому сировини та закінчуючи випіканням готових виробів. Наприклад, на етапі змішування борошна з іншими інгредієнтами система може відображати інформацію про параметри температури, вологості та часу, необхідного для досягнення оптимальних умов. На етапі випікання інтерфейс може динамічно адаптуватися, відображаючи змінні параметри печі, вологість повітря, час випікання та інші важливі показники (Хорольський, & Коренець, 2018).

Завдяки адаптивності НМІ оператор може швидко реагувати на будь-які зміни в технологічному процесі, виявляти й усувати потенційні проблеми до того, як вони стануть критичними. Це дає змогу значно знизити ризик браку, підвищити якість продукції та збільшити загальну ефективність виробництва.

Інтеграція адаптивних НМІ в автоматизовані системи хлібопекарського виробництва потребує створення єдиного інформаційного простору, який забезпечує зручний моніторинг і контроль усіх технологічних етапів. Для цього важливо забезпечити безперебійну передачу даних між різними підсистемами: від датчиків і

контролерів до центрального пульта управління (The High Performance HMI Handbook and You).

Ключовим елементом інтеграції є вибір правильної архітектури автоматизованої системи, яка повинна включати систему збору й обробки даних, що дає змогу відстежувати стан кожного етапу технологічного процесу в реальному часі. Ці дані повинні бути доступні операторам через інтуїтивно зрозумілі інтерфейси, які здатні адаптуватися до поточних умов виробництва. Для досягнення максимального ефекту інтерфейси мають включати функціональні можливості для аналізу та прогнозування, що дають змогу оперативно виявляти потенційні збої та автоматично коригувати параметри роботи (Chisnall, 2008).

Одна з важливих переваг адаптивних НМІ — це можливість інтеграції з іншими системами, такими як системи планування виробництва або управління складом. Це дає змогу створити єдину систему, яка забезпечує комплексний підхід до управління виробничими процесами. Інформація, отримана від різних підсистем, може бути оброблена і відображена на екрані у вигляді зручних діаграм, графіків і таблиць, щоб оператор міг швидко приймати обґрунтовані рішення (LeCun, Bengio, & Hinton, 2015).

Адаптивні НМІ дають змогу оператору в реальному часі отримувати точні дані про стан технологічного процесу. Візуалізація цих даних у вигляді графіків, діаграм або схем надає можливість швидко оцінити ситуацію та виявити можливі проблеми. Завдяки динамічному відображенню важливої інформації оператор може оперативно реагувати на будь-які зміни в технологічному процесі, мінімізуючи час на прийняття рішень. Завдяки адаптивним НМІ оператор може оптимізувати роботу всієї автоматизованої системи, коригуючи параметри процесу в реальному часі. Це знижує витрати на енергію, сировину і зменшує брак продукції. Інтерфейси, що адаптуються до умов виробництва, забезпечують мінімізацію помилок оператора, оскільки вони постійно пропонують лише релевантну інформацію та рекомендації для виконання операцій. За допомогою адаптивних НМІ оператор може більш точно налаштувати параметри виробництва, що сприяє покращенню якості продукції та підвищенню загальної ефективності процесу (Хорольський, Коренець, Шеїна, & Копайгора, 2018).

Хоча інтеграція адаптивних НМІ в автоматизовані системи хлібопекарського виробництва має значні переваги, існують і певні виклики, зокрема в контексті високих вимог до технічних характеристик та інтеграції з іншими системами. Одним із головних викликів є високі витрати на впровадження нових технологій і необхідність навчання персоналу (Kohavi, Deng, Xu, & Walker, 2013).

Однак з розвитком індустрії 4.0, а також завдяки швидкому розвитку технологій в галузі штучного інтелекту та машинного навчання, ці виклики можуть бути успішно подолані. Перспективи розвитку включають інтеграцію адаптивних НМІ з новими системами штучного інтелекту, що ще більше оптимізує процеси і забезпечить вищу ефективність управління (Mayer, & Moreno, 2003).

Інтеграція адаптивних людино-машинних інтерфейсів (НМІ) в автоматизовані системи хлібопекарського виробництва має великий потенціал для підвищення ефективності моніторингу й оперативного керування технологічними процесами (He, Zhang, Ren, & Sun, 2016). Це дасть змогу оптимізувати виробництво, знизити витрати, покращити якість продукції та забезпечити більш ефективне управління

всім виробничим процесом. Використання High Performance HMI у системах технологічного моніторингу хлібопекарського виробництва є ефективним підходом до підвищення надійності та безпеки процесу. Така модернізація значно покращить інтерпретацію інформації оператором, мінімізує вплив людського чинника та оптимізує роботу всієї виробничої системи. Надалі доцільним є розширення практики HP HMI на інші ділянки харчової промисловості (Khorolskyi, Korenets, & Ostapenko, 2018).

Висновки

У сучасному світі автоматизація виробництва стає важливою складовою ефективною діяльністю промислових підприємств, зокрема в харчовій промисловості, де особливу роль відіграє хлібопекарська галузь. У зв'язку з постійним підвищенням вимог до якості, продуктивності та безпеки виробів, застосування автоматизованих систем управління (АСУ) є необхідною умовою для підтримання конкурентоспроможності підприємства. Одним із важливих компонентів таких систем є людино-машинні інтерфейси (HMI), які забезпечують ефективну взаємодію оператора з автоматизованою системою.

Людино-машинні інтерфейси в системах автоматизації мають на меті зручне та інтуїтивно зрозуміле управління технологічними процесами, що особливо важливо в умовах швидкозмінюваних умов виробництва. Вони забезпечують оператору реальний час отримання даних про процеси, що відбуваються на виробництві, а також дають змогу оперативно реагувати на будь-які відхилення від нормального функціонування (Bengio, Courville, & Goodfellow, 2016).

Адаптивні людино-машинні інтерфейси — це інтерфейси, які здатні змінювати свій вигляд, функціональність або поведінку залежно від поточної ситуації на виробництві. Вони інтегрують інформацію про стан технологічного процесу та можуть динамічно налаштовувати відображення даних відповідно до потреб оператора.

Література

Хорольський, В. П., Коренець, Ю. М., Шеїна, А. В., Копайгора, О. К. (2018). Ідентифікація процесу приготування тіста в полі ультразвукових коливань. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*, 2(259), 115—123.

Хорольський, В. П., Коренець, Ю. М. (2018). Проектування робототехнологічного комплексу з виробництва хліба для територій з техногенним тиском. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*, 1(257), 256—263.

Adobe Sensei AI Adobe Business. Available at: <https://business.adobe.com/products/sensei/adobe-sensei.html>.

Bengio, Y., Courville, A., & Goodfellow, I. (2016). *Deep Learning*. Cambridge, MA: MIT Press.

Beysolow, T. (2017). Convolutional neural networks. In T. Beysolow (Eds.), *Introduction to Deep Learning Using R*. Apress Berkeley, CA. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-2734-3_5.

Best design practices: Creating a high-performance HMI (2024). Available at: <https://www.processonline.com.au/content/process-control-systems/sponsored/best-design-practices-creating-a-high-performance-hmi-1374659233>.

Bishop, C. M. (1995). Learning and generalization. In C. M. Bishop. *Neural Networks for Pattern Recognition*, Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198538493.003.0009>.

Chisnall, D. (2008). *The definitive guide to the Xen hypervisor*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

Cohen, F. (1999). Managing network security: simulating network security. *Network security*, 4, 6—13. [https://doi.org/10.1016/s1353-4858\(00\)80009-4](https://doi.org/10.1016/s1353-4858(00)80009-4).

He, K., Zhang, X., Ren, S., Sun, J. (2016). *Deep residual learning for image recognition*. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, NV, USA. <https://doi.org/10.1109/cvpr.2016.90>.

Hollifield, B. R. (2021). How to Maximize Operator Effectiveness with a High-Performance HMI. Available at: https://blog.isa.org/the-high-performance-hmi?utm_source.

Hollifield, B., & Oliver, D. Nimmo, I., Habibi, E. (2008). *High performance HMI handbook*. Plant Automation Services.

Human Machine Interfaces for Process Automation Systems (2022). Available at: https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-101-standards?utm_source.

ISA-101: Enhancing Human-Machine Interface Design for Safer, Smarter Automation (2019). Available at: https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-101-standards?utm_source.

ISA. (2015). ISA-101 Human-Machine Interfaces for Process Automation Systems. International Society of Automation.

Khorolskyi, V., Korenets, Yu., Ostapenko, I. (2018). Development of robototechnological complex of intellectual management by bread manufacturing for technological loading territories. *Technology audit and production reserves*, 1/3(39), 53—58.

Kohavi, R., Deng, A., Xu, Y., Walker, T. (2013). Improving the sensitivity of online controlled experiments by utilizing preexperiment data. 6th ACM international conference, Rome, Italy, 4—8 February 2013. <https://doi.org/10.1145/2433396.2433413>.

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

Mayer, R. E., Moreno, R. (2003). Nine Ways to Reduce Cognitive Load in Multimedia Learning. *Educational Psychologist*, 38(1), 43—52. https://doi.org/10.1207/s15326985ep3801_6.

Nimmo, I. (2015). Best Practices in High-Performance HMI Design. Control Global. Available at: <https://www.controlglobal.com/visualize/hmi/article/11380465/human-machine-interface-best-practices-in-high-performance-hmi-design>.

Vovkina, M. (2022). Підтримка стандарту High Performance HMI (ISA 101) у SCADA/HMI продукті Proficy FIX. Available at: <https://indusoft.com.ua/blog/2022/04/10/pidtrimka-standartu-high-performance-hmi-isa-101-u-scada-hmi-produkti-proficy-ifix/>.

Winata, G. I., Madotto, A., Lin, Z., Li, R., Yosinski, J., Fung, P. (2021). *Language Models are Few-shot Multilingual Learners*. Proceedings of the 1st Workshop on Multilingual Representation Learning, Punta Cana, Dominican Republic. Stroudsburg, PA, USA. <https://doi.org/10.18653/v1/2021.mrl-1.1>.

WORT BOILING PROCESS CONTROL OPTIMIZATION USING SYSTEM STATE ESTIMATION

M. Parovenko, O. Klymenko

National University of Food Technologies

Key words:

*Industrial control system
Wort boiling
Wort kettle with external
heater
System state estimation,
Kalman filter
MPC controller*

Article history:

Received 10.07.2025
Received in revised form
25.07.2025
Accepted 14.08.2025

Corresponding author:

M. Parovenko

E-mail:

cavyheavy@gmail.com

Citation: Паровенко М. Д.,
Клименко О. М. (2025).
Оптимізація керування
технологічним процесом
кип'ятіння суслу з викорис-
танням спостерігача для
оцінки стану системи. *Нау-
кові праці НУХТ*, 31(4),
40—51.

DOI: 10.24263/2225-2924-
2025-31-4-5

ABSTRACT

The results of a study aimed at optimizing the control of the wort boiling process in a wort kettle with an external heater by applying an advanced control strategy are presented in the article. This strategy ensures compliance with strict recipe constraints regarding boiling duration and total evaporation percentage, while maintaining stable beer quality. Unlike the classical open-loop control of steam flow to the heater, the study proposed a closed-loop control of the wort volume in the kettle via steam flow regulation. The wort volume in the kettle was estimated in real time using a Kalman filter based on measurements of the level, wort density in the kettle, and the condensate flow rate resulting from evaporation. The estimated volume was passed to a Model Predictive Control (MPC) controller that predicts system dynamics over a specified horizon, minimizes the deviation from the target volume profile, and generates the optimal steam flow setpoint.

The advanced automated control system adds a condensate flow meter and an algorithmic system state estimation (Kalman filter) plus MPC block. The new strategy is expected to maintain the desired evaporation profile with $\pm 0.1\%$ accuracy, compensate for disturbances (pressure changes, wort composition), and reduce energy consumption through optimal steam distribution across the boiling stages. By combining a system state estimation with an MPC controller, the approach overcame the shortcomings of the existing open-loop control, ensuring precise control of volume and evaporation percentage and thus consistent beer quality with potential energy savings. Future work will include closed-loop simulation, comparison of Extended Kalman Filter, Particle Filter, and various MPC modifications, as well as extending the cost function. In addition, the implementation and integration of the solution within a decision support subsystem is planned.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-4-5

ОПТИМІЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ КИП'ЯТІННЯ СУСЛА З ВИКОРИСТАННЯМ СПОСТЕРІГАЧА ДЛЯ ОЦІНКИ СТАНУ СИСТЕМИ

М. Д. Паровенко, О. М. Клименко

Національний університет харчових технологій

Стаття присвячена висвітленню результатів дослідження, яке спрямоване на оптимізацію керування процесом кип'ятіння сусла в сусловарильному апараті із зовнішнім нагрівачем за рахунок застосування покращеної стратегії керування, що гарантує дотримання жорстких рецептурних обмежень щодо тривалості кип'ятіння та загального відсотка випаровування, водночас забезпечуючи стабільну якість пива. На противагу класичному відкритому контуру керування витратою пари в нагрівачі у дослідженні запропоновано замкнений контур регулювання об'єму сусла в сусловарильному апараті витратою пари. При цьому об'єм сусла в сусловарильному апараті оцінюється в реальному часі за допомогою фільтра Калмана на основі вимірювань рівня, густини сусла в сусловарильному апараті та витрати конденсату внаслідок випаровування. Оцінене значення об'єму подається на регулятор Model Predictive Control (MPC), що прогнозує динаміку системи на заданому горизонті, мінімізує функцію відхилення від цільового профілю об'єму та формує оптимальний сигнал керування витратою пари.

Модернізована автоматизована система керування включає додатковий витратомір конденсату та алгоритмічний блок спостерігача (фільтр Калмана) + MPC регулятора. Очікується, що нова стратегія здатна дотримуватися заданого профілю випаровування з точністю $\pm 0,1\%$, компенсувати збурення (зміни тиску, складу сусла) та зменшити енергоспоживання завдяки оптимальному розподілу пари між етапами кип'ятіння. Використання зв'язки «спостерігач + MPC регулятор» усуває недоліки існуючого керування з відкритим контуром, забезпечує точний контроль об'єму та відсотка випаровування, а відтак — стабільну якість пива та потенційне скорочення енерговитрат. Подальші дослідження передбачають моделювання замкненої системи, порівняння ефективності використання розширеного фільтра Калмана, Particle Filter, різних модифікацій MPC та розширення цільової функції. Також подальші дослідження мають на меті реалізацію та інтеграцію рішення за допомогою підсистеми підтримки прийняття рішень.

Ключові слова: АСКТП, технологічний процес кип'ятіння сусла, сусловарильний апарат із зовнішнім нагрівачем, оцінка стану системи, фільтр Калмана, MPC регулятор.

Постановка проблеми. Кип'ятіння сусла є унікальним процесом у виробництві пива. Основними цілями цього етапу є:

- екстракція складових хмелю та ізомеризація α -кислот, що збільшує гіркоту;
- утворення осаду білків і дубильних речовин;
- випаровування води та концентрація цукру;
- стерилізація та руйнування ферментів;

- зміна вмісту (видалення) диметилсульфіда та інших летких речовин;
- підвищення кольоровості сусла;
- підвищення кислотності сусла.

Етапи кип'ятіння сусла умовно можна поділити на два процеси: термічне витримання і випаровування. У класичних системах кип'ятіння сусла, таких як кип'ятіння із внутрішнім або зовнішнім нагрівачем, термічне витримання та випаровування відбуваються одночасно. Під час термічного витримання відбуваються різні хімічні реакції, такі як ізомеризація хмелю, утворення ароматичних речовин, розвиток кольору та процеси розчинення, а також інактивація ферментів і стерилізація. Інактивація ферментів солоду є необхідною, оскільки інакше виникатимуть нетипові смакові профілі.

Крім того, під час кип'ятіння сусла потрібно видалити білки та білково-дубильні комплекси, щоб отримати освітлене сусло. Якщо коагуляція білків надто інтенсивна, також осаджуються піноутворюючі високомолекулярні білки, що погіршують стабільність піни. Це особливо важливо, якщо не додаються піноутворюючі добавки (наприклад, відповідно до Bavarian Purity Law). Недостатня коагуляція білків призводить до колоїдної нестабільності пива. Для споживача каламутне пиво є причиною для рекламації. Речовини, що викликають помутніння, частково можуть бути видалені шляхом адсорбції до або під час фільтрації пива.

Реакції Маяра, що відбуваються приблизно при 80 °С, утворюють нові ароматичні речовини. Особливе значення мають альдегіди Штрекера, які утворюються з амінокислот і впливають на смакову стабільність пива. Це первинні та вторинні продукти реакції Маяра, і їх кількість може зменшуватись залежно від легкості, типу системи кип'ятіння та рівня випаровування (тобто кип'ячене сусло містить більше ароматичних речовин, ніж некип'ячене).

Випаровування служить для видалення небажаних ароматичних речовин, таких як мірицин з хмелю, різних карбонільних і сірковмісних сполук, зокрема диметилсульфіду (DMS). Ароматичні речовини, що утворюються внаслідок ліпідного обміну, також зменшуються під час кип'ятіння сусла за рахунок випаровування. Високий рівень випаровування забезпечує ефективне вилуговування дробини, що економить солод. Водночас для такого випаровування потрібно більше енергії. У процесі цього термічне навантаження на сусло зростає, що негативно впливає на смакову стабільність пива.

Висока ефективність випаровування системи кип'ятіння забезпечує високу якість, оскільки базові аналітичні показники кип'ятіння, такі як вільний DMS, число тіобарбітурової кислоти (TBN) та коагульований азот, можуть бути оптимально скориговані (Eßlinger, 2009).

Тож процес випаровування відіграє важливу роль у гарантуванні якості пива. Мінливість загального відсотка випаровування від однієї партії до іншої може спричинити погіршення органолептичних показників для одного й того самого виду пива.

Існують певні труднощі, через які процес випаровування важко контролювати:

- відсутність надійного вимірювання об'єму сусла в реальному часі;
- різні відсоток випаровування та тривалість кип'ятіння партії залежно від виду пива;

- жорсткі цілі щодо тривалості кип'ятіння партії і загального відсотка випаровування;

- жорсткі обмеження щодо температури та профілю випаровування під час виробництва партії (Pacheco et al., 2019).

Тому основна проблема, яка розглядається та вирішується у пропонуваному дослідженні, — це забезпечення заданого відсотка випаровування та часу кип'ятіння сула згідно з профілем випаровування (заданої швидкості випаровування).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження у сфері керування й оптимізації процесу кип'ятіння сула в пивоварінні і теплових системах демонструють міждисциплінарний підхід, що об'єднує теплотехніку, чисельне моделювання та методи біохімічної оптимізації. В експериментальних дослідженнях із застосуванням резонатора киплячих бульбашок (BBR) вивчалось, як періодичні вібрації резонансної пластини в поєднанні з аналізом звуку кипіння та відеометрією руху частинок (PIV) можуть оптимізувати теплопередачу. Результати показали, що оптимальна теплопередача спостерігається тоді, коли досягається резонанс і змочуваність поверхні є достатньою (Maeda et al., 2025). Біохімічні та сенсорні властивості сула також є об'єктом уваги. У дослідженні із застосуванням моделювання сумішей було оптимізовано співвідношення трьох типів солоду з метою підвищення біологічної цінності сула поряд із традиційними пивоварними цілями. Це досягнуто за допомогою статистичних методів моделювання (Kostov та ін., 2023). В іншому дослідженні застосовувалися штучні нейронні мережі (ШНМ) та генетичні алгоритми (ГА) для оптимізації умов затирання при використанні тритикале — гібриду пшениці та жита. Метою була оптимізація виходу екстракту, в'язкості і вміст вільного амінного азоту (FAN). ШНМ успішно змоделювала складні нелінійні залежності, а ГА забезпечив експериментально підтверджені результати, що підкреслює потенціал машинного навчання в оптимізації пивоварних процесів (Pribic et al., 2024). Паралельно з дослідженнями, орієнтованими на пивоваріння, ширші симуляції процесу кипіння дають цінні уявлення про поведінку фазових переходів і теплопередачу. У дослідженні, що порівнювало моделі кипіння, модель об'єму рідини (VOF) та модель кипіння Ейлера, було застосовано методи обчислювальної гідродинаміки (CFD) для симуляції бульбашкового потоку у вертикальних трубках. Хоча VOF краще відображала динаміку бульбашок, модель Ейлера точніше передбачала параметри теплопередачі. Важливо, що зміни теплового потоку та витрати на вході суттєво впливали на якість пари та зону нуклеаційного кипіння, що дає змогу використовувати ці знання при проектуванні обладнання для кип'ятіння сула (Torfeh et al., 2025). Оптимізація кип'ятіння сула — це багатогранна сфера досліджень, що охоплює теплову механіку, біохімічний аналіз та обчислювальну оптимізацію. Сучасні дослідження спрямовані на створення енергоефективних, біологічно покращених і точно контрольованих процесів кип'ятіння. Втім інтеграція цих досягнень у масштабовані пивоварні системи залишається серйозним викликом. Дослідження спрямоване на оптимізацію процесу кип'ятіння через точний контроль і керування, а подальші роботи мають на меті інтеграцію рішень за допомогою підсистеми підтримки прийняття рішень.

Натепер процес кип'ятіння сула триває, як правило, 60—70 хв і при «класичному» кип'ятінні з низьким надлишковим тиском його перебіг відбувається таким

чином:

- нагрівання до 100 °С приблизно за 15 хв;
- попереднє кип'ятіння при 100 °С близько 10 хв;
- нагрівання до 102—104 °С за 10—15 хв;
- кип'ятіння під тиском при 102—104 °С близько 15—30 хв;
- скидання тиску та зниження температури до 100 °С приблизно за 15 хв;
- подальше кип'ятіння при 100 °С близько 10 хв (Kunze, 2004).

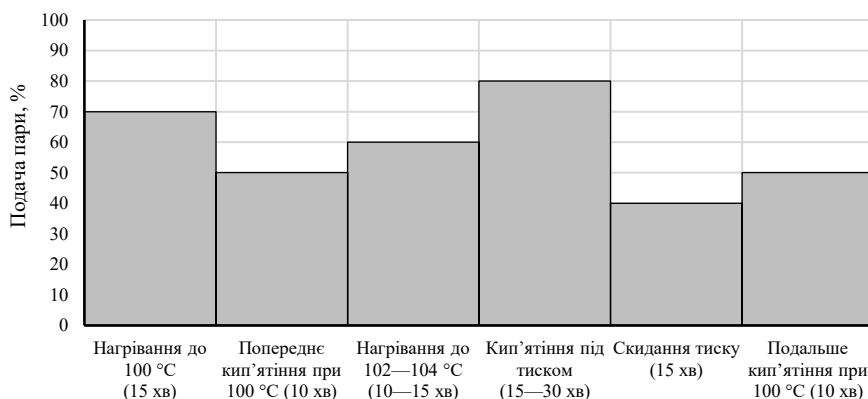


Рис. 1. Діаграма подачі пари для етапів кип'ятіння суслу

Класична наявна стратегія керування процесом кип'ятіння суслу з відкритим контуром передбачає, що сусло отримує фіксовану кількість пари протягом конкретного етапу. Задане значення витрати пари для контуру керування витратою пари розраховується для кожного етапу кип'ятіння суслу згідно з профілем випаровування — заданої швидкості випаровування (Stewart et al., 2017).

Однак немає вимірювання зворотного зв'язку, щоб адаптувати витрату пари, якщо є певні відхилення від заданого відсотка випаровування. Тож ця стратегія не забезпечує компенсації можливих порушень процесу і не здатна завжди забезпечити виконання жорстких обмежень щодо тривалості кип'ятіння (допускається не більше 1 хв) і загального відсотка випареного суслу (допускається відхилення 0,1%) (Narziß et al., 2017).

Відсоток випаровування визначається відносно зміни об'єму суслу в суслорильному апараті. Однак об'єм в реальному часі не вимірюється. Хоча його можливо контролювати (Briggs et al., 2004):

- автоматичне визначення рівня суслу за показами давача тиску, який встановлюється на дні посудини, або шляхом вимірювання глибини рідини;
- вимірювання витрати пари або витрати конденсату, що утворюється під час випаровування;
- автоматичний відбір проб і визначення густини суслу;
- опосередковане визначення щільності на дні посудини на вході зовнішнього нагрівача шляхом вимірювання швидкості ультразвуку, створюваного давачем (Forrest et al., 1993).

Однак показанням давача рівня не можна довіряти зважаючи на змінний тиск

у системі. Давач густини (аерометр) також має серйозні проблеми з надійністю, що не дозволяє використовувати тільки його покази для керування витратою пари.

Спираючись на аргументи, наведені в постановці проблеми, та аналіз досліджень, **метою дослідження** є оптимізація керування процесом кип'ятіння сусла для забезпечення якості продукту в умовах жорстких обмежень (рецептури) щодо тривалості кип'ятіння і загального відсотка випареного сусла.

Матеріали і методи. Для досягнення означеної мети було використано такі методи сучасної теорії керування, зокрема:

- алгоритми для оцінки стану системи — Kalman filter;
- методи оптимального керування — регулятор MPC;
- оцінка майбутнього стану система;
- оптимізація керуючих дій за рахунок оптимізації цільової функції;
- математичне моделювання з використанням диференціальних рівнянь для опису фізичних процесів в об'єкті керування, перебіг яких відбувається під час кип'ятіння сусла.

Викладення основних результатів дослідження. Об'єктом пропонованого дослідження є технологічний процес кип'ятіння сусла в сусловарильному апараті із зовнішнім нагрівачем. Існує багато переваг у використанні такої системи. Її можна застосовувати при широкому діапазоні обсягів варіння, і нагрівання може розпочатися майже відразу після початку заповнення сусловарильного апарата (Vanforth, 2006). Сусло в сусловарильному апараті із зовнішнім нагрівачем постійно перекачується через зовнішній нагрівач, де безпосереднього і проходить кип'ятіння під тиском, що, відповідно, забезпечує підвищену температуру кипіння. Кип'ятіння відбувається за рахунок подачі пари в нагрівач.

Предметом дослідження є автоматизована система керування процесом кип'ятіння сусла, методи оцінки стану системи, методи оптимального керування, фізичні закономірності, математичні моделі. Автоматизована система керування сусловарильним апаратом із зовнішнім нагрівачем була розроблена в дослідженні, яке було викладене в статті (Паровенко, 2024). Для досягнення означеної мети було вирішено такі завдання:

- аналіз технологічного процесу кип'ятіння сусла;
- аналіз наявних систем керування;
- аналіз наявних рішень щодо керування для забезпечення якості сусла, мінімізації енергетичних витрат та підвищення продуктивності роботи обладнання;
- вибір покращеної стратегії керування (advanced process control);
- аналіз необхідності використання алгоритмів оцінки стану системи, вибір алгоритму;
- вибір регулятора для оптимального керування;
- проектування системи керування.

У подальшому також планується:

- синтез спостерігача;
- синтез регулятора;
- симуляція роботи замкненої системи;
- тестування інших спостерігачів, регуляторів. Їх оцінка.

Пропоноване дослідження покращує наявну систему керування, яка описана в (Паровенко, 2024). Спрощена схема автоматизації наведена на рис. 2.

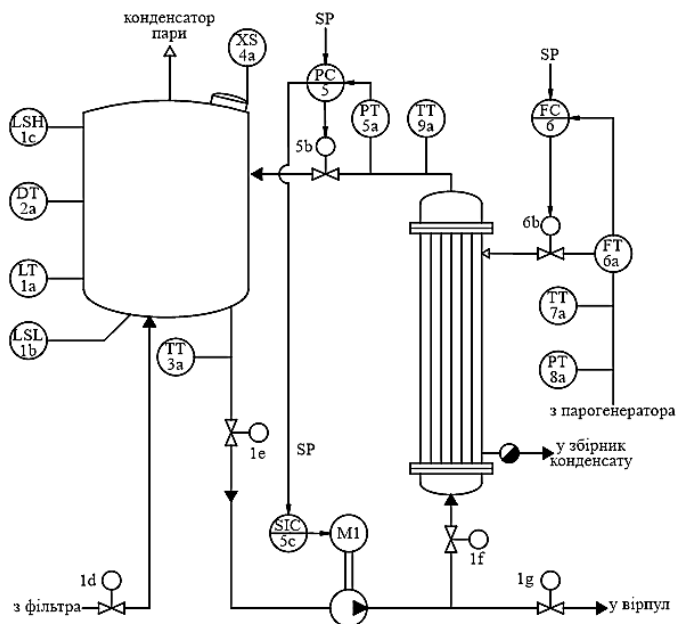


Рис. 2. Спрощена схема автоматизації

Оскільки метою пропонованого дослідження є покращення наявної системи автоматизації для забезпечення заданого відсотка випаровування суслу, зосередимося на контурі витрати пари в нагрівач. Наявна стратегія керування процесом кип'ятіння суслу з відкритим контуром передбачає, що сушло отримує фіксовану кількість пари протягом конкретного етапу. Задане значення витрати пари для контуру керування витратою пари розраховується на основі законів теплопередачі для кожного етапу кип'ятіння суслу згідно з профілем випаровування — заданої швидкості випаровування.

Оскільки відсоток випаровування визначається відносно зміни об'єму суслу в сушловарильному апараті (Нанскок, 2014), покращена стратегія керування передбачає організацію замкненого контуру керування витратою пари за рахунок введення зворотного зв'язку — вимірювання об'єму. Така система вимагає введення в наявну систему керування нових компонентів апаратного та програмного забезпечення:

- програмне забезпечення: спостерігач, який буде оцінювати об'єм суслу в реальному часі за наявними вимірюваннями;
- апаратне забезпечення: додатковий давач витрати конденсату, давач FT10a на рис. 3;
- програмне забезпечення: регулятор MPC (Model predictive controller), який на основі оціненого об'єму суслу буде формувати завдання для наявного ПІД регулятора витрати пари у нагрівач.

Як спостерігач був обраний Unscented фільтр Калмана. Це алгоритм для оцінки стану нелінійних систем (Simon, 2006).

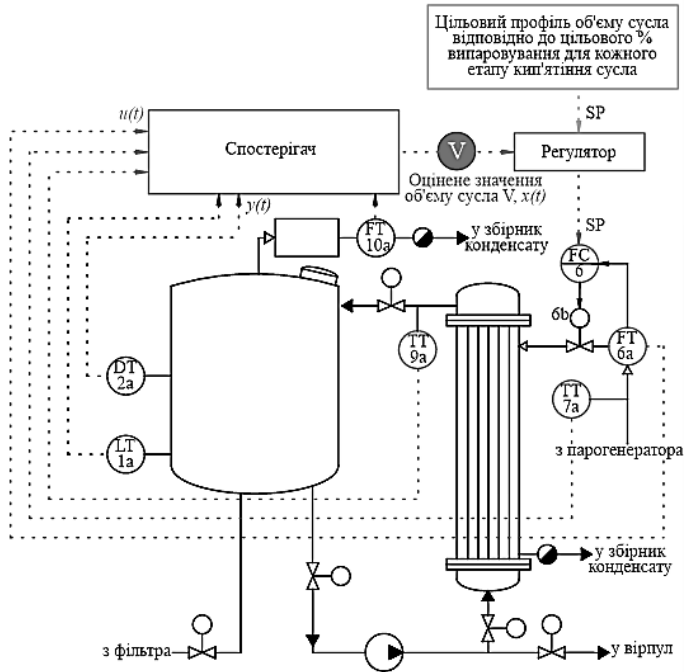


Рис. 3. Спрощена схема автоматизації з виділеними компонентами апаратного та програмного забезпечення покращеної стратегії керування

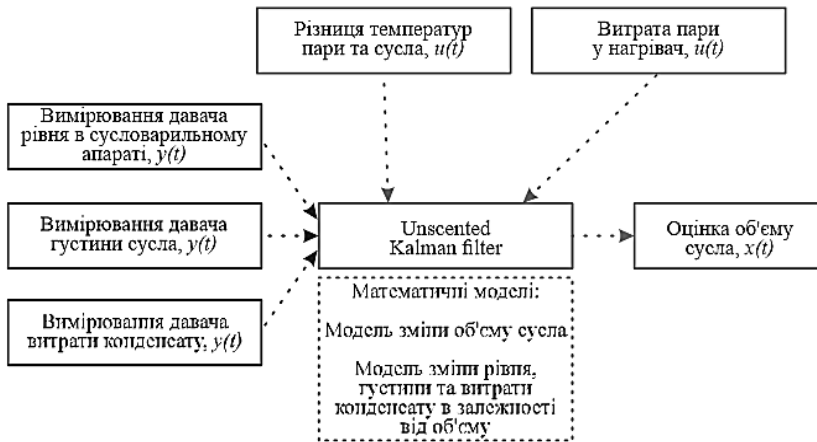


Рис. 4. Загальна структура спостерігача

У системі, яка розглядається, задача спостерігача передбачає оцінити (розрахувати) поточний об'єм суслу на основі наявних вимірювань, зокрема на основі показів рівня в суслварильному апараті (LT1a), густини суслу (DT2a) та витрати конденсату при випаровуванні (FT10a).

Алгоритм Unscented фільтра Калмана передбачає означення функції переходу

змінної стану (об'єму) залежно від керуючих змінних з урахуванням шуму процесу (György et al., 2014):

$$x(t) = f(u(t), w(t)), \quad (1)$$

де $x(t) = V(t)$ — вектор змінних стану; $u(t)$ — як керуючі змінні виступають різниця температур пари ТТ7а і сусла ТТ9а, і витрата пари у нагрівач FT6а; $w(t)$ — модель шуму поки не визначена, повинна враховувати додавання хмелю та потенційне додавання молочної кислоти, що буде змінювати об'єм.

Крім того, фільтр Калмана вимагає наявності моделей вимірювання (виходів об'єкту), які включають опис зміни значення вимірювання через змінну стану (об'єм) (Тережану, 2011). У нашому випадку до виходів об'єкта належать рівень, густина та витрата конденсату при випаровуванні:

$$y(t) = f(x(t), v(t)), \quad (2)$$

де $y(t) = [L(t), D(t), F(t)]$ — вектор виходу об'єкта; $x(t)$ — модель зміни об'єму; $v(t)$ — шум вимірювання.

Покращена стратегія керування передбачає регулювання об'єму сусла за рахунок впровадження MPC регулятора, задача якого на основі розузгодження між оціненим значенням об'єму та заданим значенням об'єму для певного етапу процесу кип'ятіння, сформувати задане значення для ПД регулятора витрати пари у нагрівач.

Model Predictive Controller (MPC) — це регулятор, який використовує модель системи для прогнозування її поведінки на певний горизонт часу (Schwenzer et al., 2021). Він застосовується для керування складними процесами, що включають обмеження на змінні та вимагають оптимального реагування на збурення (Rawlings et al., 2018). MPC регулятор передбачає означення моделі системи, цільової функції та обмежень на змінні керування та стану. Принцип його роботи передбачає прогнозування поведінки системи на основі моделі системи та оптимізацію керуючих дій згідно з цільовою функцією в межах обмежень (MathWorks, 2025).

Модель системи для MPC регулятора потребує опису моделі відносно керованих змінних, вимірних збурень, невимірних збурень, для яких також мають бути означені моделі. Оскільки в системі, що розробляється, вводиться спостерігач, то модель шуму вимірювань для регулятора можна виключити.

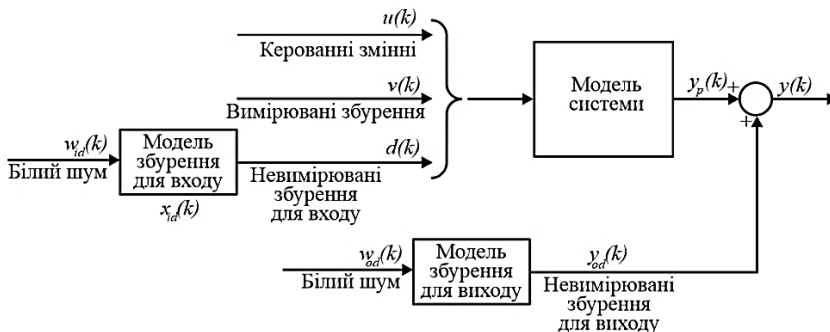


Рис. 5. Структура моделі системи, що використовується в MPC регуляторі

Для роботи MPC регулятора визначено:

- керовані змінні $u(k)$: витрата пари (FT6a), додавання хмелю та кислоти;
- вимірюванні збурення $v(k)$: вхідна температура сусла у нагрівач ТТ3а, температура кип'ятіння ТТ9а (тиск у нагрівачі РТ5а), швидкість обертів двигуна циркуляційного насоса SIC5с, тиск пари РТ8а (температура пари ТТ7а);
- невимірювані збурення для входу $d(k)$: накипання на трубках нагрівача, характеристики теплообмінника;
- невимірювані збурення для виходу $y_{od}(k)$: об'єм сусла в нагрівачі;
- вихід об'єкта, який має стабілізуватися регулятором $u(k)$: об'єм сусла, оцінений спостерігачем на основі вимірювань рівня в сусловарильному апараті (LT1а), густина сусла (DT2а) та витрати конденсату при випаровуванні (FT10а).

На цьому етапі визначено цільову функцію, яка мінімізує відхилення між прогнозованим об'ємом сусла та заданим об'ємом з компенсацією різких змін витрат пари.

$$\text{Цільова функція} = \sum_{i=1}^N (V_{\text{задане}}(t_i) - V(t_i))^2 + \lambda \sum_{i=1}^N \Delta F_{\text{парі}}(t_i)^2, \quad (3)$$

де N — кількість кроків прогнозування; λ — ваговий коефіцієнт, що компенсує значні зміни витрати пари (для уникнення агресивних дій керування).

Обмеження витрати пари:

$$F_{\text{мін}} \leq F_t \leq F_{\text{макс}}. \quad (4)$$

MPC регулятор був обраний саме задля можливості його подальшого розширення, збільшення вектора регульованих змінних і розширення цільової функції, тому як потенційне покращення цієї стратегії керування розглядається включення регульованої змінної температури кип'ятіння ТТ9а, яка встановлюється контуром регулювання тиску.

Розглянута проблематика потребує подальшого дослідження, що включає: оцінку ефективності використання розширеного фільтра Калмана і/або Particle Filter (Ristic та ін., 2004), оцінку ефективності використання різних модифікацій MPC регулятора (Maciejowski, 2000), покращення системи керування за рахунок застосування fuzzy logic регулятора (вимагає проведення експертних оцінок) (Ross, 2010) для керування процесом ізомеризації альфа-кислот (Vamforth, 2016).

Висновки

Запропонована стратегія керування технологічним процесом кип'ятіння сусла передбачає оцінку об'єму сусла в реальному часі на основі наявних вимірювань рівня, густини та витрати конденсату за допомогою фільтра Калмана. Поточне розраховане значення об'єму та бажаний профіль об'єму сусла в часі подається на MPC регулятор. Цей профіль означений на основі заданого відсотка випаровування для кожного етапу кип'ятіння. MPC регулятор прогнозує майбутні об'єми сусла на горизонті керування, використовуючи поточний об'єм, поточну витрату та модель динаміки об'єму. Також регулятор обчислює оптимальне значення витрати пари за рахунок мінімізації цільової функції і встановлює це оптимальне значення як задане значення для ПД-регулятора витрати пари, який регулює клапаном пари у теплообмінник.

Такий підхід гарантує, що об'єм сусла точно відповідає заданому профілю, що

призводить до стабільної якості пива завдяки досягненню відповідних показників випаровування під час процесу кип'ятіння.

Література

Паровенко, М. Д., & Смітюх, Я. В. (2024). Розроблення імітаційної моделі сушловарильного апарата із зовнішнім нагрівачем. *Scientific Works of National University of Food Technologies*, 30(1), 17—29. <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2024-30-1-5>.

Bamforth, C. W. (2006). *Brewing: New technologies*. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781845691738>.

Bamforth, C. W. (2016). *Brewing materials and processes: A practical approach to beer excellence*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-13349-1>.

Briggs, D. E., Boulton, C. A., Brookes, P. A., & Stevens, R. (2004). *Brewing: Science and practice*. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781855739062>.

EBlinger, H. M. (2009). *Handbook of brewing: Processes, technology, markets*. Weinheim: Wiley-VCH. <https://doi.org/10.1002/9783527623488>.

Forrest, I. S., Skrgatic, D., Coker, I. A. J., & Heap, J. (1993). *Novel method for measurement and control of evaporation in the brewhouse kettle*, European Brewery Convention: Proceedings of the 24th Congress Oslo, 1993. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oso/9780199634668.003.0055>.

György, K., Kelemen, A., & Dávid, L. (2014). Unscented kalman filters and particle filter methods for nonlinear state estimation. *Procedia Technology*, 12, 65—74. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.457>.

Hancock, J. (2014). *Evaporation & wort boiling*, IBD/BFBi Midlands Section Engineering Symposium on Heat Transfer and Refrigeration. Publications Archive — Briggs. Взято з: <https://www.briggsplc.com/wp-content/uploads/technical-papers/EvaporationWort-Boiling-JAN-2014-Briggs.pdf>.

Kostov, G., Shopska, V., Denkova-Kostova, R., & Ivanova, K. (2023). *Mixture modeling as a way for optimization of wort in beer production*, 37th ECMS International Conference on Modelling and Simulation. Sbr.-Dudweiler, Germany: Digitaldruck Pirrot GmbH. <https://doi.org/10.7148/2023-0186>.

Kunze, W. (2014). *Technology brewing & malting* (5). VLB Berlin.

Maciejowski, J. M. (2000). *Predictive control with constraints* (1). Pearson College Div.

Maeda, N., Haruyama, K., Unno, N., Yuki, K., Taniguchi, J., & Satake, S. (2025). Optimization of boiling heat transfer by visualization and boiling sound in a boiling bubble resonator. *Heat Mass Transfer*, 61, 59. <https://doi.org/10.1007/s00231-025-03581-5>.

MPC Design. (2025). Взято з: <https://www.mathworks.com/help/mpc/controller-design.html?category=controller-design>.

Narziß, L., Back, W., Gastl, M., & Zarnkow, M. (2017). *Die Technologie der Malzbereitung. In Abriss der Bierbrauerei*. Weinheim: Wiley-VCH. <https://doi.org/10.1002/9783527812820.ch1>.

Pacheco, G., Cook, A., Waltz, F., Furriel, R., Camisão, L., Steinle, L., & Bezerra, M. (2019). *Wort boiling advanced process control in a brewery*, Process System Engineering — Brazil 2019. Взято з: https://www.ufrgs.br/psebr/wp-content/uploads/2019/05/Oral_A076_Waltz.pdf.

Pribic, M., Kamenko, I., Despotović, S., Miroslavljević, M., & Pejin, J. (2024). Modeling and optimization of tritcale wort production using an artificial neural network and a genetic algorithm. *Foods*, 13(2), 343. <https://doi.org/10.3390/foods13020343>.

Rawlings, B. J., Mayne, Q. D., & Diehl, M. M. (2018). *Model predictive control: Theory, computation, and design* (2). Madison, Wisconsin: Nob Hill Publishing. Взято з: <https://sites.engineering.ucsb.edu/~jbraw/mpc/MPC-book-2nd-edition-1st-printing.pdf>.

Ristic, B., Arulampalam, S., & Gordon, N. (2004). *Beyond the kalman filter: particle filters for tracking applications*. Artech House Publishers.

Ross, T. J. (2016). *Fuzzy logic with engineering applications* (4). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119994374>.

Schwenzer, M., Ay, M., Bergs, T., & Abel, D. (2021). Review on model predictive control: an engineering perspective. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 5, 1327—1349.

<https://doi.org/10.1007/s00170-021-07682-3>.

Simon, D. (2006). *Optimal state estimation: kalman, h^∞ , and nonlinear approaches* (1). Wiley-Interscience. <https://doi.org/10.1002/0470045345>.

Stewart, G. G., Russell, I., & Anstruther, A. (2017). *Handbook of brewing* (3). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781351228336>.

Terejanu, G. A. (2011). *Unscented kalman filter tutorial*. Взято з: <https://www.researchgate.net/profile/Mohamed-Mourad-Lafifi/post/Unscented-Kalman-Filter/attachment/5a3401d34cde266d587b4efd/AS%3A571878130622464%401513357779148/download/Tutorial+UKF.pdf>.

Torfeh, S., Mirzaei, M., & Kouhikamali, R. (2025). A simulation of bubbly flow regime in boiling process by comparing the numerical models of VOF and RPI boiling. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 18(5), 1140—1157. Isfahan University of Technology. <https://doi.org/10.47176/jafm.18.5.3126>.

APPLYING REFACTORING TO IMPROVE SOFTWARE SECURITY

V. Struzik

National University of Food Technologies

Key words:

Refactoring
Software security
Refactoring techniques
Quality attributes

Article history:

Received 21.07.2025
Received in revised form
08.08.2025
Accepted 20.08.2025

Corresponding author:

V. Struzik

E-mail:

struzikva@nuft.edu.ua

Citation: Струзік В. А. (2025). Застосування рефакторингу для підвищення безпеки програмного забезпечення. *Наукові праці НУХТ*, 31(4), 52—66. DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-4-6

ABSTRACT

Refactoring is one of the most common methods in practice to improve software quality, such as maintainability, testability, and understandability. However, there is a lack of research investigating the impact of refactoring on security, it is poorly understood and underestimated. The limited amount of research provides a categorization of refactoring methods based on their impact on quality attributes to help developers achieve their design goals by selecting the most useful methods and applying them in the right places according to specific software quality attributes. An overview of software security vulnerability features was presented. Based on the description of software security characteristics, an overview of code refactoring processes was presented. A number of tools for implementing system-wide software refactoring were presented. Software quality attributes that play an important role in assessing the effectiveness and security of the entire system were considered. The main quality metrics were defined. The list of quality attributes is based on the hierarchical quality model for object-oriented design (QMOOD). Its distinctive feature is that it extends previous quality models and includes four levels of indicators: design quality attributes, object-oriented design properties, object-oriented design metrics, object-oriented design components. Based on the analysis of quantitative quality attributes and significant software vulnerabilities, a set of refactoring methods for improving the security of software projects was presented. The importance of preliminary analysis of the state of the software code, identification of vulnerable components, prioritization of changes, and mandatory testing at each stage of refactoring was emphasized in the paper.

ЗАСТОСУВАННЯ РЕФАКТОРИНГУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

В. А. Струзік

Національний університет харчових технологій

Рефакторинг є одним із найпоширеніших методів на практиці для покращення якості програмного забезпечення, таких як супроводжуваність, тестованість і зрозумілість. Однак бракує досліджень впливу рефакторингу на безпеку. Вплив рефакторингу на безпеку вивчений недостатньо, тож недооцінений. Обмежена кількість досліджень надає категоризацію методів рефакторингу на основі їхнього впливу на атрибути якості, щоб допомогти розробникам досягти своїх цілей проектування шляхом вибору найкорисніших методів та їх застосування в потрібних місцях відповідно до конкретних атрибутів якості програмного забезпечення.

Представлено огляд ознак вразливостей програмного забезпечення щодо безпеки. На основі опису характеристик безпеки програмного забезпечення проаналізовано процеси рефакторингу коду. Наведена низка інструментів для реалізації системного рефакторингу програмного забезпечення. Розглянуто атрибути якості програмного забезпечення, які відіграють важливу роль для оцінки ефективності та безпеки всієї системи загалом. Визначено основні метрики якості. Перелік атрибутів якості базується на ієрархічній моделі якості для об'єктно-орієнтованого проектування (QMOOD). Її особливістю є те, що вона розширює попередні моделі якості та включає чотири рівні показників: якості проєкту, об'єктно-орієнтованих властивостей проєкту, об'єктно-орієнтованих метрик проєкту, об'єктно-орієнтованих властивостей дизайну компонентів. На основі аналізу кількісних атрибутів якості та суттєвих вразливостей програмного забезпечення представлені сукупність методів рефакторингу для підвищення безпеки програмних проєктів. Наголошено на важливості попереднього аналізу стану програмного коду, виявлення вразливих компонентів, встановлення пріоритетів змін та обов'язкового тестування на кожному етапі рефакторингу.

Ключові слова: рефакторинг, безпека програмного забезпечення, методи рефакторингу, атрибути якості.

Постановка проблеми. Традиційні підходи до побудови безпечних програмних продуктів переважно зосереджуються на впровадженні механізмів захисту на етапах проектування чи тестування, тоді як вже створений код часто залишається вразливим до потенційних атак через накопичення технічного боргу, неврахування стандартів безпеки та складність супроводу. Це призводить до появи прихованих вразливостей, які можуть бути використані зловмисниками. Основним способом боротьби з технічним боргом в інформаційних системах є застосування рефакторингу.

Практичне застосування рефакторингу коду, зазвичай, розглядається лише як підхід для підвищення зрозумілості, продуктивності чи масштабованості прог-

рамного забезпечення, без акценту на його роль у посиленні безпекових характеристик. Відсутність системного підходу до застосування рефакторингу саме з метою підвищення рівня безпеки створює розрив між теоретичними можливостями цієї практики та її реальним використанням у процесі розробки.

Зважаючи на викладене вище, актуальною є потреба в науковому обґрунтуванні рефакторингу як інструменту підвищення безпеки програмного забезпечення, а також формуванні практичних рекомендацій щодо інтеграції цього підходу для зменшення кількості вразливостей і забезпечення більш високої якості програмного забезпечення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Під рефакторингом коду традиційно розуміється реорганізація коду програмного забезпечення (ПЗ) для покращення характеристик і показників якості об'єктно-орієнтованих та компонентних програм без зміни їх кінцевої поведінки. Існує 68 оригінальних операцій рефакторингу коду, розділених на шість категорій (Fowler, 2018; Burchard, 2017). Рефакторинг програмного забезпечення реструктуризує внутрішній дизайн програмного забезпечення для покращення його якості та, як наслідок, зменшення обсягів технічного обслуговування та витрат. Таким чином, рефакторинг є одним з найбільш широко використовуваних підходів на практиці для покращення якості існуючого програмного забезпечення.

Рефакторинг може покращити як якість програмного забезпечення, так і продуктивність його розробників. Довгостроковий ефект рефакторингу полягає в підвищенні продуктивності розробників за рахунок збільшення двох ключових факторів: зрозумілості та зручності обслуговування коду, особливо коли новий розробник приєднується до існуючого проєкту. Доведено, що рефакторинг може допомогти виявляти, виправляти та зменшувати кількість помилок програмного забезпечення, що дає змогу створювати проєкти програмного забезпечення, які з меншою ймовірністю демонструють помилки в процесі розробки (Xiao, Cai, Kazman, Mo, & Feng, 2016). Рефакторинг є надзвичайно важливим рішенням для вирішення проблеми управління складністю програмного забезпечення (Xiao, Cai, Kazman, Mo, & Feng, 2016) і отримав величезне поширення в об'єктно-орієнтованих системах (Kaur, Awasthi, & Sangal, 2021; Houichime, & El Amrani, 2024).

Рефакторинг вразливостей і небезпек включає набір змін, спрямованих на підвищення загальної безпеки кодової бази (Fowler, 2018). Під час рефакторингу перетворення коду виконуються в програмних системах для підтримки якості коду та усунення існуючих вразливостей. Для ефективного управління ризиками безпеки при розробці програмного забезпечення поняття технічного боргу розширюється, щоб охопити недоліки зі сторони безпеки. Це включає виявлення ризику безпеки в технічному боргу, а також надає засоби для виявлення боргу за допомогою сканерів вразливостей, який в іншому випадку залишився б прихованим (Rindell, & Holvitie, 2019). Саме тому рефакторинг може й має розглядатися як інструмент посилення безпеки: систематичне усунення вад коду, що корелюють з типовими вразливостями, зменшення площі атаки через декомпозицію монолітних компонентів, впровадження безпечних шаблонів проєктування, стандартизація обробки помилок і введення чітких інваріантів доступу до ресурсів.

Останнім часом усе частіше в середовищі розробників використовується термін «рефакторинг безпеки» (Schuckert, Katt, & Langweg, 2023). Під цим терміном розуміється зміна внутрішньої структури ПЗ для виправлення вразливостей без зміни спостережуваної поведінки у звичайному сценарії використання. Рефакторинг безпеки досягається шляхом створення дерева потоків вхідних даних, контрольованих зловмисником, на основі графа властивостей коду. Дерево використовується для пошуку можливих шляхів впровадження змін коду, що призводить до підсилення безпеки. Незважаючи на таке широке застосування операцій рефакторингу в процесі розробки ПЗ, вплив їх на безпеку вивчений недостатньо і в деяких конкретних випадках недостатньо прозорий (Abid, Kessentini, Alizadeh, Dhaouadi, & Kazman, 2020).

Мета досліджень: обґрунтувати застосування рефакторингу як системного підходу до підвищення безпеки програмного забезпечення, надати практичні рекомендації для інтеграції цього підходу протягом усього життєвого циклу розробки програмного забезпечення і побудувати їх на основі основних атрибутів якості задля підвищення безпекових характеристик програмного забезпечення.

Матеріали і методи. Основним методом став евристичний підхід, що дав змогу сформулювати аргументацію на користь застосування рефакторингу як системного підходу покращення якості програмного коду з метою підвищення безпекових характеристик кінцевого програмного продукту, а також аналіз моделей оцінки якості програмного забезпечення та практик програмної інженерії. Дослідження передбачало узагальнення характеристик вразливостей методом абстрагування, аналіз існуючих підходів до забезпечення безпеки та інтерпретацію можливостей інтеграції рефакторингу протягом усього життєвого циклу розробки. Важливо підкреслити, що дослідження має концептуальний характер, не включає проведення штучних чи природних експериментів і спрямоване на закладання теоретичної бази для подальшої розробки спеціалізованих методів безпекового рефакторингу.

Викладення основних результатів дослідження. Перш ніж приступити до оптимізації, необхідно виявити основні відмінні особливості ПЗ, які сигналізують про його слабкості щодо шкідливого впливу. Це все питання безпеки коду і вони мають вирішуватись у комплексі.

Attack Surface (поверхня атаки) — це сукупність усіх можливих точок у системі, через які зловмисник може здійснити несанкціонований доступ або інші атаки. Прийнято виділяти три типи поверхневих атак:

- цифрова (Digital Attack Surface) — усе, що пов'язано з ІТ: мережі, додатки, хости, облікові записи;
- фізична (Physical Attack Surface) — фізичний доступ до пристроїв;
- соціальна (Social Engineering Surface) — співробітники або користувачі, яких можна обдурити.

Чим більша поверхня атаки, тим вищий ризик, тому організації прагнуть зменшити поверхню атаки, наприклад, вимикаючи непотрібні сервіси, обмежуючи доступ, шифруючи дані та постійно оновлюючи ПЗ.

Баг — це помилка, дефект або вада в комп'ютерній програмі чи системі, яка призводить до виникнення неточного або непередбачуваного результату або спричиняє непередбачувану поведінку програми. Помилки програмного забезпечення

також стосуються недосконалостей, вад, несправностей, невідповідностей або відхилень у комп'ютерних програмах чи системах.

Вразливості (Vulnerability) — це недосконалості програмного забезпечення, що призводять до поведінки, яку його розробники не мали наміру впроваджувати чи навіть не передбачали. Вразливість у комп'ютерному програмному забезпеченні стосується певної слабкості, присутньої в кодовій базі, яка дозволяє зловмиснику обійти впроваджені заходи безпеки. Отже, вразливості пов'язані з обходом обмеження, що стосується ситуацій, коли неавтентифікована сторона може отримати доступ до сервісів або читати та маніпулювати даними.

Code bad smells (CBS, погані запахи коду) — це ознаки того, що код може бути погано написаний, неструктурований, важко підтримується або схильний до помилок. Вони не обов'язково означають наявність багів, але вказують на проблеми в дизайні чи архітектурі, які можуть призвести до труднощів у розвитку проєкту. CBS вказують на недоліки коду та дизайну, які можуть прямо чи опосередковано призвести до появи помилок. CBS впливають на структурні характеристики програмного забезпечення і, як наслідок, сприяють погіршенню якості програмного забезпечення (Fowler, 2018).

Подібно до інших атрибутів якості, важливо оцінити, як CBS впливають на безпеку програмного забезпечення. Крім того, необхідно дослідити, чи допомагають операції рефакторингу покращити безпеку програмного забезпечення. Виявлені CBS у дослідженнях ретельно аналізуються на відповідність вимогам безпеки, щоб з упевненістю зробити висновок про їх вплив з точки зору безпеки. Попередні дослідження ретельно вивчали зв'язки між окремими CBS та такими атрибутами якості, як зусилля на обслуговування та прогнозування дефектів (Zhang, Hall, & Baddoo, 2011), проте відсутні дослідження щодо того, як рефакторинг може покращити безпеку програмного забезпечення шляхом виявлення та видалення поганих запахів коду. Було запропоновано кілька досліджень щодо виявлення CBS та подальшого рефакторингу з метою покращення таких аспектів якості коду, як зрозумілість, змінюваність і загальне обслуговування (Zhang, Hall, & Baddoo, 2011). Виконання вимог безпеки на етапах проєктування та розробки ПЗ є вкрай важливим для мінімізації витрат на вирішення проблем з безпекою на пізніших етапах впровадження й експлуатації.

У літературі описано різноманітні характеристики якості програмного забезпечення, такі як: продуктивність, масштабованість, модифікація, безпека, доступність, інтеграція, портативність і тестованість (Whitman, & Mattord, 2009). Стратегії вимірювання цих атрибутів якості також вивчалися в об'єктно-орієнтованому коді. Одним із відомих методів вимірювання атрибутів якості програмного забезпечення є об'єктно-орієнтований аналіз метрик. Найпоширенішими факторами для вимірювання безпеки є: конфіденційність, цілісність і доступність. Однак ці фактори вимірювання безпеки є суб'єктивними за своєю природою та їх важко виміряти кількісно. Загалом інформаційна безпека полягає в захисті зберігання, обробки й обміну інформацією з точки зору конфіденційності, цілісності та доступності (Whitman, & Mattord, 2009). Ці три положення є основними компонентами забезпечення безпеки. Коли інформація захищена від несанкціонованого доступу, це означає, що конфіденційність гарантована. Цілісність інформації порушується,

коли інформація піддається пошкодженню, втручанню або будь-якому виду порушення (Whitman, & Mattord, 2009). Цей показник безпеки впливає на атрибути узгодженості, повноти та правильності якості програмного забезпечення. Третім основним атрибутом безпеки є доступність, яка означає, що дані та послуги доступні авторизованим користувачам у будь-який час (Whitman, & Mattord, 2009). Існують ще деякі додаткові характеристики безпеки: справедливий обмін (Fair Exchange), невідмовність відмов (Non-Repudiation), контроль доступу на основі ролей (Role Based Access Control), безпечні канали зв'язку, секретність і цілісність, автентичність, актуальність, безпечний потік інформації та захищений доступ.

Як було зазначено, рефакторинг програмного забезпечення означає, що дизайн або код програмного забезпечення трансформується таким чином, що це покращує якість програмного забезпечення, зберігаючи при цьому його поведінку (Fowler, 2018). На основі цього представлено концепцію рефакторингу та описано кілька можливостей рефакторингу як на етапі проектування, так і на етапі реалізації (Mens, & Tourwé, 2004). Загалом, процес рефакторингу коду складається з таких кроків:

- визначення частин програмного забезпечення, які потребують рефакторингу;
- вибір відповідного підходу до рефакторингу;
- перевірка збереження поведінки;
- застосування вибраного підходу до рефакторингу;
- аналіз впливу рефакторингу на покращення якості програмного забезпечення;
- забезпечення узгодженості між кодом після рефакторингу та відповідною моделлю класу UML.

Перший етап, визначення частин програмного забезпечення, які потребують рефакторингу, є важливим етапом підтримки якості коду. При цьому код не повинен відповідати таким негативним умовам:

1. Дублювання коду (Duplicated Code). Однакові або дуже схожі фрагменти коду знаходяться в різних місцях програми.
2. Занадто великі методи або класи (Long Method/God Object). Існують методи або класи, які виконують занадто багато функцій.
3. Залежність від глобального стану (Global State). Складність у тестуванні та передбаченні поведінки.
4. Сильна зв'язаність (Tight Coupling). Компоненти залежать один від одного надмірно сильно.
5. Слабка згуртованість (Low Cohesion). Компонент виконує різні завдання, не має чіткої відповідальності.
6. Неінформативні назви (Poor Naming). Змінні, методи або класи мають неочевидні чи збиваючі з пантелику назви.
7. Код, важкий для тестування або розуміння. Якщо при зміні виникає страх щось зламати — це сигнал до рефакторингу.
8. Велика кількість умов або вкладеностей.

Другий етап, вибір відповідного підходу до рефакторингу, залежить від кількох факторів: масштабу коду, технічного боргу, бізнес-пріоритетів, наявності тестів і ресурсу команди. Вибір основного підходу відбувається відповідно до критеріїв, які відображені в табл. 1.

Таблиця 1. Основні підходи до рефакторингу

Підхід	Коли підходить	Пояснення
Малий поетапний рефакторинг (Step-by-step/Opportunistic)	Код постійно змінюється, але немає часу на великі зміни	Поступове вдосконалення в межах поточних задач. Найменш ризикований
Цільовий рефакторинг (Targeted)	Потрібно покращити конкретну ділянку коду	Орієнтований на вузьке місце (наприклад, метод, клас). Часто використовується перед додаванням нових фіч
Рефакторинг під час реалізації нових фіч (Preparatory Refactoring)	Нову фічу важко інтегрувати через неякісний код	Перед додаванням нової фічі спрощується структура
Архітектурний рефакторинг	Застаріла архітектура, складна підтримка	Вимагає значних ресурсів, але забезпечує довгострокову гнучкість
Повна переробка (Rewrite)	Код дуже застарілий або не піддається підтримці	Найдорожчий і ризикований варіант. Варто лише при високій технічній заборгованості

Третій етап фокусується на збереженні поведінки коду до того, як він зазнає рефакторингу. Одним із способів досягнення збереження поведінки є автоматизоване тестування. Для цього необхідно визначити перелік тестів, що покриватимуть програмний код, який потребує рефакторингу. Однак це досягається за рахунок додаткових накладних витрат на створення тестів. Щоб уникнути цього, існує підхід розробки через тестування (Test-driven development, TDD), що передбачає написання автоматизованих тестів до написання безпосередньо бізнес-функцій.

На четвертому етапі здійснюється безпосереднє виконання рефакторингу з урахуванням обраного підходу.

Наступним етапом процесу рефакторингу є оцінка виправленого коду та визначення впливу на поліпшення якості. Розробники переважно використовують метрики програмного забезпечення для винесення суджень щодо покращення якості. Значення метрик розраховуються до та після рефакторингу, щоб оцінити вплив рефакторингу на якість коду.

Останній етап процесу рефакторингу пов'язаний із забезпеченням узгодженості коду після рефакторингу та документацією. Узгодженість є одним з основних питань рефакторингу через погодження етапів розробки програмного забезпечення. Наприклад, якщо за допомогою рефакторингу втрачаються «неприємні запахи» в коді, необхідно також внести необхідні зміни в діаграми класів. Для забезпечення ефективності було запропоновано розділити узгодженість на вертикальну і горизонтальну (Spanoudakis, & Zisman, 2001). Вертикальна узгодженість стосується змін в одній моделі, в той час як горизонтальна узгодженість стосується узгодженості кількох моделей. Для цього були розроблені три методи: просте пряме проектування, послідовне зворотне non-gerudiation проектування та кругове проектування для забезпечення узгодженості коду та моделі. Просте пряме проектування дозволяє розробникам відкидати моделі після завершення етапу реаліза-

ції (Fowler, 2018). Зворотне проектування від вихідного коду до моделі може вирішити проблеми неузгодженості. Процес кругового проектування передбачає завершення етапу реалізації, щоб можна було іншим чином піддати модель рефакторингу.

Застосування рефакторингу коду може бути здійснено вручну, автоматизованим або автоматичним способом. Доступно багато інструментів для рефакторингу коду (Alharbi, & Alshayeb, 2024). Одним із найбільш потужних середовищ для рефакторингу є IntelliJ IDEA, що забезпечує розробникам на Java, Kotlin та інших JVM-мовах широкі можливості: автоматичне перейменування змінних і методів, витягування функцій, інлайнинг коду, зміна сигнатур, переміщення класів тощо. IntelliJ активно підказує розробнику потенційні місця для поліпшення коду, знижуючи технічний борг у реальному часі. Для розробників на платформі .NET головним інструментом залишається Visual Studio, що пропонує потужний вбудований механізм рефакторингу для мов C#, VB.NET і F#. Крім того, розширення ReSharper від JetBrains значно підсилює ці можливості, надаючи ще глибший аналіз коду, рекомендації до змін і навіть автоматичне застосування патернів проектування. Не менш важливе місце серед інструментів займає Visual Studio Code, яке хоч і є більш легким інтегрованим середовищем розробника, але підтримує рефакторинг за допомогою плагінів і розширень. Наприклад, розширення для TypeScript та JavaScript дають змогу здійснювати найпоширеніші зміни, такі як перейменування, відокремлення в окремі функції або компоненти, переміщення між модулями. Для Python-розробників ідеальним рішенням є середовище PyCharm, яке також розроблене компанією JetBrains. Воно забезпечує весь базовий набір інструментів рефакторингу, включаючи вбудовування, поділ великих функцій, перейменування методів, а також аналіз залежностей між модулями.

Важливою складовою ефективного рефакторингу є інструменти статичного аналізу коду. Одним із найвідоміших є SonarQube — платформа, яка не тільки аналізує якість коду, але й виявляє потенційні місця, що потребують рефакторингу. Вона вказує на дублювання, «погані запахи» (code smells), порушення принципів SOLID, складність функцій тощо. Таким чином, SonarQube не змінює код напряму, але є важливим орієнтиром для команди розробки. Для розробників на JavaScript та TypeScript доступні додаткові інструменти, зокрема WebStorm — середовище від компанії JetBrains. WebStorm дозволяє швидко перетворювати анонімні функції у named-функції, витягувати JSX-компоненти в окремі файли, оптимізувати імпорти та спрощувати вирази. Ці дії відбуваються автоматично, без ризику зміни логіки програми. Окремо варто згадати й про інструменти, що допомагають у складніших випадках, таких як архітектурний рефакторинг або заміна алгоритму. Наприклад, використання патерна Strangler Fig дає змогу поступово виводити старі модулі з експлуатації, замінюючи їх новими частинами. Хоча цей підхід не є конкретним інструментом, його підтримують сучасні платформи CI/CD та системи оркестрації на кшталт Kubernetes.

Отже, ефективний рефакторинг неможливий без належних інструментів. Вони не лише пришвидшують процес, але й роблять його безпечнішим і більш контрольованим. Вибір правильного середовища та інструментів рефакторингу залежить від мови програмування, типу проекту та особистих уподобань команди, але в усіх випадках ці засоби є надійною опорою для підтримки чистоти та якості коду.

Якість програмного забезпечення відіграє важливу роль для всієї системи в цілому. Так, якість ПЗ розглядається як дуже важливий аспект для розробників, користувачів і керівників проєктів. Для будь-якої системи, яка використовує програмне забезпечення, повинні бути розроблені три види специфікацій, такі як функціональні вимоги, вимоги до якості, вимоги до ресурсів. Якість включає всі характеристики та суттєві особливості продукту, які відносяться до задоволення заданих специфікаціями вимог.

Існуючі метрики безпеки вимірюють систему або з високого рівня (тобто на рівні всієї системи), або з низького рівня (тобто на рівні програмного коду). Ці підходи ускладнюють і роблять дорогим виявлення та виправлення вразливостей, спричинених помилками проєктування програмного забезпечення. Alshammari, Fidge, Corney зосередилися на проєктуванні об'єктно-орієнтованого застосунку та визначили низку метрик інформаційної безпеки, які можна отримати з артефактів проєктування програми. Ці метрики дозволяють розробникам програмного забезпечення виявляти та виправляти вразливості безпеки на ранній стадії, а також допомагають порівняти потенційну безпеку різних альтернативних проєктів (Alshammari, Fidge, & Corney, 2010).

J. Bansiya та C. G. Davis у 2002 р. запропонували ієрархічну модель якості для об'єктно-орієнтованого проєктування (QMOOD), яка розширює попередні методології моделі якості та включає чотири рівні:

1. Визначення показників якості проєкту. Набір атрибутів якості проєкту, які використовуються в QMOOD для опису характеристик об'єктно-орієнтованих систем включають: функціональність, ефективність, зрозумілість, розширюваність, можливість багаторазового використання та гнучкість.

2. Визначення об'єктно-орієнтованих властивостей проєкту. Властивості проєкту можуть бути визначені в процесі дослідження внутрішньої та зовнішньої структури, функціональності компонентів проєкту, атрибутів, методів і класів. Структурною та об'єктно-орієнтованою безліччю властивостей проєкту, які використовуються в QMOOD, є: розмір проєкту, ієрархічна структура, інкапсуляція, пов'язаність, склад проєкту, успадкування, поліморфізм, обмін інформацією, складність.

3. Визначення об'єктно-орієнтованих метрик проєкту.

4. Визначення об'єктно-орієнтованих властивостей дизайну компонентів.

Ця модель визначає підхід до оцінки якості дизайну та програмного коду, а також вводить низку нових об'єктно-орієнтованих метрик. Атрибути якості в моделі QMOOD (Quality Model for Object-Oriented Design) — це характеристики, які визначають якість об'єктно-орієнтованого дизайну програмного забезпечення. Ця модель була запропонована для оцінки дизайну ПЗ на основі метрик, що вимірюються на етапі проєктування.

Основні атрибути якості в QMOOD:

- Reusability (повторне використання — міра, в якій клас або об'єкт може бути використаний у різних контекстах або програмах без змін).

- Flexibility (гнучкість — здатність дизайну адаптуватися до змін у вимогах або середовищі без значних змін).

- Understandability (зрозумілість — наскільки легко програмісту зрозуміти структуру і поведінку системи).

- Functionality (функціональність — ступінь, до якого система виконує свої функції, що визначаються вимогами).
- Extendibility (розширюваність — легкість, з якою систему можна розширити, додаючи нову функціональність).
- Effectiveness (ефективність — здатність системи досягати поставлених цілей із мінімальними витратами ресурсів).
- Maintainability (підтримуваність — простота модифікації програмного забезпечення для усунення помилок або поліпшення функцій).

Ці атрибути пов'язані з характеристиками дизайну ПЗ (наприклад, інкапсуляція, поліморфізм, наслідування тощо), які, у свою чергу, кількісно оцінюються через метрики, як показано в табл. 2. Використання моделі QMOOD при рефакторингу програмного забезпечення дає змогу системно оцінити якість дизайну. Хоча QMOOD не фокусується безпосередньо на безпеці, її атрибути якості тісно пов'язані з безпекою програмного забезпечення. Через покращення структурних характеристик дизайну можна зменшити ймовірність помилок і вразливостей, які загрожують безпеці. Рефакторинг з урахуванням QMOOD покращує структуру та підтримуваність коду, що прямо зменшує ризик виникнення проблем з безпекою.

Таблиця 2. Атрибути якості QMOOD

Reusability	$-0.25 * \text{Coupling} + 0.25 * \text{Cohesion} + 0.5 * \text{Messaging} + 0.5 * \text{Design Size}$
Flexibility	$0.25 * \text{Encapsulation} - 0.25 * \text{Coupling} + 0.5 * \text{Composition} + 0.5 * \text{Polymorphism}$
Understandability	$-0.33 * \text{Abstraction} + 0.33 * \text{Encapsulation} + 0.33 * \text{Coupling} + 0.33 * \text{Cohesion} - 0.33 * \text{Polymorphism} - 0.33 * \text{Complexity} - 0.33 * \text{Design Size}$
Functionality	$0.12 * \text{Cohesion} + 0.22 * \text{Polymorphism} + 0.22 * \text{Messaging} + 0.22 * \text{Design Size} + 0.22 * \text{Hierarchies}$
Extendibility	$0.5 * \text{Abstraction} - 0.5 * \text{Coupling} + 0.5 * \text{Inheritance} + 0.5 * \text{Polymorphism}$
Effectiveness	$0.2 * \text{Abstraction} + 0.2 * \text{Encapsulation} + 0.2 * \text{Composition} + 0.2 * \text{Inheritance} + 0.2 * \text{Polymorphism}$

Хоча модель QMOOD не зосереджена на оцінюванні безпеки ПЗ, її застосування в рефакторингу робить код більш передбачуваним, полегшує аудит безпеки, сприяє впровадженню secure coding practices. Таким чином, модель QMOOD дозволяє будувати формули для оцінки кожного з атрибутів якості на основі відповідних метрик. Це дає змогу автоматизовано аналізувати якість дизайну ще до реалізації коду.

Рефакторинг щодо безпеки ПЗ. Існують стандартні підходи до безпеки програмного забезпечення, які необхідно використовувати протягом усього життєвого циклу. Якщо код має недоліки зі сторони безпеки, рефакторинг мало чим допоможе. Якщо ж розглядати цей підхід у комплексі з іншими, то застосування рефакторингу може призвести до значного підвищення рівня безпеки. Відомо, що оптимальний і добре структурований код майже завжди демонструє хороші показники безпеки. Якщо код хороший, він хороший у всьому. Раніше було розроблено кілька підходів з акцентом на рефакторинг. Так, автори праці «Towards a business process-driven framework for security engineering with the UML» (Vivas, Montenegro, &

López, 2003) застосували аналогію бізнес-моделі до рішень щодо розробки системи. Їхня структура інтегрувала UML (Unified Modeling Language) з вимогами безпеки. UML допомагає візуалізувати поточну архітектуру системи та планувати зміни. Використання UML при рефакторингу особливо корисне для виявлення проблем, планування покращень та спілкування з командою. Стандартна структура моделювання UML дозволила систематично включати атрибути безпеки. Вимоги безпеки визначалися через варіанти використання та впроваджувалися у функціональну специфікацію. Ця процедура повторювалася кілька разів, щоб забезпечити наявність максимальних вимог безпеки в системі. Головна мета — розширити UML обмеженнями, спрямованими на розробку безпечних систем. Для цього використовували аналітичний процес для виявлення шаблонів проектування безпеки. Перший етап був зосереджений на пошуку спільних суб'єктів та об'єктів між розробкою програмного забезпечення і розробкою безпеки (Mzid, Selvi, & Abid, 2024). Другий етап включав визнання обмежень безпеки, сценаріїв зловживань і політик. На заключному етапі треба зібрати думки експертів щодо запропонованих шаблонів.

Рефакторинг — це крок у бік чистого та підтримуваного коду. Але кожен такий крок має ризик, адже щось може зламатися. Особливо в системах, де помилки коштують дорого (фінанси, охорона здоров'я, промисловість). UML може стати потужним союзником для управління ризиками та підвищення безпеки при рефакторингу. Як UML допомагає забезпечити безпечний рефакторинг?

По-перше, це виявлення критичних залежностей (Class Diagram). За допомогою діаграми класів можна: знайти тісно пов'язані модулі, зміни в яких торкаються інших частин; відстежити циклічні залежності, що посилюють ефект змін; зрозуміти, які класи є ключовими точками входу. Перед рефакторингом виділити вузли, від яких залежить решта системи, і працювати над ними з особливою обережністю. І навіть дрібні зміни потрібно покрити тестами. По-друге, необхідно використовувати контроль сценаріїв поведінки (Sequence Diagram). Ці діаграми послідовностей допомагають візуалізувати важливі сценарії. На основі цього перевірити, чи зберігається логіка взаємодії після рефакторингу. Таким чином створюються діаграми послідовностей для ключових дій користувача. А після рефакторингу необхідно перевірити, чи залишилися ланцюжки викликів такими ж, чи покращилися без втрати функціональності. Далі проводиться моделювання переходів стану (State Diagram). Якщо програма містить складну логіку станів (наприклад, замовлення, сесія, передплата), діаграма станів допоможе: переконатися, що всі можливі переходи збережені; захиститись від небажаних переходів; спростити та візуалізувати логіку перевірки. Для цього доцільно зберігати обидві моделі (можна у вигляді PlantUML або через git history) і використовувати як контрольну точку.

UML допомагає не тільки під час проектування, а й при написанні тестів. Так, для діаграми класів тестується поведінка ключових класів та інтерфейсів. Для Sequence Diagram проводяться наскрізні інтеграційні тести. А для State Diagram пишуться тести переходів станів і граничних випадків.

UML не тільки допомагає зрозуміти архітектуру, але й робить процес рефакторингу більш безпечним, передбачуваним та керованим. Особливо у великих і критично важливих проєктах — це не просто діаграми, а візуальний запобіжник від поломок.

Залишається важливим застосування принципів безпеки на кожному етапі рефакторингу. Сценарії використання можуть застосовуватись для вираження вимог безпеки на етапі збору вимог. Виявлені вимоги безпеки можуть бути включені до проєкту. Перехід від проєктування до реалізації автоматично несе певні обмеження безпеки. Для цього критично важливим залишається питання, як мінімізувати шкоду від коду, зменшивши поверхню атаки. Щоб уникнути ненавмисного розкриття даних, було запропоновано використовувати безпечні та захисні методи програмування, використовуючи об'єкти та правила безпеки, які надаються Microsoft.NET Framework 2.0. Перевірка виконувалась на декількох системах різних розмірів і різними мовами розробки (C і JAVA). Виявили, що ризик безпеки рефакторингу можна мінімізувати, використовуючи метрику поверхні атаки (Manadhata, & Wing, 2010).

Існує безліч інструментів, які можна застосовувати для виявлення поганих запахів. Одна із класифікацій представлена раніше. Ця класифікація ділить методи на п'ять класів: аудит коду, метрики програмного забезпечення, абстрактне синтаксичне дерево, візуалізація програмного забезпечення та антипатерни.

Існуючі дослідження, присвячені поганим запахам коду, стратегіям виявлення та методам рефакторингу, дозволили виявити кілька прогалин. Варто зауважити, що у відповідній літературі «погані запахи» коду з погляду безпеки поки що не вивчалися. В основному, література фокусується на пропозиції нових поганих запахів або вивченні впливу існуючих поганих запахів на інші аспекти якості вихідного коду. Деякі дослідники порівнюють різні погані запахи, щоб ранжувати їх за ступенем негативного впливу на якість програмного забезпечення, проте науковці ще не розглядали виявлення та рефакторинг поганих запахів з точки зору безпеки. Погані запахи впливають на численні аспекти якості програмного забезпечення, включаючи аспекти безпеки. Дослідження свідчать про значні результати роботи з покращення низки атрибутів якості в результаті рефакторингу. Методологія дослідження передбачає таку послідовність дій (Mumtaz, Alshayeb, Mahmood, & Niazi, 2018):

1. Вибірка відповідних об'єктно-орієнтованих проєктів.
2. Виявлення неприємних запахів.
3. Фільтрація неприємних запахів відповідно до вимог безпеки.
4. Розрахунок показників безпеки та програмного забезпечення.
5. Застосування рефакторингу до відфільтрованих неприємних запахів безпеки.
6. Виявлення неприємних запахів для забезпечення їх усунення.
7. Розрахунок показників безпеки та програмного забезпечення.
8. Порівняння показників безпеки та програмного забезпечення, обчислених до та після рефакторингу.
9. Аналіз впливу рефакторингу на неприємні запахи, пов'язані з безпекою, для покращення безпеки програмного забезпечення.

У багатьох дослідженнях оцінювався вплив рефакторингу на поверхню атак на програмне забезпечення (Edward, Nyamawe, & Elisa, 2024). Зокрема, в рамках дослідження були проведені експерименти щодо виявлення поверхні атак на програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом, а також виявлено рефакторинги,

виконані в системах з відкритим вихідним кодом, та досліджено ефекти рефакторингу, що застосовується до систем атак на програмне забезпечення. Метод цілеспрямованої вибірки був використаний для відбору 30 проєктів програмного забезпечення з відкритим вихідним кодом, розроблених на Python, C та Javascript, які належать до відомої екосистеми репозиторіїв GitHub. На основі отриманих результатів було виявлено, що на програмні проєкти впливають три поверхні атаки: вразливості, поганий запах коду та помилки. У цьому дослідженні також було визначено, що операції рефакторингу, що застосовуються до програмного забезпечення з відкритим кодом, такі як виділення методу, переміщення методу, перейменування класу, перейменування методу, вбудовування методу, додавання параметра, видалення параметра та підйом методу, були поширеними рефакторингами, що виконуються розробниками в програмних проєктах. Що стосується впливу рефакторингу на поверхню атаки, то дослідження показало, що програмне забезпечення продемонструвало позитивні результати з точки зору меншої кількості помилок, поганих запахів коду та вразливостей після проведення рефакторингу. Однак були випадки, коли рефакторинг мав негативний або нейтральний вплив на поверхню атаки. Це свідчить про те, що хоча рефакторинг може мати позитивний вплив на поверхню атаки програмного забезпечення, він не гарантує зменшення поверхні атаки, але інші фактори, такі як покращення версій програмного забезпечення, еволюція та розширення функціональності, також можуть впливати на загальну поверхню атаки системи.

Проведений аналіз демонструє, що рефакторинг є важливим, але не самодостатнім інструментом для підвищення безпеки програмного забезпечення. Він ефективний лише тоді, коли застосовується в комплексі з іншими стандартними підходами до безпеки протягом усього життєвого циклу розробки. Використання UML значно підвищує безпечність проведення рефакторингу, допомагаючи візуалізувати архітектуру, виявляти критичні залежності та контролювати сценарії поведінки після змін. Діаграми класів, послідовностей і станів дають змогу систематично перевіряти логіку та функціональність, мінімізуючи ризики поломок у критично важливих системах. Крім того, рефакторинг, керований UML, спрощує написання ефективних тестів, що охоплюють ключові класи, інтеграційні ланцюжки та граничні випадки переходів станів. Хоча існують дослідження, які фокусуються на поганих запахах коду та їхньому впливі на якість ПЗ, недостатньо уваги приділяється зв'язку поганих запахів з безпекою. Дослідження показують, що рефакторинг може позитивно впливати на поверхню атаки, зменшуючи кількість вразливостей і помилок. Проте цей вплив не завжди є гарантованим, і в деяких випадках рефакторинг може мати нейтральний або навіть негативний ефект, тому важливо застосовувати метрики оцінювання якості коду з урахуванням вимог безпеки. Загалом, рефакторинг є потужним інструментом для створення чистого та підтримуваного коду, а його свідоме застосування у поєднанні з UML та іншими інструментами значно підвищує загальний рівень безпеки ПЗ.

Висновки

1. Представлено огляд ознак вразливостей ПЗ щодо безпеки. Розглянуто типи поверхневих атак, вразливостей коду та ознак запахів поганого коду. На основі аналізу елементів і ознак вразливостей ПЗ запропоновано напрямки поліпшення

якості коду шляхом застосування рефакторингу. Доведено, що виконання вимог безпеки на рівні проєктування та впровадження є вкрай важливим для мінімізації витрат на вирішення цієї проблеми на пізніших етапах розробки та обслуговування.

2. Розглянуто основні атрибути безпеки ПЗ. Доведено, що найбільш ефективним методом вимірювання атрибутів якості програмного забезпечення є об'єктно-орієнтований аналіз метрик. Показано, що вимоги до характеристик безпеки включають: автентифікацію, авторизацію, шифрування, цілісність і невідмовність відмов.

3. На основі вимог до безпеки запропоновано кілька можливостей рефакторингу як на рівні проєктування, так і на рівні реалізації. Проаналізовано послідовність кроків, з яких складається процес рефакторингу коду. Основна увага сконцентрована на умовах, яким код не повинен відповідати. Це, своєю чергою, і визначає успішність та ефективність операцій рефакторингу з погляду безпеки коду.

4. Показано, що ефективний рефакторинг неможливий без належних інструментів. Вони не лише пришвидшують процес, але й роблять його безпечнішим і більш контрольованим. Проведено огляд середовищ та інструментів рефакторингу, які залежать від мови програмування, типу проєкту тощо, але в усіх випадках ці засоби є надійною опорою для підтримки чистоти та якості коду.

5. Проаналізовано атрибути та показники якості ПЗ. Для дослідницького аналізу запропоновано використовувати ієрархічну модель якості для об'єктно-орієнтованого проєктування (QMOOD), яка розширює попередні моделі якості та включає чотири рівні. Проаналізовано основні атрибути якості в QMOOD.

6. Проаналізовано стандартні підходи до безпечного рефакторингу ПЗ. Показано, що використання UML при рефакторингу особливо корисне для виявлення проблем, планування покращень і спілкування з командою. Доведено, що стандартна структура моделювання UML дозволяє систематично включати атрибути безпеки. Наведено методологію дослідження з дев'яти пунктів щодо впливу рефакторингу на усунення поверхневих атак та поганих запахів коду.

Результати цього дослідження можуть допомогти розробникам програмного забезпечення вибрати відповідні операції рефакторингу для підвищення безпеки програмного забезпечення. Це призведе до економії часу та зусиль, витрачених розробниками на оцінку ефективності операцій рефакторингу, що, у свою чергу, зменшить витрати на обслуговування.

Література

Abid, C., Kessentini, M., Alizadeh, V., Dhauadi, M., Kazman, R. (2020). How does refactoring impact security when improving quality? A security-aware refactoring approach. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 48(3), 864—878. doi:10.1109/TSE.2020.3005995.

Alharbi, M., Alshayeb, M. (2024). A Comparative Study of Automated Refactoring Tools. *IEEE Access*, 12, 18764—18781. doi:10.1109/ACCESS.2024.3361314.

Alshammari, B., Fidge, C., Comey, D. (2010) *Security Metrics for Object-Oriented Designs*. In 21st Australian Software Engineering Conference. Auckland, New Zealand. doi: 10.1109/ASWEC.2010.34.

Bansiya, J., Davis, C. G. (2002). A hierarchical model for object-oriented design quality assessment. *IEEE Transactions on software engineering*, 28(1), 4—17. doi:10.1109/32.979986.

Burchard, E. (2017). *Refactoring JavaScript: Turning Bad Code Into Good Code*. O'Reilly Media.

Edward, E., Nyamawe, A. S., Elisa, N. (2024). A Survey on Secure Refactoring. *SN Computer Science*, 5(7), 952. doi:10.1007/s42979-024-03325-y.

Fowler, M. (2018). *Refactoring: improving the design of existing code*. Addison-Wesley Professional.

Houichime, T., El Amrani, Y. (2024). Optimized design refactoring (ODR): a generic framework for automated search-based refactoring to optimize object-oriented software architectures. *Automated Software Engineering: An International Journal*, 31(2). doi:10.1007/s10515-024-00446-9.

Kaur, S., Awasthi, L. K., Sangal, A. L. (2021). A brief review on multi-objective software refactoring and a new method for its recommendation. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28(4), 3087—3111. doi:10.1007/s11831-020-09491-5.

Manadhata, P. K., Wing, J. M. (2010). An attack surface metric. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 37(3), 371—386. doi:10.1109/TSE.2010.60.

Mens, T., Tourwé, T. (2004). A survey of software refactoring. *IEEE Transactions on software engineering*, 30(2), 126—139. doi:10.1109/TSE.2004.1265817.

Mumtaz, H., Alshayeb, M., Mahmood, S., Niazi, M. (2018). An empirical study to improve software security through the application of code refactoring. *Information and Software Technology*, 96, 112—125. doi:10.1016/j.infsof.2017.11.010.

Mzid, R., Selvi, S., Abid, M. (2024). Research landscape of patterns in software engineering: Taxonomy, state-of-the-art, and future directions. *SN Computer Science*, 5(4), 411. doi:10.1007/s42979-024-02767-8.

Rindell, K., Holvitie, J. (2019). *Security Risk Assessment and Management as Technical Debt*. In International Conference on Cyber Security and Protection of Digital Services. Oxford, UK. doi:10.1109/CyberSecPODS.2019.8885100.

Schuckert, F., Katt, B., Langweg, H. (2023). Insecurity refactoring: Automated injection of vulnerabilities in source code. *Computers & Security*, 128, 103121. doi:10.1016/j.cose.2023.103121.

Spanoudakis, G., Zisman, A. (2001). Inconsistency management in software engineering: Survey and open research issues. In *Handbook of Software Engineering and Knowledge Engineering: Volume I: Fundamentals*, 329—380. doi:10.1142/9789812389718_0015.

Vivas, J. L., Montenegro, J. A., López, J. (2003). *Towards a business process-driven framework for security engineering with the UML*. In International Conference on Information Security. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/10958513_29.

Whitman, M. E., Mattord, H. J. (2009). *Principles of information security*. Boston, MA: Thomson Course Technology.

Xiao, L., Cai, Y., Kazman, R., Mo, R., Feng, Q. (2016). *Identifying and quantifying architectural debt*. In Proceedings of the 38th international conference on software engineering, 488—498. doi:10.1145/2884781.2884822.

Zhang, M., Hall, T., Baddoo, N. (2011). Code bad smells: a review of current knowledge. *Journal of Software Maintenance and Evolution: research and practice*, 23(3), 179—202. <https://doi.org/10.1002/smr.521>.

ANALYSIS OF THE PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF BIOTECHNOLOGY FOR BIOMETHANE PRODUCTION

O. Vorontsov, V. Stabnikov, O. Vorontsov

National University of Food Technologies

Key words:

Biogas
Anaerobic fermentation
Chicken manure
Methanobacterium formicicum
Anthropogenic load

Article history:

Received 07.07.2025
Received in revised form 23.07.2025
Accepted 08.08.2025

Corresponding author:

O. Vorontsov

E-mail:

ewtcorp@ukr.net

Citation: Воронцов О. О., Стабніков В. П., Воронцов О. О. (2025). Аналіз перспектив розвитку біотехнологій отримання біометану. *Наукові праці НУХТ*, 31(4), 67—88.
DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-4-7

ABSTRACT

The potential for biogas/biomethane production, raw material base, economic feasibility, environmental benefits and main problems that hinder the development of the industry were considered. The costs of thermal and electrical energy for the operation of a modern biogas plant were 5—15% of that produced. The issues of the growing threat of a shortage of drinking water and the importance of bioconversion of wastewater into biogas for stabilizing the water balance, energy independence and reducing greenhouse gas emissions were considered. Among the most dangerous sources of water pollution, effluents from livestock complexes and meat and milk processing enterprises should be highlighted. The existing trend of intensification of livestock development and increase in raw material processing volumes led to an increase in the already considerable amount of concentrated effluents. The volumes and energy value of the types of substrates available in agriculture were given. A prerequisite for increasing the economic attractiveness of the biogas industry was the purification of raw biogas from impurities and water vapor. As a result, the methane concentration increased from 50—70% in biogas (depending on the type of raw material and technology used) to no less than 90% in biomethane. Biomethane was used as fuel for motor transport (23%), for heating buildings (17%), for electricity production and for industrial needs. The stages and pathways of bacterial metabolic conversion of organic substrates to produce biogas and its composition were indicated.

An analysis of the state of the industry and the prospects for the growth of biomethane production in Ukraine as a component of "green" energy was conducted. A significant untapped potential of raw materials for the production of biomethane, which was formed in the agricultural sector and the food industry, was identified. Legislative initiatives of the European Union countries and Ukraine, recommendations for industry and investors aimed at the development of the industry were analyzed.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-4-7

АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ БІОТЕХНОЛОГІЙ ОТРИМАННЯ БІОМЕТАНУ

О. О. Воронцов, В. П. Стабніков, О. О. Воронцов

Національний університет харчових технологій

Розглянуто потенціал виробництва біогазу/біометану, сировинну базу, економічну доцільність, екологічні переваги та основні проблеми, які стримують розвиток галузі. З'ясовано, що витрати теплової та електричної енергії на експлуатацію сучасної біогазової установки становлять 5—15% від тієї, що виробляється. Проаналізовано питання щодо зростаючої загрози нестачі питної води та важливість біоконверсії стічних вод у біогаз для стабілізації водного балансу, енергетичної незалежності й зменшення викидів парникових газів. Серед найнебезпечніших джерел забруднення води слід виділити стоки тваринницьких комплексів і підприємств з переробки м'яса та молока. Існуюча тенденція інтенсифікації розвитку тваринництва та збільшення об'ємів переробки сировини призводить до збільшення і так чималої кількості концентрованих стоків. Наведено об'єми та енергетичну цінність по видах субстратів, що доступні в сільському господарстві. Обов'язковою умовою підвищення економічної привабливості біогазової галузі є очищення сирого біогазу від домішок та водяної пари. В результаті концентрація метану підвищується з 50—70% в біогазі (залежно від виду сировини й технології, що використовується) до не менш ніж 90% у біометані. Біометан використовують як паливо для автотранспорту (23%), опалення будівель (17%), виробництва електроенергії та на потреби промисловості. Визначено стадії та шляхи бактеріальної метаболічної конверсії органічних субстратів з отриманням біогазу та його склад.

Проведено аналіз стану галузі та перспективи зростання виробництва біометану в Україні як складової «зеленої» енергетики. Визначено значний невикористаний потенціал сировини для виробництва біометану, що утворюється в аграрному секторі та харчовій промисловості. Проаналізовано законодавчі ініціативи країн Європейського Союзу та України, надано рекомендації для промисловості та інвесторів, спрямовані на розвиток галузі.

Ключові слова: біогаз, анаеробне бродіння, послід курей, *Methanobacterium fortisicum*, антропогенне навантаження.

Постанова проблеми. Виробництво біогазу/біометану у світі стрімко зростає і формується в окрему господарську галузь, що приводить до інтенсифікації існуючих і пошуку нових технологій його отримання.

Формування ринку та збільшення об'ємів біогазу в Україні є важливим і зумовлено низкою об'єктивних факторів. Існує нагальна потреба у диверсифікації енергетичних джерел і зменшенні залежності від традиційних викопних видів палива, особливо в умовах нестабільної геополітичної ситуації. Розвиток біогазової галузі сприяє досягненню цілей «зеленої» енергетики, зменшенню викидів парникових газів, утилізації відходів та покращенню екологічної ситуації в країні. Україна во-

лодіє величезним потенціалом для виробництва біогазу з різноманітних органічних ресурсів. Значні обсяги сільськогосподарських і харчових відходів, осад муніципальних стічних вод та інших видів біомаси можуть бути використані для отримання біогазу, здатного замінити частину імпортного природного газу. Сировина для виробництва біометану нерівномірно розподілена по регіонах України з концентрацією основної його частини в центральних і північних областях.

Незважаючи на значний потенціал, галузь виробництва біогазу/біометану в Україні стикається з низкою проблем, включаючи;

- відсутність статистичних даних про обсяги й енергетичну цінність різних видів сировини, придатних для виробництва біогазу;
- відсутність ефективних технологій отримання біометану при біоконверсії різних видів сировини;
- необхідність великих початкових інвестицій;
- недостатню конкурентоспроможність на внутрішньому ринку порівняно з природним газом;
- інфраструктурні обмеження.

Вирішення цих проблем та створення сприятливих умов для розвитку біогазової галузі є важливим для забезпечення енергетичної безпеки, сталого економічного розвитку й екологічної стійкості України.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Біогаз, що утворюється в процесі анаеробного зброджування органічної речовини, є відновлюваним джерелом енергії, здатним при спалюванні виробляти електрику, тепло та використовуватися для отримання біохімічних речовин (Saboohi, & Hosseini, 2025). Його виробництво не лише зменшує залежність від викопного палива, але й зменшує викиди парникових газів (CH₄ та CO₂). Глобальний ринок біогазу у 2023 р. склав 89 млрд USD і демонструє подальше зростання завдяки привабливим економічним та екологічним перспективам (Rasimphi, Kilonzo, & Tinarwo, 2024).

Основними видами сировини для виробництва біогазу є гній тварин, стічні води харчових виробництв, відходи сільського господарства, збитковий активний мул. Об'єм і склад стоків навіть від однакових джерел нестабільний, ці показники коливаються в широких межах залежно від регіону, часу доби та інших чинників.

Актуальним є визначення придатності різноманітних органічних відходів (харчових, побутових, гною, стічних вод, силосу тощо), деяких видів рослин і водоростей для виробництва біогазу. Спільне зброджування аквапонного стоку з гноем великої рогатої худоби показало кращі результати виробництва біогазу порівняно з монозброджуванням (Paes та ін., 2025). Виявлено, що спільне зброджування різних органічних субстратів покращує баланс поживних речовин і збільшує вихід біогазу. Прикладами успішного спільного зброджування є комбінації фруктових/овочевих і харчових відходів, а також коров'ячого гною, курячого посліду та сироватки (Quin та ін., 2025).

Для підвищення ефективності виробництва біогазу постійно розробляються інноваційні технології, спрямовані на оптимізацію процесу анаеробного зброджування та розширення видів сировини (Danatarova, & Orazberdiyeva, 2024). Основні напрями інновацій:

- попередня обробка сировини;
- конструкції біореакторів;
- оптимізація процесу анаеробного зброджування;

- очищення та збагачення біогазу.

Усереднений склад біогазу, %: метан (CH_4) — 50—75; вуглекислий газ (CO_2) — 25—45; вода (H_2O) — 2—7; азот (N_2) — 1—5; кисень (O_2) < 2; водень (H_2) — 0—3; сірководень (H_2S) — 0,1—0,5; силосани — сліди (Крамар, 2023). Присутність H_2S , CO_2 , азоту та водяної пари знижує теплотворну здатність біогазу порівняно з природним газом. Так, теплота згоряння неочищеного біогазу становить 20,5—23 МДж/м³ (Andlar та ін., 2021), тоді як для біогазу, очищеного від баластних домішок (біометану) цей показник становить 35—40 МДж/м³ (Ngabala, & Emmanuel, 2024) Нижча теплота згоряння природного газу становить 31,8 МДж/м³. Отже, біометан, на відміну від біогазу, завдяки видаленню H_2S , CO_2 , азоту та водяної пари, за своїми фізико-технічними характеристиками (теплота згоряння наближена до природного газу) може транспортуватися через загальні газорозподільчі мережі і використовуватися як заміна природного газу (Gerwin та ін., 2018). Це створює умови для його реалізації споживачам та експорту до країн ЄС.

Інвестиції в біогазові проєкти в США у 2023 р. становили 1,8 млрд USD (Мельник, 2024) і зросли на 40% у 2024 році. У ЄС інвестиції у виробництво біометану, за прогнозами, до 2030 сягнуть 24,5 млрд євро (Kulichkova та ін., 2020).

Китай має спеціалізований науково-дослідний інститут (BIOMA), що займається фундаментальними та прикладними дослідженнями в галузі сільської енергетики й екологічної інженерії, з особливим акцентом на біогазовій технології та мікробіології.

Метою дослідження є систематизація наукових досягнень щодо поточного стану та перспектив виробництва біогазу /біометану у світі та Україні.

Матеріали і методи. Для вивчення перспектив розвитку виробництва біогазу в Україні було використано комплексний підхід, що включає аналіз фахових інформаційних даних, статистичних матеріалів та наукової літератури. Також проаналізовано офіційні статистичні дані ООН, ЄС, служб статистики України та провідних країн світу. Було зібрано інформацію про стан сировини для отримання біогазу (основні види та обсяги), основні джерела, в тому числі відходи тваринництва (поголів'я, види), енергетичний баланс країн (використання різних видів відновлювальної енергії), а також дані щодо теплотворної здатності органічних відходів різних галузей промисловості та комунального господарства.

Було проаналізовано звіти профільних асоціацій, аналітичних компаній і консалтингових агентств, матеріали профільних конференцій, семінарів та вебінарів.

Проведено огляд наукових публікацій у вітчизняних і міжнародних наукових базах даних (Scopus, Web of Science, Google Scholar, фахові видання ВАК України). Напрямами аналізу були:

- сировинна база для виробництва біогазу;
- міжнародний досвід розвитку ринку біогазу;
- виробництво біогазу в Україні.

У процесі дослідження застосовувалися такі методи:

- системний аналіз: для комплексного розгляду проблеми розвитку виробництва біогазу;
- порівняльний аналіз: для визначення поточного стану і тенденцій розвитку ринку біогазу в Україні та його кореляцію з міжнародним досвідом;

- статистичний аналіз: для обробки кількісних даних, отриманих з офіційних статистичних джерел;

- SWOT-аналіз: для визначення сильних і слабких сторін, можливостей та загроз для розвитку виробництва біогазу в Україні.

Викладення основних результатів дослідження. Відходи тваринництва як сировина для отримання біогазу. Зі зростанням народонаселення та підвищення рівня життя у країнах Азії та Африки суттєво зростає споживання м'яса, що, у свою чергу, сприяє інтенсивному розвитку тваринництва та птахівництва. Загальне світове поголів'я всіх видів худоби у 2023 р. сягає більш ніж 4,5 млрд, в тому числі великої рогатої худоби (ВРХ) ~ 1,5 млрд; свиней ~ 1,0 млрд; малої рогатої худоби (овець та кіз, МРХ) ~ 2,1 млрд голів (FAO Statistical Yearbook 2023 — World Food and Agriculture, 2024; World Food and Agriculture — Statistical Pocketbook 2023, 2024).

Слід зауважити, що послід малої рогатої худоби, внаслідок переважно вільного випасу, економічно недоцільно використовувати як сировину для біоконверсії. Світове поголів'я птиці значно більше, приблизно 17—20 млрд утримується одночасно, а всього у 2021 р. вироблено/спожито загалом 70 663 503 000 голів птиці (Faostat, 2024). Статистичні дані свідчать, що найбільша кількість ВРХ, в Індії — 535,78, млн голів, з них корів — 145,12 млн. Найбільша кількість свиней у КНР — 452,6 млн голів (World pig farming: Update on USDA estimates for 2023 and 2024 — Swine news, 2024). Безперечними лідерами за кількістю малої рогатої худоби (МРХ) є Індія — 223,14 млн голів (Global agricultural export 2022, 2023). Дані щодо країн з найбільшим поголів'ям тварин і птиці (2023 р.) зведено в табл. 1 (FAO Statistical Yearbook 2023 — World Food and Agriculture, 2024; World Food and Agriculture — Statistical Pocketbook 2023, 2024).

Таблиця 1. Держави з найбільшим поголів'ям тварин, млн голів, 2023 рік

Держави	ВРХ	Свині	Птиця	МРХ
Бразилія	214,90	44,4	6,184	17,0
ЄС	75,04	268,5,	1,63	70,0
Індія	535,78	9,06	2,732	223,14
КНР	83,21	452,6	11,092	132,7
США	93,70	135,7	9,326	6,9

Світове поголів'я птиці значно більше — приблизно 17—20 млрд утримується одночасно, а всього у 2021 р. вироблено/спожито загалом 70 663 503 000 голів птиці (Faostat, 2024). Азія є безперечним лідером у виробництві та споживанні продукції птахівництва. Разом КНР (понад 15%) та США (13%) забезпечують більш ніж чверть світового виробництва курятини (FAO: Global meat production to grow in 2024, led by poultry, 2024). У 2022 р. в Україні налічувалося близько 150 млн курей-бройлерів та 90 млн курей-несучок, що становило 0,34% загальної кількості курей у звітний період.

Загальна світова кількість птиці по континентах розподілялася наступним чином, % (рис. 1) (Світова статистика птахівництва 2023: виробництво м'яса та яєць, 2023).

У США птахівництво вже практично повністю, а Західній Європі та КНР майже повністю ведеться промисловими методами. Це стосується і відгодівлі курчат-

бройлерів, і виробництва яєць. Склад стоків при такому утриманні має приблизно однакові показники незалежно від кількості голів, що дає змогу оптимізувати технологічні параметри їх переробки в біогаз. Внаслідок утримання поголів'я у приміщеннях значно збільшуються обсяги гною та пташиного посліду, що накопичуються на локальній території, тому утилізація стає нагальною проблемою. Водночас спрощується організація збирання цих відходів для виробництва біогазу.

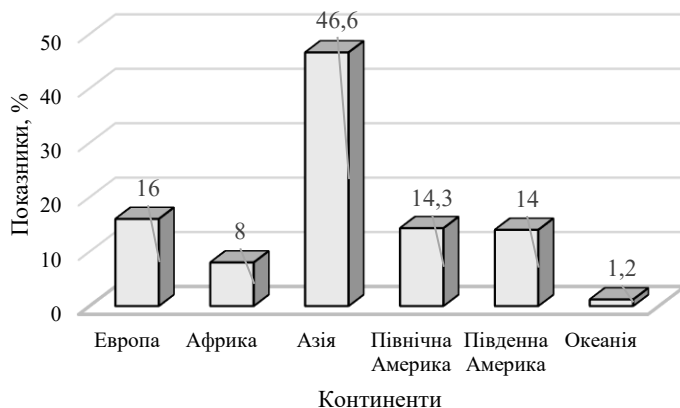


Рис. 1. Виробництво курей у 2022 році

Для виробництва біогазу можливо використовувати лише частину відходів залежно від можливості та доцільності їх збору. Найбільш привабливе виробництво біогазу на фермах з високою концентрацією тварин і птахів завдяки сучасним технологіям гідрозмиву продуктів їх життєдіяльності. Ці умови в різних країнах не однакові. Однак у середньому добовий вихід гною від свині на відгодівлі: ~ 5—6 кг з вмістом сухої речовини (СР): ~ 8—12%. Приблизно 70—80% від СР — органічна частина сирової речовини (ОСР). Вихід біогазу з 1 кг ОСР, залежно від технології, ~ 0,3—0,5 м³ біогазу з вмістом метану ~ 55—65%. Енергетична цінність 1 м³ метану ~ 35,8 МДж (0,0358 ГДж), тож за рік це 1,1—1,5 ГДж електроенергії (Sahara, 2023). У сільському господарстві США вихід гнойових стоків становить близько 185 млн т, а щорічний обсяг гною, який може бути використаний для отримання в енергії, оцінюється в 145,72 млн т (U.S. Department of Agriculture, 2023). У США в 2022 р. було 718 тис. відгодівельних свиноферм, з яких 95,5 тис. відносяться до числа великих, з високими об'ємами концентрованих стоків. Підраховано, що анаеробна переробка гною відгодівельних ферм у біогаз в межах тільки одного штату Каліфорнія (США) дасть змогу щодоби виробляти 800—900 тис. м³ біогазу в рік (U.S. Department of Agriculture, 2023).

У Федеративній Республіці Німеччина щорічний вихід гною від тваринництва та птахівництва в цілому перевищує 200 млн т (у рідкому стані). При анаеробній біоконверсії такого обсягу гною в біогаз можна отримати енергію, що дорівнює 4% загальнонаціональної потреби (Bioeconomy and renewable resources, 2024).

У Великій Британії частка біогазу потенційно може скласти до 3,2% від загальної кількості споживаного в країні природного газу. Переробка гною від усього

поголов'я ВРХ (не рахуючи відходів від свиней і птахів) дасть змогу отримати щорічно кількість газу, еквівалентну 2—3 млн т сирової нафти (Research at UKAEA, 2025).

У сільському господарстві Японії щорічно утворюється близька 56 млн т гнойових стоків. З переходом на інтенсивне виробництво тваринницької продукції, при сучасному рівні анаеробних технологій, економічно доцільно переробляти всю гнойову масу з максимальним отриманням біометану. Розрахунковий об'єм біогазу, 1,7 млрд м³/рік, становить майже 18% усіх енерговитрат у сільському господарстві, а маси збиткового активного мулу, що утворюється, вистачить як добрива на 5,7 млн га сільськогосподарських угідь.

За умови використання сучасних технологій анаеробної переробки в Китайській Народній Республіці (КНР) в рік можна переробити 230 млн т відходів і отримати до 110 млрд м³ біогазу (Teabioenergy, 2024).

За даними Індійської національної ради з прикладних досліджень, в сільському господарстві Індії утворюється 1 335 млн т вологого гною на рік. З цієї кількості можна отримати $8,5 \times 10^{10}$ м³ біогазу, а залишковий шлам (можливо використовувати як безпечне добриво) буде містити 2,65 млн т сполук нітрогену, 1,22 млн т P₂O₅ і 2 млн т K₂O, а також інші поживні елементи (Powergreen, 2024).

Пташиний послід є енергоємною сировиною для біогазових станцій і дає високий вихід газу. Так, свіжий послід несучок, курчат і бройлерів при клітинному утриманні дає приблизно однаковий вихід біогазу — 130—140 м³/т. Послід з підстилкою, що забирається раз на 35—40 днів, забезпечує вихід біогазу близько 80 м³/т (Гелетуша, Кучерук, & Матвеев, 2022). Вміст метану в ньому після 20 днів зброджування досягає 65,77% (Qian, 2025).

При біоконверсії гною в біогаз відбувається утилізація відходів тваринництва, що має велике екологічне та гігієнічне значення. Досить часто додатковим аргументом для будівництва установок із переробки гною є невдоволення громадян, які проживають поруч із фермою, неприємними запахами (Куюмчян, 2016).

Утилізація відходів тваринництва та сільського господарства в цілому — надзвичайно актуальна проблема сучасності. Це, з одного боку, можливість використання енергетичного потенціалу біомаси для отримання газоподібного палива (біогазу), з іншого — запобігання забрудненню довкілля (водного та повітряного басейнів, ґрунту) завдяки утилізації та дезодорації стічних вод. Крім того, стоки тваринницьких комплексів після біотехнологічної переробки є джерелом якісних органічних добрив. Мезофільний режим бродіння не забезпечує повного знезараження гнойових відходів від патогенних мікроорганізмів. Дегельмінтизація, інактивація насіння бур'янів і відмирання патогенної мікрофлори відбувається за умов термофільного режиму бродіння (48—65 °С) (Максішко, 2017). Дослідження в цьому напрямку активно проводяться з шістдесятих років ХХ ст. у зв'язку з бурхливим розвитком та інтенсифікацією скотарства.

Найпоширеніший спосіб отримання енергії з біомаси — анаеробне (без доступу кисню) розкладання відходів, в результаті чого утворюються біогаз і ферментована напіврідка маса, яка є якісним органічним добривом (Семененко, Видренко, & Кравець, 2001).

Взагалі біогаз на сьогодні отримують на базі відходів тваринництва, рослинництва, м'ясопереробної, молочної, масло-жирової та рибопереробної промисловості, крохмалопаткових і цукрових заводів, лісового господарства та ін. (Гармаш,

2013; Stabnikova, Shevchenko, & Stabnikov, 2023). Умовно виділяють чотири стадії бактеріальної метаболічної конверсії органічних субстратів з отриманням біогазу (Курис, & Красный, 2010).

I стадія. Гідроліз є початковим етапом анаеробного зброджування, на якому складні органічні полімери (ліпіди, полісахариди та білки) розщеплюються на простіші, розчинні, включаючи цукри, амінокислоти та жирні кислоти. Цей процес здійснюється гідролітичними бактеріями, які виробляють позаклітинні ферменти, зокрема амілази, протеази, целулази та ліпази. Мікробні групи, що беруть участь у гідролізі, включають родини *Clostridiaceae*, *Pseudomonadaceae* та *Syntrophomonadaceae*, а також роди *Streptococcus*, *Enterobacter*, *Clostridia*, *Micrococci*, *Bacteroides*, *Butyrivibrio*, *Fusobacterium* та *Selenomonas*. Гідроліз часто є лімітуючим для зброджування складних органічних відходів, особливо для лігноцелюлозної біомаси (Mondal, & Das, 2016).

II стадія. На стадії ацидогенезу (кислотоутворення) мікроорганізми перетворюють цукри, амінокислоти, жирні кислоти, отримані під час етапу гідролізу, в коротколанцюгові органічні кислоти, такі як мурашина, оцтова, пропіонова, масляна та пентанова кислоти. Крім того, утворюються спирти (метанол, етанол), альдегіди, діоксид вуглецю (CO_2) та водень (H_2) як проміжні продукти. Цей етап здійснюється ацидогенами, такими як *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Clostridium*, *Micrococcus* та *Flavobacterium*, рід *Lactobacillus*. Ацидогенні бактерії відіграють важливу роль у створенні сприятливих анаеробних умов для розвитку облігатних анаеробів, що беруть участь у пізніших стадіях процесу. На цьому етапі виробляється приблизно 20—30% від загальної кількості CO_2 (Pal, Tripathi, & Kumar, 2021). До ключових ферментів ацидогенезу належать гексокіназа, фосфоглюкозоізомераза, фосфофруктокіназа, альдолаза, тріозофосфатізомераза, гліцеральдегід-3-фосфатдегідрогеназа, фосфогліцераткіназа, мутаза, енолаза, піруваткіназа (для гліколізу); піруват: ферредоксин оксидоредуктаза (PFOR), NADH: ферредоксин оксидоредуктаза (NFOR) та ферредоксин гідрогеназа (для виробництва H_2); а також лактатдегідрогеназа, фосфотрансацетилаза, ацетаткіназа, етанолдегідрогеназа, ацетальдегіддегідрогеназа, ацетил-КоА ацетилтрансфераза та бутирил-КоА дегідрогеназа.

При цьому формуються необхідні умови для активації метанових бактерій (рівень рН знижується). Цей етап називають фазою біологічного окислення.

III стадія. На стадії ацетогенезу органічні кислоти та спирти, що утворилися під час ацидогенезу, перетворюються на ацетат, H_2 та CO_2 (Quin, Chen, & Zou, 2025). В цьому процесі беруть участь групи бактерій *Syntrophomonas* та *Syntrophobacter*, до яких належать *Clostridium aceticum*, *Clostridium thermoaceticum*, *Acetobacterium woodii*. Ацетат і водень у подальшому безпосередньо використовуються метаногенними мікроорганізмами. Приблизно 70% виробництва метану пов'язано з відновленням ацетатів на цьому етапі (Pal, Tripathi, & Kumar, 2021). До ключових ферментів належать ті, що беруть участь: в окисненні ацетату (цитратсинтаза, аконітаза, ізоцитратдегідрогеназа), бутирату (КоА трансфераза, бутирил-КоА дегідрогеназа), пропіонату (піруваткарбоксілаза, малатдегідрогеназа, фумаратгідратаза, фумаратредуктаза, сукцинатдегідрогеназа, сукциніл-КоА синтаза, метилмалоніл КоА мутаза/епімераза/декарбоксілаза, пропіонат-КоА трансфераза) та етанолу (наприклад, ацетальдегіддегідрогеназа).

В ацетогенів синтез ацетату з вуглекислого газу та водню в клітинах відбувається через стадію утворення проміжних продуктів, таких як ацетил-КоА та піруват: $4\text{H}_2+2\text{CO}_2\rightarrow\text{CH}_3\text{COOH}+2\text{H}_2\text{O}$.

IV стадія. Метаногенез є заключним етапом анаеробного зброджування, на якому метаногенні археї (*Methanobacterium*) виробляють метан (CH_4). Вони використовують субстрати, що утворилися на попередніх фазах, зокрема оцтову кислоту, H_2 , CO_2 , метанол, метиламін або диметилсульфід. Так, *Methanosarcina* є універсальним метаногеном, здатним використовувати ацетокластичні, гідрогенотрофні та метилотрофні шляхи (Mesquita, Wu, & Tringe, 2023). *Methanothrix* є ацетокластичним метаногеном, чутливим до високих концентрацій аміаку. До гідрогенотрофних метаногенів відносять *Methanoculleus*, *Methanobacterium*, *Methanoregula* та *Methanomassiliicoccus* (Piercy, Sun, & Guo, 2025). Всі метанові бактерії належать до облигатних анаеробів, тому природний процес розкладу органічних речовин субстрату при їх участі можливий тільки без доступу кисню.

Основними метаболічними шляхами метаногенезу є ацетокластичний, що включає розщеплення ацетату та відповідає за приблизно 70—72% утворення CH_4 , та гідрогенотрофний, що полягає у відновленні CO_2 за допомогою H_2 і становить близько 28—30% виробництва CH_4 . Також існує метилотрофний шлях, що використовує метильовані сполуки (Siroka, Detman, & Btazczyk, 2018). Метаногенні саме на цьому етапі синтезується 90% всього метану — продукти життєдіяльності бактерій, що утворилися на попередніх етапах, — ацетат, вуглекислий газ та водень під дією метаногенів перетворюються переважно на метан. Утворення метану відбувається за біокаталітичною реакцією: $4\text{H}_2+\text{CO}_2\rightarrow\text{CH}_4+2\text{H}_2\text{O}$.

Метанові бактерії (відомо близько 10 видів *Methanococcus* і *Methanobacterium*, (як приклад *Methanobacterium formicicum*, *Methanospirillum hungati*)) адаптовані до існування в різних поживних середовищах. Відсутність у клітинній стінці пептидогліканового скелета зумовлює нечутливість метаногенів до дії антибіотиків.

Для процесу одержання біогазу важливими є такі технологічні параметри: температура, рН, склад сировини, присутність інгібіторів, концентрація твердих частинок, завантаження об'єму реактора, інтенсивність масообміну, тривалість процесу (Сербін, 2003).

Вибір вихідної сировини для виробництва біогазу значно впливає на вихід кінцевого продукту. З 1 тонни гною ВРХ можливо отримати 200—350 м³ біогазу з вмістом метану приблизно 60%. З 1 тонни різних видів рослинної сировини — 300—630 м³ з вмістом метану до 70%. Максимальну кількість біогазу можна отримати з 1 тонни жирів — до 1300 м³, з вмістом метану до 87% (Рагушняк, 2010). Основним енергоносієм у біогазі є метан (Jameel та ін., 2024).

При анаеробному зброджуванні розрізняють теоретичний (можливий за розрахунками) і технічно-реалізований вихід газу. В середині ХХ ст., на початку розвитку біогазової індустрії, фактичний вихід біогазу становив лише 20—30% від теоретичного. На сучасних біогазових підприємствах, завдяки інтенсифікації процесу анаеробного зброджування, вдосконаленню технологій, конструкцій біореакторів тощо вдалося збільшити вихід біогазу до 60% і навіть більше.

Для промислового виробництва біометану використовують бродильні ємності (дайджестери), оснащені мішалками, шлюзовими пристроями для подачі субстрату і відведення продуктів бродіння у вигляді рідкого добрива (надлишкового ак-

тивного мулу) та біогазу. Крім відходів, для отримання біогазу можна використовувати спеціально вирощені культури (силосна кукурудза, рапс, водорості). Тривалість метанового бродіння цих культур і рослинних відходів сільськогосподарства (солома, бадилля картоплі, цукрового та кормового буряків) коливається від 24 до 120 діб. У розрахунку на 1 т сухого органічного залишку вихід газу становить в межах 500—550 м³ (Рагушняк, & Анохіна, 2013).

Біогаз можна отримувати на сміттєвих звалищах (звалищний газ) (Ткаченко, & Степанов, 2004). Тверді побутові відходи (ТПВ) містять біологічні матеріали, і на полігонах стихійно створюються сприятливі умови для їх анаеробного зброджування. ТПВ мають більш неоднорідний склад, ніж сільськогосподарська сировина в біогазових установках, і біоконверсія відбувається повільніше, зазвичай протягом декількох років. Найважливішою особливістю метанового бродіння є його виняткова тривалість і складність прогнозування рівня метаногенезу навіть при використанні чистих культур мікроорганізмів. Кінцевий продукт, відомий під назвою «звалищний газ», являє собою суміш переважно CH₄ і CO₂. Теоретичний вихід газу протягом «життя» полігону може становити 150—300 м³ на тонну ТПВ при вмісті метану від 50 до 60%. У процесі формування полігону кожна ділянка після заповнення покривається непроникним шаром глини або подібного матеріалу, створюючи умови для анаеробного зброджування. Газ збирається системою пов'язаних між собою перфорованих труб, встановлених у тілі полігону до глибини 20 м. З 1 т сухої речовини твердих побутових відходів утворюється 170—200 м³ біогазу, 25—30 мас. % якого становить метан, частка якого в утворенні парникового ефекту оцінюється в 6%. Ряд фахівців вважають, що необхідне концентрування відходів виробництв на єдиних площах, що дасть змогу забезпечити більш повне використання сировини та знизити транспортні витрати.

Щорічно в сезон переробки накопичується величезна кількість відходів плодоконсервного виробництва. Частину цих відходів становлять високомолекулярні сполуки, які не є джерелом харчування метаногенних бактерій (Бондарь, Чабанова, & Недобийчук, 2008). Однак присутні інші поживні компоненти, солі та мікроелементи, що формують гарне поживне середовище для більшості мікроорганізмів, в тому числі і для метаногенів.

Особливістю метанового бродіння є його тривалість і складність для моделювання. На відміну від інших видів бродіння, воно відбувається в нестабільних умовах за наявності елективних мікроорганізмів, що складають симбіоз. Встановлено, що з відходів консервної промисловості у вигляді вичавків та інших неїстівних залишків можна отримувати біогаз. З депектинізованих вичавків біогаз ефективно можна отримувати тільки в умовах безперервного процесу. Біодеградація субстрату (по сухих речовинах) становитиме близько 50%.

Міжнародний досвід розвитку ринку біогазу. У всьому світі нині успішно ведуться роботи з отримання біогазу з відходів тваринництва: свинячого, коров'ячого гною і куриного посліду (Biogas, & biomethane in a nutshell, 2024). Виробництву біогазу приділяється велика увага в країнах Азії і басейну Тихого океану, де експлуатується найбільша кількість біогазових дигестерів у світі. У 2023 р. в Азії налічувалося приблизно 45,03 млн біогазових дигестерів. З них близько 99,72% припадають на домогосподарства, а 0,28% — на промислові дигестери (Qin, 2024). Тільки в Індії налічується понад 5 млн біогазових установок, перева-

жно дрібних. Передбачається, що подальший розвиток індустрії отримання біогазу дасть змогу скоротити використання електроенергії в сільській місцевості на 44%, кам'яного вугілля на — 15%, деревини — на 79%.

Уряд Індії активно підтримує розвиток біогазової галузі через різні програми, такі як Національна програма біоенергетики, схема SATAT (Sustainable Alternative Towards Affordable Transportation) та програма GOBARdhan. (Biogas Programme, 2025). Акцент зроблено на впровадженні невеликих ферментерів — від 2 м³, в розрахунку потреби на одну родину або громаду. Передбачається довести їх кількість до 12 млн, щоб забезпечити енергією 90 млн осіб.

У КНР зараз діє понад 7 млн метантенків. Основною сировиною для виробництва біометану є такі сільськогосподарські відходи, як рисове лушпиння, відходи переробки маниоку та відходи олійно-екстракційних заводів (POME), а також гній худоби (Billen, 2024). Крім того, в Китаї розглядається можливість вирощування енергетичних культур для переробки на біометан (Qian, 2015). До 60% автобусного парку Китаю як паливо використовує біометан.

Прискореними темпами йде впровадження біоенергетичних установок в Європі. В 1998 р. налічувалося близько 800 невеличких біогазових установок, що працювали на гної і посліді. Наприкінці 2023 р. в Європі було вже 1510 заводів з виробництва біометану, які містили більш ніж 18 000 реакторів (Матвєєв, 2024). Сукупне виробництво біогазу та біометану у 2021 р. склало 196 ГВт·год або 18,4 млрд м³. Це становило 4,5% споживання газу Європейським Союзом у тому ж році. Середня європейська біогазова установка виробляє біогазу, в перерахунку на енергію, приблизно 8 ГВт·год на рік, в той час як середній біометановий завод виробляє 35 ГВт·год/рік (European Biogas Association, 2024). Встановлена потужність виробництва біометану в Європі досягла 6,4 млрд м³/рік станом на перший квартал 2024 року. Установки з виробництва біометану працюють у 25 країнах Європи. Країнами з найбільшим темпом зростанням виробництва біометану у 2023 р. були Італія, Франція, Данія та Велика Британія. У 2022 р. до країн-виробників біометану приєдналася Португалія, у 2023 р. — Литва та Україна. Вже працюючі в цих країнах біометанові заводи (середня потужність 35 ГВт·год/рік) також у рази більші за енергоефективністю, ніж біогазові (середня потужність 9 ГВт·год/рік) (Звіт ЕВА — SAF Україна, 2024).

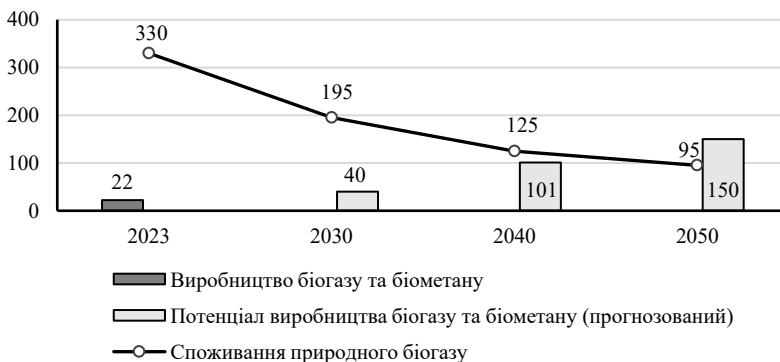


Рис. 2. Об'єми біогазу/біометану, що планується отримати у країнах ЄС до 2050 року, млрд м³

За оцінками Європейської біогазової Асоціації у 2030 р. Європа потенційно могла б виробити 40 млрд м³ біометану. У 2040 р. — вже 111 млрд м³, з яких 101 млрд кубометрів припадає на країни ЄС. Цей потенціал складається з 74 млрд м³ від анаеробного зброджування (67% від загального обсягу) та 37 млрд м³ від термічної газифікації (33% від загального обсягу) (European Biogas Association, 2024). У ЄС у 2022 р. встановлена потужність виробництва біометану становила 4,5 млрд м³ на 1322 заводах. Інвестиції у виробництво біометану в Європі заплановані у 25 млрд євро на період до 2030 року. Планується підняти щорічний об'єм одержання біометану до 35 млрд м³. Обіг біогазової промисловості в ЄС-27 у 2022 р. становив 5,8 млрд євро, що на 0,3 млрд євро більше порівняно з 2021 роком. Так, біогаз і біометан охоплюють 3% обігу всіх технологій відновлюваної енергетики.

Сільськогосподарські залишки (гній від тварин, відходи з ферм, рослинні залишки та енергетичні культури) є рушійною силою європейського ринку біогазу. Вони становлять 65—70% сировини для отримання біометану. В Західній Європі не менше половини всіх птахоферм опалюються біогазом, де встановлені невеликі установки з об'ємом реакторів від 100 до 300 м³ (Статистика ЄБА, 2022).

У більшості країн існує один домінуючий тип сировини для виробництва біогазу (Звіт Європейської біогазової асоціації, 2020). Так, у Німеччині, Австрії, Латвії, Угорщині та Італії це енергетичні культури та сільськогосподарські залишки (становлять понад 70% від усієї сировини). У Бельгії, Данії та Польщі більшу частку сировини для виробництва біогазу складають промислові органічні відходи харчової промисловості.

У 2023 р. 23% отриманого біометану використовувалося як моторне паливо для транспорту, 17% — для опалення будівель, 15% — для виробництва електроенергії, 13% — для промисловості, а залишок — на власні потреби господарств. Це свідчить, що біометан — універсальне джерело відновлюваної енергії. Споживання енергії транспортним сектором становило понад 29% від загального споживання енергії в ЄС, з яких 10% від відновлюваних джерел. У таких країнах, як Італія, Швеція, Фінляндія та Естонія, майже весь біометан використовується як транспортне паливо (Biomethane in Transport — European Biogas Association, 2019). Для підвищення конкурентоспроможності на ринку палива впроваджена програма зрідженого біометану (bio-LNG). У 2023 р. в Європі було 59 працюючих заводів з виробництва зрідженого біометану (bio-LNG), і очікується, що ця кількість різко зросте. Планується будівництво та введення в експлуатацію 134 заводів з виробництва bio-LNG до 2027 року. Прогнозована потужність виробництва bio-LNG до 2027 р., з урахуванням лише підтверджених проєктів, становить 21,1 ГВт·год на рік (Bio-LNG: A Pillar of Europe's Energy Transition to Net-Zero, 2025).

Загальне виробництво електроенергії з біогазу та біометану склало у 2022 р. 72 ТВт·год, що становить понад 6% електроенергії з відновлюваних джерел, виробленої в країнах ЄС. Потужність диспетчеризованої (гнучкої) генерації електроенергії в ЄС поступово зменшується (з 425 ГВт у 2012 р. до 380 ГВт у 2022 р.). Її виробництво планується забезпечити за рахунок відновлювальних джерел енергії. Німеччина вже передбачає бронювання 2 ГВт спеціальної гнучкої потужності за рахунок біогазових ТЕС.

На сьогодні серед країн ЄС лідером по кількості біогазових установок є Німеччина, де їх встановлено понад 11 000. За період з 2000 р. кількість біогазових установок у Німеччині збільшилася з 1043 до 11 000, більше ніж у 7,8 раза. В той

же час встановлена потужність електрогенерації виросла від 78 МВт до 1 600 МВт, тобто більш ніж у 20 разів. Таке значне збільшення електричної потужності пояснюється тим, що з 2005 р. у Німеччині переважає будівництво великих біогазових заводів, що економічно доцільно. До 30—40% вартості проєктних і будівельно-монтажних робіт припадає на засоби автоматизації, які незначно залежать від потужності установки. Аналогічна ситуація і з комунікаціями. Тому питома вартість біогазу і самих біогазових установок знижується зі збільшенням їх потужності. За лідером прямують Італія, де функціонує близько 1700 установок, Франція — 837, Швейцарія — 634. У Великій Британії налічується 715 підприємств з виробництва біометану (European Biogas Association, 2024).

Біогаз переважно використовувався для виробництва електричної та теплової енергії. Домінуюча частина використання біогазу припадає на виробництво електроенергії, яка становить 30,3 кВт·год за 2023 рік. Реально використаний потенціал сировини для виробництва біометану (екскременти тварин, біомаса культур, що вирощуються спеціально для «зеленої» енергетики, інших відходів) становив близько 40 млн т у 2020 р., порівняно з 5,9 млн т у 2007 р. У 2030 р. об'єм отриманого біогазу в країнах ЄС може скласти більше третини власного видобутку природного газу в Європі, або близько 10% споживання.

Теплотворна здатність біогазу складає 20,934—25,1208 МДж/м³ і залежить від відсоткового вмісту в ньому двоокису вуглецю. Після очищення від баластних домішок теплотворна здатність біогазу збільшується. Зазначимо, що 1 кВт·год = 3,6 МДж, отже, з 1 м³ біогазу можливо отримати до 6,98 кВт·год електроенергії.

Потенціал біомаси для енергетики в цілому набагато більший, ніж його використання натеper, проте цей потенціал може бути реалізований при сумісній цілеспрямованій діяльності на місцевому, регіональному, національному і міжнародному рівнях.

Сировинна база для виробництва біогазу в Україні. Інформація про кількість біогазових установок в Україні є дещо розрізною, оскільки галузь активно розвивається, і дані швидко змінюються. Так, за даними Біоенергетичної асоціації України (UABIO), у 2020 р. в Україні налічувалося 27 біогазових проєктів (Біогазові проєкти в Україні, 2020).

Згідно з інформацією Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України, кількість біогазових установок в Україні налічує близько 244 одиниць, які виробляють 4,3 млрд м³/рік (Біоенергетика, 2024). Припускаємо, що UABIO враховували біогазові проєкти тільки як цілісні комплекси, в даних Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України враховані усі, в тому числі й окремі метантенки.

Сировиною для виробництва біогазу можуть бути практично будь-які органічні відходи та стічні води з високим рівнем вмісту органічних речовин. Певні переваги виникають при використанні саме стічних вод, тому що зникає потреба достатньо дорогавартісних операцій, таких як подрібнення, замочування тощо. Крім того, не потрібно використовувати питну воду для приготування субстратів. Це особливо важливо в регіонах, що страждають від нестачі води. Новітні дослідження доводять, що можливе суспензійне розкладання органічних відходів, зокрема курячого посліду шляхом додаванням залізовмісної глини до суспензійного анаеробного реактора (Ivanov, Stabnikov, & Tau, 2019). Навпаки, виконується дуже важлива функція захисту довкілля від антропогенних навантажень, збереження

водойм і, в разі використання стоків від тваринницьких сільськогосподарських господарств, екологізація територій.

Як сировину для виробництва біогазу використовують переважно відходи тваринництва (гній, послід, стічні води) та інші сільськогосподарські відходи (солома, кукурудзяний силос, бурякове і картопляне бадилля, листя), агропромислові відходи (барда, меляса, відходи овочів і фруктів, жом). Встановлено, що з 1 т біоресурсів можна отримати 25—500 м³ біогазу, до 0,9 т біодобрив, а при повному спалюванні біогазу — 500—1 000 кВт електричної або теплової енергії. В працях українських фахівців (Калетник та ін., 2012) проаналізовано обсяги стічних вод за джерелами походження.

Таблиця 2. Орієнтовні обсяги скиду стічних вод з різним ступенем очистки

Галузі господарства	Скид стічних вод, млн м ³ / рік				
	всього	в тому числі			
		без очистки	недостатньо очищених	нормативно чистих без очистки	нормативно чистих після очистки
Всього в Україні	19564	503	2397	13038	3626
% до всього	100,00	2,60	12,25	66,63	18,52
в тому числі:					
промисловість	12408	345	1112	9704	1247
% до обсягу	63,40	1,76	5,68	49,60	6,36
комунальне господарство	3816	111	1250	114	2341
% до обсягу	19,50	0,57	6,39	0,57	11,97
сільське господарство	3245	45	3	3188	9
% до обсягу	16,60	0,23	0,02	16,30	0,05
інші галузі	95	2	32	32	29
% до обсягу	0,50	0,04	0,16	0,16	6,14

Таким чином, стічні води сільського господарства становлять 16,6% від загального об'єму, а нормативно чисті з них після очистки тільки 0,28%. Час гідравлічного перебування всередині реактора (залежно від субстратів) — 20—40 днів. За цей час органічні речовини біомаси споживаються мікроорганізмами. Час бродіння також залежить від об'єму реактора (Калетник та ін., 2012). На початку роботи дигесторів бажано використовувати стартові культури. В біореактор стартові культури мікроорганізмів вводяться один раз, при першому запуску, одним з таких способів: а) введення концентрату чистих культур мікроорганізмів; б) додавання свіжого гною; в) додавання біомаси з іншого діючого реактора. Зазвичай, використовується другий і третій способи через низьку вартість і простоту.

Орієнтовний вихід біогазу з відходів становить, м³/тону: гною ВРХ — 40; гною свиней — 35; осаду стічних вод — 5; посліду птахів — 40; овочевих відходи — 48; відходів молочної промисловості — 50; відходів пивоварних заводів — 200; харчових відходів — 189; відходів обробки риби та риб'ячого жиру — 300; трави (суха речовина 33%) — 165; соняшника (суха речовина 23%) — 90; рапсової макухи (суха речовина 90%) — 620; барди (суха речовина 31%) — 250 (Clean Energy

and Domestic Fertilizer Projects, 2024). Таким чином, в перерахунку на 1 т сухої органічної речовини, можна одержати після анаеробної біоконверсії:

- зі свинячого гною — 500 м³ біогазу, або 0,36 т умовного палива (т у. п.);
- з гною ВРХ — 450 м³ біогазу, або 0,321 т у. п.;
- з пташиного посліду — 660 м³ біогазу, або 0,428 т у. п.

Біогазові технології є найбільш ефективними для утилізації органічних відходів, добре придатних до біоконверсії. Максимального ефекту можна досягти за наявності близько розташованих споживачів якісних органічних добрив, теплової та електричної енергії.

Виробництво біогазу в Україні. Загальний енергетичний потенціал органічних відходів у сільському господарстві України сягає 34 млрд м³/рік. Переробка одних тільки тваринницьких відходів у масштабах України дасть змогу отримати більш ніж 3 млрд м³ біогазу.

Перша з нині працюючих на відходах тваринництва біогазова установка (БГУ) промислового типу була побудована в 1993 р. на свинофермі підсобного господарства комбінату «Запоріжсталь» (Гелетуха, Кучерук, & Матвеев, 2013). Поголів'я свиней, що витримується на відгодівлі, становить від 8 000 до 12 000, відповідно, за добу отримується 20—22 т гною. Об'єм метантенка становить 595 м³. Технологія та обладнання розроблялись компанією Bigadan Ltd, Данія. Програма була реалізована для очищення стоків і зменшення споживання енергії. Від утилізації біогазу отримується тепла енергія, яка реалізується на власні потреби свинокомплексу (Куріс, 2010). У 2003 р. у рамках проекту технічної допомоги урядом Королівства Нідерландів за участю голландської компанії VTG, НТЦ «Біомаса», «УкрНДІагропроект» було збудовано біогазову установку в ТОВ «Агро-Овен» (с. Єленівка Магдалинівського району, Дніпропетровської області), де відгодовується 20 тис. голів свиней (Четверик, & Лісничий, 2013). При постійній роботі установка дає змогу отримати 30 кВт теплової та 150 кВт електричної енергії за добу. Біогазова установка складається з двох реакторів об'ємом 1000 м³ кожен. Реактори завантажуються 80 т свинячого гною на добу, а також невеликою кількістю відходів з боєнь птиці. При роботі в мезофільному температурному діапазоні виробництво біогазу становить 3 300 м³ на добу, а концентрація метану в біогазі становить 50—65 об. %. Встановлена потужність теплових електростанцій становить 160 кВт·год і 300 кВт·год. У 2007—2008 рр. ТОВ «Зорг Україна» ввело в експлуатацію три біогазові установки потужністю 0,4—1,0 мВт/рік електричної та теплової енергії в Київській, Харківській і Херсонській областях. Біогазова установка в с. Терезине Київської області працює з 2009 року. Реактор має добову потужність завантаження 60 м³ вхідної сировини (Комар, 2019). Кормові відходи також завантажують у реактор. Робочий об'єм реактора 1500 м³. При роботі в мезофільних умовах виробництво біогазу становить 2160 м³ на добу, а концентрація метану в ньому становить 50—65% об. Проект біогазової установки розроблено німецькою компанією «LIPP» (Панцирева, 2019). З 2009 р. у ТОВ «Українська молочна компанія» (с. Великий Купіль, Броварського району, Київської області) запущена і функціонує біогазова установка з комбінованим виробництвом електроенергії та тепла потужністю 625 кВт/добу, на якій переробляють відходи від комплексу, де

утримується поголів'я чисельністю 4 тис. дійних корів. У 2011 р. в с. Копанки Івано-Франківської області на базі свиноферми збудували біогазову установку, що належить агрофірмі «Даноша». Переробка 90 000 т свинячого гною та 10 000 т кукурудзяного силосу на рік є достатньою для виробництва такої кількості газу, що забезпечує потреби електростанції потужністю 1 мВт (Кучерук, 2016). Біогазова установка птахофабрики «Оріль-Лідер», що в Єлизаветівці Дніпровського району, запрацювала в 2013 році. Встановлена потужність 5 мВт. У 2014 р. реалізовано проєкт біогазового комплексу АПК «Астарта-Київ» з прогнозованою потужністю 13,9 мВт (понад 50 млн м³ біогазу на рік). Сировиною для вироблення біогазу є побічні продукти цукрового виробництва (сирого жому) та органічні відходи сільськогосподарського виробництва. Біогаз є альтернативним заміником природного газу для соєпереробного та цукрового заводів холдингу. Завод оснащений інноваційним обладнанням провідних світових виробників «Börger GmbH» (Німеччина), «Streisal» (Німеччина), «Sulzer» (Швейцарія), «HUNING» (Німеччина), «Siemens» (Німеччина), «УТК» (Україна). Реалізація проєкту здійснювалася за фінансової підтримки Європейського банку реконструкції та розвитку.

У Маріуполі Донецької області в 2012 р. ввели в експлуатацію систему збору та утилізації біогазу на полігоні побутових відходів. Цей проєкт вітчизняної компанії «ТНС Екко» реалізувався в Україні вперше. Технологію утилізації біогазу у пристрої для спалювання на Приморському полігоні ТПВ спеціалісти називають унікальним для нашої держави поєднанням турботи про навколишнє середовище, інноваційні технології та бізнесу. Система збирання й утилізації газу надає можливість звести до мінімуму виділення канцерогенних органічних речовин, які утворюються в ході спалювання відходів, і зменшити негативний вплив полігону на довкілля та здоров'я мешканців. Також у Маріуполі планували побудувати першу в Україні теплоелектростанцію, яка б працювала на біогазі з полігону ТПВ.

Ключові об'єкти та компанії України, що експлуатують біогазові/біометанові заводи, це Акціонерне товариство закритого типу «Миронівський хлібопродукт», яке має біогазові установки на базі «Орель-Лідер» та вінницької птахофабрики. Загальна потужність установок становить 17,692 мВт. ТОВ «Україна-2001» має біогазову станцію на території Теофіпольського цукрового заводу. Потужність станції — 15,609 мВт/рік.

Для України біоенергетика є одним із стратегічних напрямків розвитку сектору відновлюваних джерел енергії, враховуючи високу залежність від імпортних енергоносіїв, передусім природного газу, і великий потенціал біомаси, доступної для виробництва енергії. На жаль, темпи розвитку біоенергетики в Україні досі істотно відстають від європейських. На сьогодні частка біомаси у валовому кінцевому енергоспоживанні становить 1,78%.

В Україні щорічно збирається понад 50 млн т зернових культур. Це означає утворення у значних обсягах соломи і рослинних відходів, як побічних продуктів сільськогосподарського рослинництва. Однак практично не реалізується (на рівні 1%) енергетичний потенціал соломи зернових культур та ріпаку. Виробництво енергії з біогазу не шкідливе для навколишнього середовища, оскільки не спричиняє додаткову емісію парникового CO₂ і зменшує кількість органічних відходів.

На відміну від енергії вітру і сонячного випромінювання, біогаз можна отримувати незалежно від кліматичних і погодних умов, а порівняно з викопними джерелами енергії біогаз має достатньо великий відновлюваний потенціал. Сучасний рівень виробництва біогазу в Україні становить близько 230 млн м³ на рік. Цей обсяг залишається відносно стабільним щонайменше з 2020 року. Однак, порівнюючи поточне виробництво з потенціалом країни, який сягає 21,8 млрд м³ на рік, стає очевидним нехтування наявними ресурсами.

Ефективним шляхом доповнення та заміни традиційних паливно-енергетичних ресурсів є виробництво та використання біогазу, який утворюється в результаті застосування технологій метанового зброджування біомаси і на 60—70% складається з метану. Іншим джерелом біогазу є сміття на полігонах твердих побутових відходів. Крім цього, джерелом біогазу є стічні води. Утилізація осадів міських і промислових стічних вод забезпечує вирішення важливих екологічних, енергетичних і соціальних проблем міст, особливо мегаполісів.

За рахунок використання біогазу, отриманого в результаті анаеробної ферментації біомаси, можна замінити такі види палива: а) природний і зріджений газ для забезпечення потреб у теплової та електричної енергії без комунікацій постачання, що є особливо привабливим для фермерських господарств; б) газ для транспорту та сільгосптехніки.

Енергетичний потенціал біомаси в Україні тільки з відходів та побічної продукції АПК оцінюється у 1,6 млрд м³ метану (СН₄). Частка, доступна для отримання енергії, становить приблизно 50%, що дорівнює 0,97 млн т у. п. (Гелетуґа, Кучерук, & Матвеев, 2022). Дані щодо потенційно можливого виробництва біогазу наведені в табл. 3 (Гелетуґа, 2023).

Таблиця 3. Теоретичний об'єм виробництва біогазу в Україні з різних видів сировини (2022 рік)

Джерело біомаси	млрд м ³
Сільськогосподарські відходи	16,8
Відходи тваринництва	1,0
Відходи харчової промисловості	1,7
Тверді побутові відходи	0,7
Осади стічних вод	0,07
Енергетичні культури (силос)	3,0
Загальний потенціал	21,8

Таким чином, використовується приблизно 10% наявної сировини (Гелетуґа, 2023).

Біогазова галузь в Україні має значний потенціал для розвитку та здатна відігравати важливу роль у забезпеченні енергетичної безпеки країни. Розроблена та затверджена «Стратегія екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату на період до 2030 року», що включає положення щодо розвитку біоенергетики. Активно працюють Інститут відновлюваної енергетики НАН України; Інститут технічної теплофізики НАН України; «Біоенергетична асоціація України»; виробнича група

«Техінсервіс»; ТОВ «Біоенергопром інвест», багато інших науково-дослідних і виробничих компаній та установ.

Висновки

Виробництво біогазу як відновлювального джерела енергії сприяє скорочуванню викидів парникових газів і знешкодженню екологічно небезпечних відходів, що обумовлює його ключове значення в переході до низьковуглецевої економіки.

Зростання ринку сприяє інтенсифікації існуючих і пошуку нових технологій його отримання з максимально повним використанням продуктів, що утворюються.

Розвиток біоенергетики буде сприяти зменшенню залежності України від імпорту викопного палива, що є важливим фактором для забезпечення енергетичної безпеки та покращення екологізації країни.

Промислове виробництво біометану в Україні на сьогодні є економічно доцільним при умові експорту його на ринок ЄС.

Для сприяння зростанню ринку біометану необхідно зосередитися на технологічних інноваціях, що сприятимуть підвищенню ефективності виробництва та зниженню собівартості газу, створювати надійні ланцюги постачання сировини та підвищувати обізнаність стейкхолдерів щодо переваг біометану.

Література

Барвинська, О. Г., Воронін, В. О., Григоренко, С. М. (2021). *Порівняльний аналіз технологій утилізації птишиного посліду. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі*: матеріали III Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції. Мелітополь: ТДАТУ. <http://elar.tsatu.edu.ua/bitstream/123456789/16341/1/barvynska.pdf>.

Біогазові проекти в Україні 2020. (2020). <https://uabio.org/materials/7453/>.

Біогаз з гною та рідкої гноївки ВРХ, свиней, коней. (2020). <https://agrobiogas.com.ua/biogas-from-manure-and-liquid-slurry-of-cattle-pigs-horses/>.

Біоенергетика. (2024). <https://sae.gov.ua/diialnist/vidnovliuvalna-enerhetyka/alternatyvna-enerhetyka/bioenerhetyka>.

Бондарь, С. Н., Чабанова, О. Б., Недобийчук, Т. В. (2008). Исследование процесса получения биогаза из отходов плодоконсервного производства. *Екологічна безпека*, 2, 68—72. [https://www.kdu.edu.ua/EKB_jurnal/2008_2\(2\)/68.pdf](https://www.kdu.edu.ua/EKB_jurnal/2008_2(2)/68.pdf).

Матвеев, Ю. Б. (2024). Виробництво та використання біометану в Європейських країнах: звіт ЕВА-SAF Україна (2024). <https://saf.org.ua/news/2196/>.

Виробнича Група «Техінсервіс» (2024). <https://techinservice.com.ua/areas-of-activity/biogas-stations/>.

Гармаш, С. Н. (2013). Анаэробная биоконверсия органических отходов в биогаз. *Питання хімії та хімічної технології*, 6, 32—40. <https://udhtu.edu.ua/public/userfiles/file/VHNT/2013/6/Garmash.pdf>.

Гелетуха, Г. Г. (2023). Перспективи виробництва біометану в Україні. European Union capacity additions in 2023—2024.

Гелетуха, Г. Г., Кучерук, П. П., Матвеев, Ю. Б. (2013). Перспективи виробництва та використання біогазу в Україні. *Аналітична записка БАУ*, 4, 10—15. <https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/04/position-paper-uabio-4-ua.pdf>.

Гелетуха, Г. Г., Кучерук, П. П., Матвеев, Ю. Б. (2022). Перспективи виробництва біометану в Україні. *Аналітична записка UABIO*, 29, 8—18. <https://uabio.org/wp-content/uploads/2022/09/UA-Position-paper-UABIO-29.pdf>.

Звіт Європейської біогазової асоціації. (2020). <https://www.europeanbiogas.eu/eba-statistical>

report-2019-european-overview/.

Калетнік, Г. М., Олійнічук, С. Т., Скорук, О. П., Климчук, О. В., Яцковський, В. І., Токарчук, Д. М., Здор, І. А. (2012). Альтернативна енергетика України: особливості функціонування і перспективи розвитку. Вінниця: Вінницький національний аграрний університет. <http://socrates.vsau.org/b04213/html/cards/getfile.php/12742.pdf>.

Комар, А. С., Болтянська, Н. І. (2019). Розробка конструкції прес-гранулятора для переробки пташиного посліду. *Збірник наукових праць. Випуск 11. «Актуальні питання розвитку аграрної науки в Україні»*. <http://elar.tsatu.edu.ua/handle/123456789/7550>.

Курис, Ю. В., Красный, И. Ф. (2010). *Биогазовые технологии. Энергетические и экологические аспекты*. Запорожье: ЗГИА.

Кучерук, П. П. (2016). *Підвищення ефективності виробництва біогазу шляхом сумісного метанового бродиння гноївих відходів та силосу кукурудзи*: дис. ... канд. техн. наук. Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ.

Куюмчян, С. (2016). Свиная энергия: як свиноферма заробляє на побічних продуктах. <https://agravery.com/uk/posts/show/svinaca-energia-ak-svinoferma-zaroblae-na-pobichnih-produktah>.

Максішко, Л. М. (2017). *Екобезпечні технології анаеробної переробки й утилізації відходів свинарства і птахівництва*: дис. ... канд. сільгосп. наук. Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С. З. Гжицького, Львів. <http://repository.lnau.edu.ua:8080/jspui/bitstream/123456789/52/1/Maksishko%20L.%20M..pdf>.

Матвеев, Ю. Б. (2024). Виробництво та використання біометану в Європейських країнах за даними останнього звіту Європейської біогазової Асоціації. <https://uabio.org/wp-content/uploads/2024/12/Matvuyeyev-20-grudnya-2024.pdf>.

Мельник, О. В. (2024). Біогаз: досвід США та українська перспектива. <https://milkua.info/uk/post/biogaz-dosvid-ssa-ta-ukrainska-perspektiva>.

Панцирева, Г. В. (2019). Технологічні аспекти виробництва біогазу з органічної сировини. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*, 199, 276—290. <https://repo.btu.kharkov.ua/handle/123456789/20727>.

Ратушняк, Г. С. (2010). *Енергозберігаючі відновлювальні джерела теплопостачання*: навч. посіб. Вінниця: ВНТУ.

Ратушняк, Г. С., Анохіна, К. В. (2013). *Енергоефективні технологічні процеси та обладнання біоконверсії*: монографія. Вінниця: ВНТУ.

Розвиток європейського ринку виробництва біогазу і біометану — Статистика ЄБА 2022. (2022). <https://uabio.org/materials/14133/>.

Світова статистика птахівництва 2023: виробництво м'яса та яєць. (2023). <https://www.vetfactor.com/ua/news/svitova-statistika-ptakhivnitctva-2023-virobnitctvo-myasa-ta-ya-tc/>.

Семененко, И. В., Выдренко, Е. А., Кравец, А. В. (2001). *Комплексная, экологически чистая и энергосберегающая переработка отходов животноводства с получением органических удобрений и биогаза*. Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні. Львів: ЛьВЦНТЕІ.

Семчук, Г. М. (2000). Становище питного водопостачання в Україні. Рекомендації для розробки Закону України «Про питну воду». Київ. Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства.

Сербін, В. А. (2003). *Нетрадиційні та поновлювані джерела енергії в системах ТТТ*. Макіївка: ДонДАБА.

Ткаченко, С. Й., Степанов, Д. В. (2004). *Теплообмінні та гідродинамічні процеси в елементах енергозабезпечення біогазової установки*. Вінниця: нац. техн. ун-т. Вінниця: Універсум-Вінниця.

Четверик, Г. О., Лісничий, В. М. (2013). *Екологічні аспекти виробництва біогазу в Україні*: матеріали Міжнародної конференції «Зелена енергетика». Київ: Національний авіаційний університет.

Agricultural Wastewater Market. (WWT) (2025). <https://www.verifiedmarketreports.com/ruptproduct/agricultural-wastewater-treatment-wwt-market/>.

Andlar, M., Belskaya, N., Morzak, G., Šantek, M., Rezić, T., Tominac, V., Šantek, B. (2021). Bio-gas Production Systems and Upgrading Technologies: A Review. *Food Technol Biotechnol.*, 59(4),

387—412. <https://doi.org/10.17113/ftb.59.04.21.7300>.

Aworanti, O., Ajani, A., Agbede, O., Agarry, S., Ogunkunle, O., Timothy, O., Laseinde, M., Kalam, A., Fattah, I. (2023). Enhancing and upgrading biogas and biomethane production in anaerobic digestion. *Energy Res. Sec. Advanced Clean Fuel Technologies*, 11. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1170133>.

Billen, D. (2024). How Southeast Asia can unlock its biogas potential. <https://asian-power.com/exclusive/how-southeast-asia-can-unlock-its-biogas-potential>.

Biogas & biomethane in a nutshell. (2024). <https://www.europeanbiogas.eu/>.

Bioeconomy and renewable resources. (2024). https://www.bmel.de/EN/home/homepage_node.html.

Biogas Programme. (2025). Ministry of new and renewable energy. Government of India. <https://mnre.gov.in/en/bio-gas/>.

Clean Energy and Domestic Fertilizer Projects. (2024). U.S. Department of Agriculture. <https://www.usda.gov/>.

Cattle Population by Country. (2025). <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/cattle-population-by-country>.

Danatarova, M., Orazberdiyeva, M. (2022). *Scientific and technical basis for biogas production and utilization in Turkmenistan*. Web of Conferences 524, State Energy Institute of Turkmenistan, Mary. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452401018>.

European Biogas Association. (2016). Biomethane in transport. <https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2019/07/Biomethane-in-transport.pdf>.

Energynews. (2024). Bio-LNG: A Pillar of Europe's Energy Transition to Net-Zero. <https://energynews.pro/en/bio-lng-a-pillar-of-europes-energy-transition-to-net-zero/>.

Ivanov, V., Stabnikov, V., Stabnikova, O., Salyuk, A., Shapovalov, E., Ahmed, Z., Tay, J. (2019). Iron-containing clay and hematite iron ore in slurry-phase anaerobic digestion of chicken manure. *AIMS Materials Science*, 6(5), 821—832. <https://doi.org/10.3934/matserci.2019.5.821>.

FAO stat. (2024). <https://www.google.com/search?q=https://www.fao.org/faostat/en/%23data>.

Gerwin, W., Repmann, F., Galatsidas, S., Vlachaki, D., Gounaris, N., Baumgarten, W., Volkmann, C., Keramitzis, D., Kiourtsis, F., Freese, D. (2018). Assessment and quantification of marginal lands for biomass production in Europe using soil-quality indicators. *SOIL*, 4(4), 267—290. <https://doi.org/10.5194/soil-4-267-2018>.

Global agricultural export. (2022). https://worldbank.org.ua/3864-globalniy-agroeksport.html#google_vignette.

FAO Statistical Yearbook 2023 — World Food and Agriculture. (2024). <https://openknowledge.fao.org/items/5c272dc7-e1b8-486a-b323-6babb174eee0>.

FAO: Global meat production to grow in 2024, led by poultry. (2024). <https://avinews.com/en/fao-global-meat-production-to-grow-in-2024-led-by-poultry/>.

Imminent risk of a global water crisis. (2023). <https://www.unesco.org/en/articles/imminent-risk-global-water-crisis-warns-un-world-water-development-report-2023>.

ieabioenergy. State of the biogas industry in 12 member countries of IEA. (2024). <https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/state-of-the-biogas-industry-in-12-member-countries-of-iea-bioenergy-task-37/>.

Jameel, M., Mustafa, M., Ahmed, H., Mohammed, A., Ghazy, H., Shakir, M. (2024). Biogas: Production, properties, applications, economic and challenges. *Results in Chemistry*, 7, 101549. <http://www.ukrsugar.com/uk/post/biogaz-virobnictvo-vlastivosti-zastosuvanna-ekonomika-ta-vikliki-castina-1>.

Kulichkova, G., Ivanova, T., Köttner, M., Volodko, O., Spivak, S., Tsygankov, S., Blume, Y. (2020). Plant Feedstocks and their Biogas Production Potentials. *The Open Agriculture Journal*, 14, 219. <https://doi.org/10.2174/1874331502014010219>.

Kramar, V. (2023). Biogas upgrading technologies and their characteristics. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 45(1), 64—74. <https://doi.org/https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2023.8>.

Mesquita, B., Wu, D., Tringe, S. (2023) Methyl-Based Methanogenesis: an Ecological and Genomic Review. <https://doi.org/10.1128/mmbr.00024-22>.

Mondal, C., Das, A. (2016). Biogas Production from Co-digestion of Substrates: A Review. https://www.researchgate.net/publication/292375961_Biogas_Production_from_Co-digestion_of_

Substrates A Review.

Müller, F., Jaidl, M., Theiner, D., Zeitlhofer, J., Benedikt, F., Steiner, L., Bartik, A., Ertl, M., Andrews, A., Strasser, G., Müller, S., Winter, F., Unterrainer, K. (2025). Water vapor quantification in raw product gas by THz quantum cascade laser. *Energy Conversion and Management*, X, 26: 100906 <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100906>.

Ngabala, F., Emmanuel, J. (2024). Potential substrates for biogas production through anaerobic digestion-an alternative energy source PMID: PMC11636105 PMID: 39669150pmc.ncbi.nlm.nih.gov.

Net Zero Emissions by 2050. (2025). Uabio.org. <https://uabio.org/materials/17459/>.

Pal, A., Tripathi, V., Kumar, P. (2021). Microbial Production of Biomethane from Digested Waste and Its Significance. *Bioprospecting of Microorganism-Based Industrial Molecules*, Chapter 12. <https://doi.org/10.1002/9781119717317.ch12>.

Paes, J., Guimarães, C., Gomes, A., Valadao, R., Cecchin, D., Menino, R. (2025). Circularity Between Aquaponics and Anaerobic Digestion for Energy Generation. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7050129>.

Piercy, E., Sun, X., Ellis, P., Taylor, M., Guo, M. (2025). Temporal Dynamics of Microbial Communities in Anaerobic Digestion: Influence of Temperature and Feedstock Composition on Reactor Performance and Stability. <https://doi.org/10.1101/2025.01.12.632589>].

Population facing urban water scarcity could double by 2050. (2023). U. N. https://www.upi.com/Top_News/World-News/2023/03/22/United-Nations-drinking-water-scarcity/1111679481369/.

Powergreen. (2024). <https://powergreen.pro/novosti/237-bolee-45-energii-v-indii-vyrabatyvaetsya-iz-vozobnovlyaemykh-istochnikov>.

Ji-Qin, N. (2024). A review of household and industrial anaerobic digestion in Asia: Biogas development and safety incidents. https://www.researchgate.net/publication/379759081_A_review_of_household_and_industrial_anaerobic_digestion_in_Asia_Biogas_development_and_safety_incidents.

Qian, H. (2015). The biomethane producing potential in China: A theoretical and practical estimation. https://www.researchgate.net/publication/288931734_The_biomethane_producing_potential_in_China_A_theoretical_and_practical_estimation.

Qian, L. (2024). Biogas Institute of Ministry of Agriculture <https://doi.org/10.1080/23311886.2024.2419536>.

Quin, S., Chen, L., Xu, S., Zeng, C., Lian, X., Xia, Z., Zou, J. (2025). Research on Methane-Rich Biogas Production Technology by Anaerobic Digestion Under Carbon Neutrality: A Review. <https://doi.org/10.3390/su17041425>.

Rasimphi, T., Kilonzo, B., Nyamukondiwa, P., Tinarwo, D. (2024). Biogas technology implementation in rural areas: a case study of capricorn district in limpopo province, south africa. SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4841315> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4841315>.

Research at UKAEA. (2025). <https://www.gov.uk/government/organisations/department-for-environment-food-rural-affairs>.

Sahara, D. (2023). *Livestock waste as alternative energy for rural households*: A review IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1292, 2nd International Conference on Animal Research for Eco-Friendly Livestock Industry 15/08/2023-16/08/2023 Surakarta, Indonesia Citation D Sahara 2024 IOP Conf. Ser.: *Earth Environ. Sci.*, 1292, 012002 doi:10.1088/1755-1315/1292/1/012002.

Saboohi, Z., Hosseini, S. (2025). Advancements in biogas production: process optimization and innovative plant operations. *Clean Energy*, 9(2), 52—65. <https://doi.org/10.1093/ce/zkae096>.

Siroka, A., Detman, A., Mielecki, D., Chojnacka, A., Btaczzyk, M. (2018). Searching for Metabolic Pathways of Anaerobic Digestion: A Useful List of the Key Enzymes. <https://doi.org/10.5772/intechopen.81256>.

Sainz, A. (2024). Biogases production in Europe in 2023. <https://www.euractiv.com/section/eet/opinion/22-bcm-of-biogases-were-produced-in-europe-in-2023-according-to-a-new-report-released-today/>.

Stabnikova, O., Shevchenko, O., Stabnikov, V., Paredes-López, O. (2023). *Bioconversion of waste to value-added products*, CRC Press, Boca Raton. <https://doi.org/10.1201/9781003329671>.

U. S. Department of Agriculture. (2023). Взято з <https://www.usda.gov>.

World Food and Agriculture — Statistical Pocketbook. (2023). <https://www.donorplatform.org/wp-content/uploads/2024/01/cc8165en.pdf>.

World Poultry Statistics 2023: Meat and Egg Production. (2024). <https://www.vetfactor.com/ua/news/svitova-statistika-ptakhivnitctva-2023-virobnitctvo-myasa-ta-ya-tc/>.

World pig farming: Update on USDA estimates for 2023 and 2024 — Swine news. (2024). https://www.pig333.com/latest_swine_news/world-pig-farming-update-on-usda-estimates-for-2023-and-2024_19995/.

World Resources Institute. (2023). <https://www.wri.org/insights/highest-water-stressed-countries>.

Zhadan, S., Shapovalov, Y., Salyuk, A., Usenko, S. (2023). Bioconversion of poultry waste into clean energy. *Bioconversion of waste to value-added products*, 221—243. CRC Press, Boca Raton, <https://doi.org/10.1201/9781003329671-8>.

BIOTECHNOLOGICAL ASPECTS AND PRACTICAL SIGNIFICANCE OF POLYHYDROXYBUTYRATE PRODUCTION BY CYANOBACTERIA

V. Kravchenko, I. Kovshar, Yu. Reznichenko

National University of Food Technologies

Key words:

Polyhydroxybutyrate
Biosynthesis
Biotechnology
Cyanobacteria
Plastics
Biopolymers

Article history:

Received 21.07.2025
Received in revised form
04.08.2025
Accepted 19.08.2025

Corresponding author:

Yu. Reznichenko

E-mail:

reznichenkos@ukr.net

Citation: Кравченко В. В., Ковшар І. Д., Резніченко Ю. М. (2025). Біотехнологічні аспекти та практичне значення одержання полігідроксибутирату ціанобактеріями. *Наукові праці НУХТ*, 31(4), 89–106. DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-4-8

ABSTRACT

This research is dedicated to the study of phototrophic microorganisms, particularly cyanobacteria, as promising biological agents for biotechnological applications. Methods for cultivating these microorganisms, comparing the advantages and disadvantages of open and closed photobioreactors are shown in the paper. It was found that for the synthesis of high-value products, such as polyhydroxybutyrate (PHB), the use of closed systems was the most appropriate, as they provided sterility, precise parameter control, and a high concentration of biomass.

A detailed analysis revealed that cyanobacteria accumulated PHB as a storage compound under conditions of carbon surplus and nutrient deficiency (specifically nitrogen and phosphorus). Studies of modern approaches aimed at increasing PHB yield demonstrated significant progress. The application of metabolic and genetic engineering methods, including the expression of heterologous genes and the overexpression of native ones, has enabled the development of strains with exceptionally high levels of polymer accumulation — in some cases reaching up to 81% of the dry biomass.

Particular attention in this work was devoted to the potential applications of PHB, which stem from its biodegradability and biocompatibility. In the food industry, PHB is used for the production of packaging materials with improved properties, such as thermal stability and barrier permeability. In the medical field, this material showed great potential in tissue engineering, where its scaffolds were used for the regeneration of bone, cartilage, and neural tissues, as well as in drug delivery systems.

Based on the obtained data, it can be concluded that PHB synthesized by cyanobacteria is a high-tech material which, owing to advancements in biotechnology, can become a key element in the development of sustainable biopolymer production, the resolution of environmental issues, and the creation of innovative solutions in medicine.

БІОТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ТА ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ ОДЕРЖАННЯ ПОЛІГІДРОКСИБУТИРАТУ ЦІАНОБАКТЕРІЯМИ

В. В. Кравченко, І. Д. Ковшар, Ю. М. Резніченко

Національний університет харчових технологій

Дослідження присвячене вивченню фототрофних мікроорганізмів, зокрема ціанобактерій як перспективних біологічних агентів для одержання біополімерів. Розглянуто методи культивування цих мікроорганізмів, визначено переваги та недоліки відкритих і закритих фотобіореакторів. Встановлено, що для синтезу високоцінних продуктів, таких як полігідроксибутират (ПГБ), найбільш доцільним є використання закритих систем, що забезпечують стерильність, контроль параметрів і високу концентрацію біомаси.

Детальний аналіз показав, що ціанобактерії накопичують ПГБ як запасну речовину в умовах надлишку вуглецю та дефіциту поживних речовин (азоту та фосфору). Дослідження сучасних підходів до підвищення виходу ПГБ свідчать про значний прогрес. Застосування методів метаболічної та генетичної інженерії, включаючи експресію чужорідних генів і надекспресію нативних, дало змогу отримати штами з надзвичайно високим рівнем накопичення полімеру, що в деяких випадках сягав до 81% від сухої біомаси.

Особлива увага приділена шляхам використання ПГБ, що обумовлені його здатністю до біодеградації та біосумісністю з іншими матеріалами. У харчовій промисловості ПГБ застосовується для створення пакувальних матеріалів з покращеними властивостями (термостабільність, бар'єрна проникність). У медичній промисловості матеріал демонструє великий потенціал у тканинній інженерії, де його каркаси використовуються для регенерації кісткової, хрящової та нервової тканин, а також у системах доставки ліків.

На основі отриманих даних можна зробити висновок, що ПГБ, синтезований ціанобактеріями, є високотехнологічним матеріалом, який завдяки біотехнологічним досягненням може стати ключовим елементом для створення сталого виробництва біополімерів, вирішення екологічних проблем і розвитку інноваційних рішень у медицині.

Ключові слова: полігідроксибутират, біосинтез, біотехнологія, ціанобактерії, пластмаси, біополімери.

Постановка проблеми. Постійне зростання чисельності населення та забруднення навколишнього середовища внаслідок численних антропогенних дій призвели до різноманітних зусиль для досягнення цілей сталого розвитку. Нині через зростаюче занепокоєння з приводу енергетичної кризи, продовольчої безпеки та екологічних проблем привертають увагу фотосинтезуючі мікроорганізми, особливо ціанобактерії, які здатні акумулювати сонячну енергію в біомасу та корисні вуглецеві сполуки, зокрема полігідроксибутират, що можуть вирішити перераховані проблеми, (Zahra, Choo, Lee, & Parveen, 2020).

Полігідроксibuтират (ПГБ) характеризується високою здатністю до біологічного розкладання, через що він вважається однією з кращих альтернатив пластмасам нафтохімічного виробництва. ПГБ має добрі термічні, механічні та біологічні властивості та широкий спектр застосувань у пакувальній промисловості, сільському господарстві, медичних приладах та обладнанні (Rueda et al., 2020), однак недоліком на сьогодні є собівартість отриманого біополімера.

З огляду на вищенаведену інформацію актуальними є дослідження, спрямовані на пошук нових ціанобактерій для синтезу полігідроксibuтирату або покращення вже існуючих технологічних процесів синтезу та виділення полігідроксibuтирату задля збільшення показників синтезу та зменшення втрат, відповідно, з метою зменшення собівартості отриманого кінцевого продукту.

Мета дослідження: узагальнення літературних даних щодо можливостей отримання полігідроксibuтирату ціанобактеріями, а також умов і механізмів їх біосинтезу.

Матеріали і методи. Матеріалами дослідження стали наукові публікації зарубіжних учених у провідних періодичних і спеціалізованих світових виданнях, що стосуються використання ціанобактерій для біосинтезу полігідроксibuтирату. При написанні огляду використані наукові публікації закордонних вчених в основному за останні десять років. Для пошуку наукових публікацій використовували наукометричні бази даних: Pub-Med, Google Scholar.

Викладення основних результатів дослідження. *Дослідження фототрофних мікроорганізмів у біотехнологічних процесах.* На сьогодні все більше зростає інтерес до дослідження фототрофних мікроорганізмів через їхню здатність перетворювати вуглекислий газ і синтезувати біологічно активні сполуки (Brasil, de Siqueira, Salum, Zanette, & Spier, 2017). Вирощування даних біологічних агентів відбувається в фотобіореакторах, але загалом існує два типи систем для вирощування ціанобактерій і мікродоростей — відкриті та закриті. Відкриті системи, у свою чергу, умовно поділяються на природні (озера, лагуни, ставки) та штучні (ставки або контейнери). Найбільш часто використовувані системи включають неглибокі великі ставки, резервуари, круглі ставки та скакові ставки (Suh, & Lee, 2003). Відкриті ставки набагато легше побудувати та експлуатувати, ніж більшість закритих систем. Однак основні обмеження у відкритих водоймах виникають через недостатнє використання світла клітинами, втрату води через випаровування, дифузію CO₂ в атмосферу та потребу у великих площах землі. Всі зазначені обмеження призводять до нижчої продуктивності біомаси для відкритих систем порівняно із закритими системами, проте, зважаючи на просту експлуатації та легке масштабування, ці системи все ще застосовуються в певних випадках, особливо коли необхідно отримати продукт з низькими вимогами до чистоти (Yen, Hu, Chen, Nagarajan, & Chang, 2019; Guedes, Katkam, Varela, & Malcata, 2014).

Закриті системи використовуються при виробництві високоцінних продуктів для застосування у фармацевтичній та косметичній промисловостях. До закритих систем відносять фотобіореактори, які не мають прямого обміну газами та забруднювачами із зовнішнього середовища.

Необхідний газообмін здійснюється через стерилізований газовий фільтр, щоб уникнути забруднення всередині системи культури. Таким чином, закриті систе-

ми характеризуються мінімізацією забруднення порівняно з відкритими системами, але недоліком закритих систем є висока вартість обладнання. Фотобіореактори закритої системи мають кілька важливих переваг перед відкритими системами:

1. Мінімізація забруднення та можливість вирощувати монокультури.
2. Кращий контроль параметрів процесу, а саме: рівень рН, температура, світло, концентрація CO₂ тощо.
3. Менші втрати CO₂ та уникнення випаровування води.
4. Накопичення більшої концентрації клітин.
5. Можливість синтезу складних біофармацевтичних препаратів.

Нині існує кілька типів закритих систем, які застосовуються для вирощування ціанобактерій і мікроводоростей: вертикальні (трубчасті) колони, фотобіореактори з плоскими пластинами та горизонтальні трубчасті фотобіореактори (Yen, Hu, Chen, Nagarajan, & Chang, 2019; Guedes, Katkam, Varela, & Malcata, 2014). Зображення фотобіореакторів для вирощування ціанобактерій і мікроводоростей наведено на рис. 1.

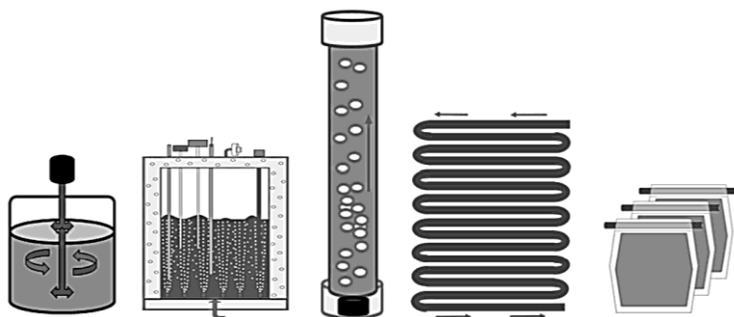


Рис. 1. Схематичне зображення типів фотобіореакторів, які використовуються для вирощування ціанобактерій і мікроводоростей, зліва направо: резервуар з мішалкою, плоска панель, барботажна колона трубчастого типу, пакети

Розглянувши основні переваги та недоліки фотобіореакторів, можна дійти висновку, що на сьогодні існує велика кількість різних типів і форм апаратів, які дозволяють їх використовувати під задані потреби. Для культивування ціанобактерій з метою синтезу вуглецевих метаболітів (глікоген і полігідроксибутират) доцільно використовувати закриті системи, які дають змогу проводити детальне визначення оптимальних параметрів процесу (Guedes, Katkam, Varela, & Malcata, 2014).

Ціанобактерії — це фотосинтезуючі мікроорганізми, які з'явилися на Землі дуже давно, що дозволило їм адаптуватись до жорстких умов навколишнього середовища та виробляти низку запасних сполук, включаючи глікоген і полігідроксибутират, які дають змогу їм виживати при зміні умов середовища (Stal, 1992). Під час надлишку світла та вуглекислого газу глікоген синтезується з надлишком метаболічної енергії, особливо коли ріст обмежений іншими сполуками, такими як азот або фосфор (Kaewbai-Ngam, Incharoensakdi, & Monshupanee, 2016; Singh, Sharma, Mallick, & Mala, 2017), в подальшому синтезований глікоген окиснюється протягом темного періоду як джерело енергії через окислювальний пентозофосфатний шлях (Smith, 1983). Подібно до глікогену, для синтезу полігідроксибутирату

ціанобактерії також використовують надлишок внутрішньоклітинного вуглецю (у формі ацетил-КоА) та відновних еквівалентів (НАДН) для свого синтезу.

Полігідроксibuтират (ПГБ). При вирощуванні ціанобактерій одним із продуктів метаболізму є полігідроксibuтират, який в останні десятиліття набув великого інтересу через свої властивості (Rajan, Thomas, Gopanna, & Chavali, 2019). Полігідроксibuтират — це полімер, отриманий у результаті накопичення вуглецю в клітинах певних видів бактерій. Цей полімер має ряд переваг: порівняно з поліетиленом і поліпропіленом полігідроксibuтират має вищу бар'єрну проникність; порівняно з усіма іншими синтетичними полімерами полігідроксibuтират проявляє здатність до біологічного розкладання в результаті контакту з мікроорганізмами, які знаходяться в навколишньому середовищі (грунт, прісна вода, аеробне та анаеробне компостування) (McAdam, Brennan Fournet, McDonald, & Mojicevic, 2020).

Сьогодні вчені досліджують шляхи підвищення концентрації синтезованого полігідроксibuтирату. Узагальнену характеристику продуцентів полігідроксibuтирату наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Узагальнена характеристика продуцентів полігідроксibuтирату

Продуцент	Світловий режим (світло-темрява)/рівень освітленості	Час вирощування, діб	Концентрація полігідроксibuтирату, від сухої біомаси, %	Посилання
<i>Synechococcus elongatus</i> UTEX 2973- <i>phaCAB</i>	—/200 мкмоль м ⁻² с ⁻¹	9	16 (420 мг/л)	Carpine, 2019
<i>Scytonema geitleri</i> Bharadwaja	14:10/95 мкмоль м ⁻² с ⁻¹	28	7,12	da Silva, Costa, & de Moraes, 2018
<i>Nostoc muscorum</i> NCCU-442	10:14/25 мкмоль м ⁻² с ⁻¹	7	26,37	Zhang, Liu, & Bryant, 2015
<i>Synechocystis</i> sp.	15:9/102 мкмоль м ⁻² с ⁻¹	4 + 20	9	Koch, 2020
<i>Synechocystis</i> sp. PCC 6803GT_ABEC	—/100 мкмоль м ⁻² с ⁻¹	30	7	Rajan, Thomas, Gopanna, & Chavali, 2019
<i>Synechocystis</i> PPT1	12:12/50 мкмоль м ⁻² с ⁻¹	21	81	Singh, Rai, Rai, Singh, & Singh, 2019
<i>Synechocystis</i> sp. PCC 6714	—/40 мкмоль м ⁻² с ⁻¹	14	16,4	Khetkorn, Incharoen-sakdi, Lindblad, & Jantaro, 2016
<i>Synechocystis</i> sp. CCALA192		75	12,5	Carpine et al., 2019
<i>Synechocystis</i> PCC6803	16:8/150 мкмоль м ⁻² с ⁻¹	26	8	Arisaka, Terahara, Oikawa, & Osanai, 2019

Продовження таблиці 1

<i>Synechococcus</i> sp. PCC 7002	—/250 мкмоль м ⁻² с ⁻¹	8	3,97	McAdam, Brennan Fournet, McDonald, & Mojicevic, 2020
<i>Synechococcus elongatus</i> UAM–C/S03	—/100 мкмоль м ⁻² с ⁻¹	9	29,42	Roh, 2021
<i>Synechocystis</i> sp. PCC6803 <i>phaA/phaB</i>	—/40 мкмоль м ⁻² с ⁻¹	9	35	Kavitha, 2016
<i>Synechocystis</i> WD119 (DKOX)	18:6/260 мкмоль м ⁻² с ⁻¹	40	12	Ansari, & Fatma, 2016
<i>Synechocystis</i> sp. PCC 6714/MT a24	—/50-60 мкмоль м ⁻² с ⁻¹	19	37	Kamravama-nesh, 2017
<i>Synechocystis</i> OX <i>rbcLXS</i>	24:0/50 мкмоль м ⁻² с ⁻¹	14	39	Rueda, & Garcia, 2021
<i>Synechocystis</i> sp. PCC 6803/ <i>ntcA</i>	24:0/60 мкмоль м ⁻² с ⁻¹	14	5,4	Kamravama-nesh, 2018
<i>Spirulina</i> sp. LEB 18	12:12/—	20	10,6	Troschl, 2018
<i>Arthrospira platensis</i> RRGK	—	9	131 мг/л	Hondo et al., 2015
<i>Synechocystis</i> sp. PC C 6803	—/50 мкмоль м ⁻² с ⁻¹	35	5,1 (72 мг/л)	Aikawa, 2014
<i>Nostoc muscorum</i>	12:12/275 мкмоль м ⁻² с ⁻¹	6	1,4	Comer, 2020

У 2015 р. вчені проводили генну модифікацію ціанобактерій *Synechocystis* sp. PCC 6803 для надсинтезу полігідроксибутирату (Hondo et al., 2015). Для конструювання генно-модифікованого штаму в *Synechocystis* sp. PCC 6803 експресували гени *pha*, які відповідали за синтез полігідроксибутирату. В результаті сконструйований штаму *Synechocystis* sp. PCC 6803GT_АВЕС вирощували впродовж 30 діб на середовищі BG 11 при освітленні 100 мкмоль м⁻²с⁻¹, 30 °С, швидкості перемішування 50 об/хв та внесенні 2% CO₂. Кількість накопиченого ПГБ становив 7% сухої біомаси.

Zhang з співавторами вивчали вплив метаболічної інженерії *Synechococcus* sp. PCC 7002 на синтез полігідроксибутирату (Zhang, Liu, & Bryant, 2015). Для конструювання модифікованого штаму в *Synechococcus* sp. PCC 7002 експресували гени, які відповідають за синтез полігідроксибутирату у *Chlorogloeopsis fritschii* PCC 9212. Вирощування модифікованого штаму відбувалось на середовищі А⁺ при 38 °С, та середній інтенсивності освітлення 250 мкмоль м⁻²с⁻¹ з внесенням 1% CO₂. Рівень накопичення полігідроксибутирату становив 3,97% від сухої біомаси.

Kavitha з співавторами вивчали синтез полігідроксибутирату при вирощуванні *Arthrospira platensis* RRGK в відкритих водоймах (Kavitha, 2016). Вирощування проводили в відкритому ставку об'ємом 2 м³, як середовище використовували середовище Zarouk з додатковим внесенням 60 мМ гідрокарбонату натрію при рН 9,5 та 40 °С. У результаті культивування цей штаму накопичував 131 мг/л полігідроксибутирату та 2,2 г/л біомаси.

Ansari з співавтором досліджували синтез полігідроксибутирату за допомогою ціанобактерій (Ansari, & Fatma, 2016). У ході дослідження було розглянуто декілька представників ціанобактерій, серед яких найкращим продуцентом полігідроксибутирату був *Nostoc muscorum* NCCU-442. У подальшому вчені провели оптимізації умов культивування. Було встановлено, що при вирощуванні *N. muscorum* NCCU-442 при рН 7,5 температурі 30 °С з дотриманням світлового режиму 10:14 (світло-темрява) та додатковим внесенням 0,4% глюкози та 1 г/л хлориду натрію, кількість синтезованого полігідроксибутирату становить 26,37% сухої біомаси на сьомий день вирощування. Процес вирощування проводили в колбах Ерленмеєра на середовищі BG 11, із середньою інтенсивністю світла 25 мкмоль м⁻² с⁻¹.

Khetkorn зі співавторами оцінювали вплив надекспресії генів відповідальних за синтез полігідроксибутирату в *Synechocystis* sp. PCC6803 (Khetkorn, Incharoen-sakdi, Lindblad, & Jantaro, 2016). Модифікований штам конструювали шляхом надекспресії нативних генів *Synechocystis* sp. PCC6803 *phaA* і *phaB*. Вирощування проводили на поживному середовищі BG11 без азоту, з додатковим внесення 0,4% ацетату, впродовж 9 діб при 30 °С, 160 об/хв, та середній інтенсивності освітлення 40 мкмоль м⁻²с⁻¹. Після закінчення вирощування накопичення полігідроксибутирату становило 35% від сухої біомаси.

Carpine зі співавторами досліджували генетичну модифікацію *Synechocystis* sp. PCC6803 для посиленого виробництва полігідроксибутирату (Carpine, 2017). Сконструйований штам *Synechocystis* WD119 (DKOX) передбачав надекспресію *xfpk* та делецію *pta* та *ach* в *Synechocystis* sp. PCC6803. Вирощування модифікованого штаму проводили в фотобіореакторі (похила колона) на середовищі BG11 з світловим режимом 18:6 (світло-темрява), середньою інтенсивністю освітлення 260 мкмоль м⁻²с⁻¹, аерацією повітрям з 2% CO₂, при 28 °С впродовж 40 діб. У результаті сконструйований штам накопичував полігідроксибутират у кількості 12% від сухої біомаси.

Kamravanesh зі співавторами оцінювали спроможність синтезу полігідроксибутирату ціанобактеріями *Synechocystis* sp. PCC 6714 (Kamravanesh, 2017). У результаті вирощування штаму *Synechocystis* sp. PCC 6714 на середовищі BG11 без азоту та фосфору при 28 °С, рН 8,5, 300 об/хв та внесенні повітря з 2% CO₂ із середньою інтенсивністю освітлення 40 мкмоль м⁻²с⁻¹ на 14 день накопичення полігідроксибутирату становило 16,4% від сухої біомаси.

У 2018 р. вчені досліджували пілотне виробництво полігідроксибутирату в трубчастому фотобіореакторі при культивуванні *Synechocystis* sp. CCALA192 (Troschl, 2018). Експерименти проводили в трубчастому фотобіореакторі об'ємом 200 л впродовж 75 діб, вирощування культури відбувалось на середовищі BG11 з внесенням бікарбонату натрію та карбонату натрію, процес синтезу ПГБ здійснювали поетапно, впродовж 75 діб було проведено чотири етапи, один етап вирощування характеризується поступовим накопиченням біомаси зі споживанням усього азоту та зміною забарвлення середовища та, починаючи із шостої доби, подальшим накопиченням полігідроксибутирату. В результаті чотирьох етапів синтезу ПГБ середнє значення накопичення полімеру становило 12,5% від сухої біомаси, а середній вміст глікогену складав 20,4% від сухої біомаси, під час вирощування відбувалось внесення вуглекислого газу, середнє споживання якого становило 2 г/л.

Камраваманеш зі співавторами оцінювали вплив випадкового мутагенезу *Synechocystis* sp. PCC 6714 на синтез полігидроксибутирату (Камраваманеш, 2018). Для отримання мутантного штаму клітини витримували під ультрафіолетовим випромінюванням. Процес синтезу полігидроксибутирату проводили у дві стадії: перша стадія відбувалась на поживному середовищі BG11 впродовж 135 год, а друга — на поживному середовищі BG11 без азоту та фосфору з 135 год до 450 год. Вирощування проводили при 28 °C та інтенсивності освітлення 50 мкмоль м⁻²с⁻¹, стадію синтезу (друга фаза) проводили при 300 об/хв, рН 8,5 з внесення повітря з вмістом 2% CO₂ та інтенсивністю освітлення 60 мкмоль м⁻²с⁻¹. У результаті мутантний штам MT_a24 накопичував полігидроксибутират у кількості 37% від сухої біомаси, а максимальна концентрація глікогену спостерігалась на 200 год та становила 50% від сухої біомаси.

Da Silva з співавторами оцінювали вплив відходів отриманих після екстракції біополімерів на синтез полігидроксибутирату при вирощуванні *Spirulina* sp. LEB 18 (da Silva, Costa, & de Morais, 2018). Під час дослідів *Spirulina* sp. LEB 18 вирощували в вертикальному трубчастому реакторі на середовищі Zarrouk з додатковим внесенням відходів після екстракції біополімерів, з світловим режимом 12:12 (світло-темрява), при 30 °C, впродовж 20 діб. В результаті експериментів найкращі показники синтезу полігидроксибутирату (10,6% від сухої біомаси) були продемонстровані при внесенні 25% відходів в поживне середовище.

Arisaka з співавторами досліджували вплив надекспресії гена *ntcA* у *Synechocystis* sp. PCC 6803 на синтез полігидроксибутирату (Arisaka, Terahara, Oikawa, & Osanai, 2019). У ході дослідів було визначено, що ген *ntcA* бере участь у перерозподілі внутрішньоклітинних джерел вуглецю для синтезу полігидроксибутирату. Модифікований штам вирощували в два етапи: спочатку на середовищі BG11 впродовж 7 діб, а в подальшому на середовищі BG11 без хлориду амонію, умови вирощування однакові для двох етапів, а саме: 30 °C, постійне освітлення, інтенсивність освітлення 60 мкмоль м⁻²с⁻¹, аерація повітрям з вмістом 1% CO₂. У результаті вирощування найвищий показник синтезованого полігидроксибутирату (5,4% від сухої біомаси) спостерігався на 7 день азотного голодування, що становило 14 день загального культивування (спочатку 7 діб вирощування на середовищі з усіма компонентами, а в подальшому 7 діб азотного голодування).

Singh з співавторами досліджували вплив параметрів культивування *Scytonema geitleri* Bharadwaja на синтез полігидроксибутирату (Singh, Rai, Rai, Singh, & Singh, 2019). Процес культивування проводили в колбах Ерленмеєра, з дотриманням режиму світло-темрява 14:10, та середньою інтенсивністю світла 95 мкмоль м⁻²с⁻¹ впродовж 28 діб. Під час визначення впливу параметрів на синтез полігидроксибутирату розглядали рівень рН, температуру та джерело вуглецю, в результаті найвищий синтез полігидроксибутирату (7,12% сухої біомаси) спостерігався при рН 8,5, температурі 30 °C та внесенні 30 мМ ацетату.

Carpine з співавторами проводили дослідження, спрямоване на визначення впливу азоту на синтез полігидроксибутирату при культивуванні ціанобактерій (Carpine et al., 2019). У ході дослідження було встановлено, що найкращим продуцентом полігидроксибутирату є *Synechocystis* PCC6803, який накопичував найбільшу кіль-

кість ПГБ порівняно з іншими розглянутими представниками. В результаті порівняння впливу азоту на синтез полігідроксibuтирату було визначено, що найвищий синтез (8% сухої біомаси) відбувається при вирощуванні культури на середовищі BG11 з зменшеною вдвічі концентрацією нітрату натрію. Експерименти проводили в барботажній колоні об'ємом 800 мл, з дотриманням світлового режиму 16:8 (світло-темрява), з освітленням 150 мкмоль м⁻²с⁻¹ при 25 °С та внесенні повітря з 2% CO₂.

У 2020 р. застосовували метаболічну інженерію *Synechocystis* sp. PCC 6803, для надсинтезу полігідроксibuтирату (Koch et al., 2020). Для конструювання штаму проводили делецію регуляторного білка PirC та експресували два гени *phaA* та *phaB*, відподальних за синтез ПГБ у *Cupriavidus necator*. Сконструйований штам *Synechocystis* PPT1 вирощували при 125 об/хв, 28 °С на середовищі з BG11 без нітрату натрію та калію гідроортофосфату з додатковим внесенням 10 мМ ацетату, рівень освітлення 50 мкмоль м⁻²с⁻¹, світловий режим 12:12 (світло-темрява). При вирощуванні на безазотно-фосфорному середовищі рівень накопичення ПГБ становило 63% сухої біомаси, а при додатковому внесенні ацетату кількість ПГБ збільшувалась до 81% сухої біомаси.

У 2021 р. вчені вивчали генну модифікацію ціанобактерій для промислового виробництва полі-β-гідроксibuтирату (Roh et al., 2021). В процесі дослідів для конструювання генно-модифікованого штаму в *Synechococcus elongatus* UTEX 2973 вводили гени *phaCAB* від *Cupriavidus necator* H16. Отриманий штам вирощували при 38 °С, на середовищі BG11, зі ступенем освітлення 200 мкмоль м⁻²с⁻¹, рН 8,0 та аерацією повітрям з 5% CO₂. У результаті культивування на 9 добу спостерігалась найвища концентрація синтезованого полігідроксibuтирату 420 мг/л, що відповідало 16,7% від сухої біомаси.

Rueda з співавтором у 2021 р. проводили оптимізацію процесу синтезу полігідроксibuтирату фототрофними ціанобактеріями шляхом моделювання кінетичної моделі (Rueda, & García, 2021). На основі інформації, що одним із важливих факторів синтезу великої кількості полігідроксibuтирату є обмеження кількості поживних речовин, вчені провели оптимізацію безперервного виробництва та прийшли до висновку, що для виробництва ПГБ необхідно використовувати реактори в серії, тобто в одному реакторі відбувається вирощування ціанобактерій і споживання поживних речовин, а в подальшому з цього реактора, після досягнення певних параметрів, середовище направляють у другий реактор, де відбувається накопичення глікогену та полігідроксibuтирату. Схематичне зображення безперервного процесу виробництва полігідроксibuтирату наведено на рис. 2.

Також у (Rueda, & García, 2021) проведено оптимізацію процесу безперервного синтезу полігідроксibuтирату та визначено, що оптимальний ріст клітин у реакторі складає чотири доби з необхідним початковим вмістом азоту 50 мг/л та фосфору 10 мг/л, а в реакторах накопичування полігідроксibuтирату час утримання становить 20 діб. У результаті досягається синтез полігідроксibuтирату в кількості 9% від сухої біомаси та з продуктивністю 5 мл/л×добу. Всі досліді проводили з *Synechocystis* sp. культивування при освітленні 102 мкмоль м⁻²с⁻¹ протягом 15 год на добу.

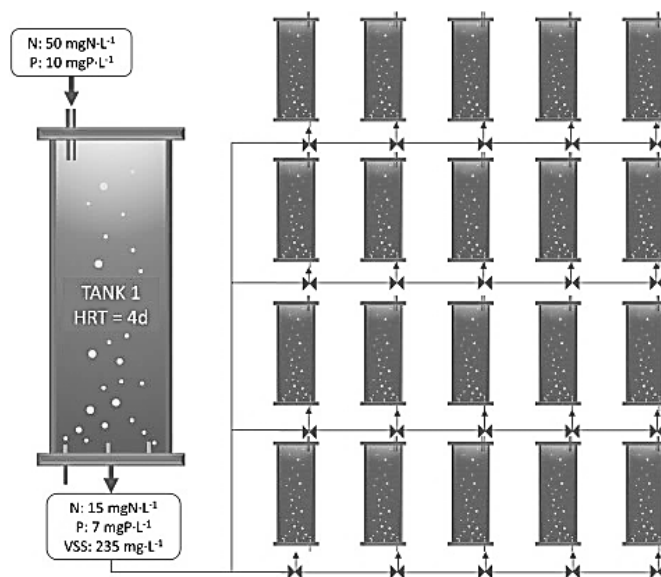


Рис. 2. Схематичне зображення безперервного процесу виробництва полігидроксибутирату

González-Resendiz зі співавторами досліджували синтез полігидроксибутирату при вирощуванні ціанобактерій, виділених з невеликого ставка в посушливому регіоні з середньою температурою 39 °С, Мексика (González-Resendiz et al., 2021). Ізольовану культуру ідентифікували як *Synechococcus elongatus* UAM-C/S03. Вирощування проводили на середовищі BG11 без азоту впродовж 9 діб при 35 °С та середній інтенсивності освітлення 100 мкмоль м⁻²с⁻¹, з внесенням 250 мг/л×д CO₂. У результаті накопичення полігидроксибутирату становило 29,42% від сухої біомаси.

У праці (Tharasirivat, & Jantaro, 2023) оцінювали вплив надмірної експресії генів *RuBisCO* в *Synechocystis* sp. PCC 6803 на синтез біомаси та виробництво полігидроксибутирату *Synechocystis* OX *rbcLXS* з надекспресією гена *RuBisCO*. Вирощування проводили в два етапи: спочатку впродовж 7 діб на поживному середовищі BG11 з додатковим внесенням 20 мМ бікарбонату натрію, а після 7 діб на середовищі BG11 з вилученим азотом і фосфором. Культивування відбувалося при 30 °С з постійним освітленням інтенсивністю освітлення 50 мкмоль м⁻²с⁻¹. На 7 день вирощування на середовищі без азоту та фосфору модифікований штам накопичував 39% від сухої біомаси полігидроксибутирату та 31,9% від сухої біомаси глікогену.

Застосування полігидроксибутирату. Полігидроксибутират привернув до себе значну увагу як екологічно чистий біополімер, пропонуючи стійку альтернативу традиційним пластмасам, отриманим з нафтохімії. Здатність до біорозкладання і біосумісність полімеру роблять його привабливим матеріалом у різних галузях промисловості, особливо там, де вплив на навколишнє середовище викликає занепокоєння. Полігидроксибутират, отриманий у результаті життєдіяльності мікроорганізмів, проявляє властивості, притаманні синтетичним полімерам, що робить

його перспективним альтернативним кандидатом звичним пластикам для подальшого зменшення пластикових відходів. Через схожі із синтетичними полімерами властивостями та здатність до біорозкладання, полігідроксibuтират може використовуватись в харчовій і медичній промисловостях.

У харчовій промисловості полігідроксibuтират можна використовувати як пакування. Але чистий полігідроксibuтират є відносно крихким і може демонструвати низьку гнучкість, що може призвести до тріщин при використанні як харчового пакування. З огляду на таку інформацію *Manikandan* зі співавторами оцінювали можливість покращення властивостей нанокompозиту полігідроксibuтирату для пакування харчових продуктів (*Manikandan, Pakshirajan, & Pugazhenthii, 2020*). У результаті досліджень вчені визначили, що додаткове внесення 0,7% графенових нанопластин до полігідроксibuтирату значно покращує показники термостабільності, міцності на розрив і зменшення проникнення ультрафіолетового та видимого світла. Також було проведено модальне дослідження з визначення терміну придатності при використанні цього матеріалу під час пакування картопляних чипсів і молочних продуктів. Отриманий матеріал продемонстрував чотирикратне збільшення терміну зберігання, що свідчить про можливість використання цього композиту як пакувального матеріалу для харчових продуктів.

На додаток до звичної заміни пластику на біодеградабельний природний полімер полігідроксibuтират також може використовуватись в антимікробних плівкових покриттях, які допомагають зберігати продукт більш тривалий період, що з огляду на щорічну кількість викинутих продуктів через їх псування є важливим.

У дослідженні (*Xavier, Babusha, George, & Ramana, 2015*) розглядали можливість виробництва антимікробних плівок на основі полігідроксibuтирату з додаванням ваніліну. Під час досліджень визначали антимікробні властивості отриманих плівок з різними концентраціями ваніліну проти харчових патогенів, а саме *Escherichia coli*, *Salmonella typhimurium*, *Shigella flexneri* та *Staphylococcus aureus*, а також грибів, таких як *Aspergillus flavus*, *Aspergillus fumigatus*, *Aspergillus niger*, *Aspergillus parasiticus*, *Aspergillus ochraceus*, *Penicillium viridicatum* та *Penicillium clavigerum*. Встановлено, що отримані плівкові покриття демонстрували зниження максимального термічного розкладання і міцності плівок на розрив, однак у результаті швидкого вивільнення ваніліну в харчові продукти вони демонстрували гарні показники мінімальної інгібувальної дії: для бактерій від 80 мкг/г ПГБ, а для грибів — від 50 мкг/г ПГБ.

Correa з співавторами (*Correa et al., 2017*) досліджували вплив активації низьким біорозкладної плівки полігідроксibuтирату/полікапролактону на покращення термінів зберігання шинки. Дослідження показало, що отримана плівка давала змогу збільшити термін зберігання шинки шляхом значного інгібування *Lactobacillus plantarum* CRL691, який використовувався як модельна бактерія псування обробленого м'яса.

У 2018 р. вчені проводили дослідження щодо використання біорозкладної упаковки для зберігання лосося (*Ma, Li, & Wang, 2018*). Дослідники встановили, що використання плівкового покриття з полімолочної кислоти/полігідроксibuтирату з внесенням гліцерин монолаурату як пластифікатора демонструє значно менші показники утворених бактерій (4,65 КУО/г на 17 день), в той час як подібна плівка,

тільки з внесенням монокаприліну гліцерату як пластифікатора, та плівка на основі етиленвінілового спирту демонстрували значно гірші показники — 6,65 і 6,35 КУО/г на 15-й день зберігання, відповідно.

У праці (Rech et al., 2021) досліджували вплив внесення ефірних олій у плівки з полігідроксибутирату на антимікробні властивості. Внесення ефірних олій в плівки з полігідроксибутирату покращило термічну стабільність і знизило температуру плавлення полімеру в результаті його пластифікації порівняно з чистим полігідроксибутиратом. Також комбінація ефірних олій у плівках з полігідроксибутирату, зокрема кориці і чайного дерева (мелалеуки) та кориці і цитронели демонстрували антимікробний ефект щодо *Salmonella* sp. ATCC 13076, *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 27853, *Staphylococcus aureus* ATCC 19093, *Escherichia coli* ATCC 25922, *Aspergillus niger* ATCC 6275 та *Staphylococcus epidermidis* ATCC 12228.

Також через біодоступність полігідроксибутирату перспективним напрямком використання є біомедицина. Одним із перспективних варіантів використання полігідроксибутирату є використання його в кістковій інженерії. Так, Karahaliloglu зі співавторами оцінювали вплив створених наноструктур з полігідроксибутирату на клітинні функції остеобластів (Karahaliloglu et al., 2015). Для створення мембран з полігідроксибутирату вчені проводили лужну обробку полімеру гідроксидом натрію, яка дала змогу збільшити гідрофільність поверхні полігідроксибутирату. Отримана мембрана демонструвала покращену проліферацію людських остеобластів, а також інгібувала ріст *Staphylococcus aureus* більш ніж на 60% після 48 год культивування.

Degli Esposti зі співавторами розробляли біосумісні та біорозсмоктувані наноструктурні пористі каркаси на основі полігідроксибутирату для інженерії кісткової тканини (Degli Esposti, Chiellini, Bondioli, Morselli, & Fabbri, 2019). Отриманий матеріал демонстрував повну цитосумісність і здатність підтримувати адгезію і проліферацію мишачих преостеобластних клітин MC3T3-E1, а також на створеному каркасі переважали клітини остеоцитоподібної морфології.

Meischel зі співавторами оцінювали вплив імплантів полімерних композитів з полігідроксибутирату на кістки щурів (Meischel et al., 2016). Дослідження проводили на стегновій кістці зростаючих щурів, в результаті було встановлено що композит PNB з ZrO_2 із 30% вмістом Herafill, а також Mg-сплав WZ21 показали найвищі показники накопичення кісткової тканини навколо імпланту. Всі досліджувані варіанти полігідроксибутиратових композитів не демонстрували розкладання після 36 тижнів. Показники пружності, міцності на розрив і деформаційні властивості отриманих композитів близькі до кістки, однак сила адгезії між кісткою та імплантами є низькою.

Вплив крохмалю на полігідроксидні каркаси для інженерії кісткової тканини досліджували у (Asl, Karbasi, Beigi-Boroujeni, Benisi, & Saeed, 2021). Встановлено, що оптимальна концентрація крохмалю в полігідроксибутиратному каркасі становить 10%. Таке доповнення сприяє збільшенню міцності на розрив отриманого каркасу, також збільшується проліферація клітин MG-63 та активність лужної фосфатази. У сформованих клітинах MG-63 на полімерному каркасі відбувається мінералізація та відкладення кальцію, що робить цей каркас перспективним кандидатом у подальшій інженерії кісткової тканини.

Полігидроксибутирати також знаходять застосування як агенти для доставки ліків.

Chaturvedi зі співавторами оцінювали використання полігидроксибутирату як агента для пероральної доставки інсуліну (Chaturvedi et al., 2015). В дослідженні використовувався пегільований полігидроксибутират, конюгований дезоксихолевою кислотою. Отримані наночастинки з інкапсульованим інсуліном демонстрували незначне вивільнення речовини в кислому середовищі та повне вивільнення в лужному середовищі. Тестування *in vivo* продемонструвало, що при внесенні досліджуваних наночастинок з інкапсульованим інсуліном діабетичним щурам призводило до значного зменшення рівня глюкози в крові, починаючи з 4 год і до 24 год, тобто такий спосіб доставки інсуліну давав змогу вводити його з пролонгованим вивільненням.

Використання полігидроксибутирату як потенційного наноносія для доставки протипухлинних пептидів оцінювали в (Karoor et al., 2016). У ході експериментів вчені провели конюгацію полігидроксибутирату з поліетиленгліколем. Цей матеріал використовували для інкапсуляції протиракового пептиду NuBCP-9. Ефективність інкапсуляції препарату становила 61%, а час вивільнення пептиду 26 діб відповідно. Наночастинки продемонстрували індукції апоптозу в клітинах MCF-7. Додатково було проведено внутрішньочеревинне введення 20 мг/кг наночастинок полігидроксибутирату з інкапсульованим пептидом двічі на тиждень протягом трьох тижнів мишам, що спричинило 90% регресію пухлин.

Babos з співавторами оцінювали можливість використання наночастинок полігидроксибутирату для доставки комбінації протипухлинних препаратів, а саме сорафенібу та доксорубіцину (Babos et al., 2020). У результаті досліджень було отримано наночастинки полігидроксибутирату з інкапсульованим доксорубіцином та сорафенібом, частину яких додатково кон'югували поліетиленгліколем. У подальшому досліджували цитотоксичність отриманих наночастинок з інкапсульованими препаратами на клітинах колоректальної карциноми HCT-116. Результати експериментів продемонстрували, що через 6 год обидва варіанти наночастинок діяли подібно до контрольного розчину препаратів, в той час як через 24 год цитотоксичний ефект наночастинок значно посилювався.

Perveen з співавторами досліджували ефективність наночастинок полігидроксибутирату завантажених епірубіцином (Perveen, Masood, & Nameed, 2020). Наночастинки полігидроксибутирату з інкапсульованим епірубіцином, було отримано шляхом нанопреципітації. В результаті отримані наночастинки з препаратом продемонстрували тривале вивільнення препарату (8 днів) при рН 4,0, в той час як при рН 7,0 вивільнення препарату відбувалось значно швидше (2 дні). Також при визначенні антибактеріальних властивостей отриманих наночастинок було продемонстровано значно кращий результат порівняно зі стандартним використанням препарату. Покращення антибактеріальних властивостей відбулось приблизно в 6,5 раза проти метицилін-резистентного *Staphylococcus aureus*.

Pandian зі співавторами вивчали використання наночастинок полігидроксибутирату для доставки урсолової кислоти з метою терапії раку (Pandian et al., 2022). В ході дослідження виявлено, що ефективність інкапсуляції становила 54%, а максимальна ефективність доставки сформованих наночастинок відбувалась на 96 год, що підтверджується максимальною цитотоксичністю щодо ракових клітин (HeLa).

Полігидроксибутират також демонструє значний потенціал у формуванні каркасів. Його застосування охоплює інженерію опорно-рухового апарату та нервової тканини, де він підтримує адгезію, проліферацію та диференціацію клітин, а також сприяє процесам регенерації та відновлення тканин.

Ching з співавторами досліджували використання нановолокнистих каркасів, виготовлених із сумішей полігидроксибутирату/полігидроксиоктаноату, для інженерії хрящової тканини (Ching et al., 2016). Конструкції були виготовлені за допомогою електропрядіння, в результаті чого були отримані волокнисті структури, що імітують сітку колагенових фібрил нативного хряща. Дослідження дало змогу оптимізувати жорсткість, швидкість деградації та біосумісність каркасів, виявивши, що композит полігидроксибутирату/полігидроксиоктаноату в співвідношенні 1 до 0,25 забезпечує міцність, наближену до міцності нативного хряща. *In vitro* людські суглобові хондроцити, культивовані на цих каркасах, продемонстрували високу життєздатність з утворенням гіаліноподібного хряща. Протягом чотирьох місяців деградація каркасу зменшувала його міцність, що сприяло інтеграції новоутвореного хрящового матриксу. Дослідження продемонструвало, що полігидроксибутират/полігидроксиоктаноат каркаси є перспективними для клінічної регенерації хряща і можуть слугувати платформою для створення каркасів для інших тканин.

Sanhueza зі співавторами досліджували вплив нановолокон желатину подвійного розміру з мікрОВОлокнами полігидроксибутирату для загоєння діабетичних ран (Sanhueza et al., 2021). Оптимізовані умови електроспінінгу дали змогу отримати структуру, що імітує позаклітинний матрикс, — біоміметичний каркас. Зшитий з геніпіном, цей каркас продемонстрував високу життєздатність фібробластів, гемосумісність і покращене загоєння ран у діабетичних щурів. Каркас желатин/полігидроксибутират покращив регенерацію тканин завдяки кращому формуванню епідермісу, відкладенню колагену та розвитку волосяних фолікулів, перевершуючи монокомпонентні каркаси та контрольні зразки.

Köse з співавторами оцінили взаємодію мезенхімальних стовбурових клітин людини з випадковими r-ПГБ та вирівняними a-ПГБ електроспінованими ПГБ-матрицями (Köse, Kaya, Denkbaş, Korkusuz, & Cetinkaya, 2016). Дослідники виявили, що мезенхімальних стовбурові клітини на a-ПГБ матрицях мають веретеноподібну морфологію та вищу остеогенну диференціацію, в той час як r-ПГБ підтримують більш рівномірне поширення клітин. Обидві матриці сприяли адгезії, життєздатності та диференціації мезенхімальних стовбурових клітин, що вказує на потенціал для застосування в інженерії кісткової та нервової тканин.

Codreanu зі співавторами досліджували потенціал модифікованого бактеріальною целюлозою полігидроксибутирату для створення кісткової тканини при критичних кальваріальних дефектах у мишей (Codreanu et al., 2020). Дослідження продемонструвало, що матриця полігидроксибутират/целюлоза підтримує проліферацію преадипоцитів 3T3-L1 та сприяє диференціації остеобластів *in vivo*, що призводить до утворення нової кісткової тканини через 20 тижнів. Посилення остеогенезу пояснювалося підвищенням активності лужної фосфатази та мінералізацією, що спостерігалася за допомогою рентгенографії, і гістологічними ознаками зрілої кісткової тканини. Матриці мали механічні властивості, близькі до кіст-

кової тканини, і продемонстрували біосумісність без значної токсичності. Ці результати свідчать про те, що матриця полігідроксibuтират/целюлоза може слугувати ефективним біоматеріалом для відновлення великих кісткових дефектів.

Висновки

Проведений аналіз демонструє значний потенціал ціанобактерій як ефективних продуцентів полігідроксibuтирату (ПГБ) — біорозкладного полімеру, що є перспективною альтернативою традиційним пластикам. Дослідження показують, що ключовими стратегіями для підвищення виходу ПГБ є метаболічна та генетична інженерія, яка передбачає експресію генів, відповідальних за його синтез. Крім того, суттєве збільшення накопичення ПГБ досягається завдяки оптимізації умов культивування. Перехід від лабораторних експериментів до пілотного виробництва в трубчастих фотобіореакторах і розробка кінетичних моделей свідчать про те, що технологія готова до масштабування. У харчовій промисловості ПГБ використовують не лише як біорозкладний пакувальний матеріал, але й як основу для створення активних плівок. Внесення таких добавок, як графенові нанопластики, ванілін або ефірні олії, дає змогу покращити його фізико-хімічні властивості, збільшити термін зберігання продуктів та інгібувати ріст патогенних мікроорганізмів. Особливе значення ПГБ має в біомедицинській сфері, де його біосумісність і здатність до біодеградації відкривають нові можливості. Він успішно застосовується для створення каркасів у тканинній інженерії, сприяючи проліферації та диференціації клітин кісткової, хрящової та нервової тканин. Крім того, наночастинки на основі ПГБ є перспективними носіями для цільової та пролонгованої доставки ліків, зокрема інсуліну та протипухлинних препаратів.

Отже, біотехнологія виробництва ПГБ з використанням ціанобактерій є надзвичайно перспективною для створення сталого виробництва біополімерів.

Література

- Aikawa, S., Nishida, A., Ho, S. H., Chang, J. S., Hasunuma, T., & Kondo, A. (2014). Glycogen production for biofuels by the euryhaline cyanobacteria *Synechococcus* sp. strain PCC 7002 from an oceanic environment. *Biotechnology for biofuels*, 7, 1—8. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-7-88>.
- Ansari, S., & Fatma, T. (2016). Cyanobacterial polyhydroxybutyrate (PHB): screening, optimization and characterization. *PLoS one*, 11(6), e0158168. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158168>.
- Arisaka, S., Terahara, N., Oikawa, A., & Osanai, T. (2019). Increased polyhydroxybutyrate levels by ntcA overexpression in *Synechocystis* sp. PCC 6803. *Algal Research*, 41, 101565. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101565>.
- Asl, M. A., Karbasi, S., Beigi-Boroujeni, S., Benisi, S. Z., & Saeed, M. (2021). Evaluation of the effects of starch on polyhydroxybutyrate electrospun scaffolds for bone tissue engineering applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 191, 500—513. <https://doi.org/10.1016/j.ijbmac.2021.09.078>.
- Babos, G., Rydz, J., Kawalec, M., Klim, M., Fodor-Kardos, A., Trif, L., & Feczko, T. (2020). Poly (3-hydroxybutyrate)-based nanoparticles for sorafenib and doxorubicin anticancer drug delivery. *International journal of molecular sciences*, 21(19), 7312. <https://doi.org/10.3390/ijms21197312>.
- Brasil, B. D. S. A. F., de Siqueira, F. G., Salum, T. F. C., Zanette, C. M., & Spier, M. R. (2017). Microalgae and cyanobacteria as enzyme biofactories. *Algal research*, 25, 76—89. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.04.035>.

- Carpine, R., Du, W., Olivieri, G., Pollio, A., Hellingwerf, K. J., Marzocchella, A., & dos Santos, F. B. (2017). Genetic engineering of *Synechocystis* sp. PCC6803 for poly- β -hydroxybutyrate overproduction. *Algal research*, 25, 117—127. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.05.014>.
- Carpine, R., Olivieri, G., Hellingwerf, K. J., Pollio, A., Pinto, G., & Marzocchella, A. (2019). Photoautotrophic production of poly- β -hydroxybutyrate (PHB) from cyanobacteria: nitrate effects and screening of strains. *Environ Eng Manag J.*, 18(6), 1337—1346. <http://dx.doi.org/10.30638/eemj.2019.127>.
- Catarina Guedes, A., Katkam, N. G., Varela, J., & Xavier Malcata, F. (2014). Photobioreactors for cyanobacterial culturing. *Cyanobacteria: an economic perspective*, 270—292. <https://doi.org/10.1002/9781118402238.ch17>.
- Chaturvedi, K., Ganguly, K., Kulkarni, A. R., Rudzinski, W. E., Krauss, L., Nadagouda, M. N., & Aminabhavi, T. M. (2015). Oral insulin delivery using deoxycholic acid conjugated PEGylated polyhydroxybutyrate co-polymeric nanoparticles. *Nanomedicine*, 10(10), 1569—1583. <https://doi.org/10.2217/nmm.15.36>.
- Ching, K. Y., Andriotis, O. G., Li, S., Basnett, P., Su, B., Roy, I., ..., & Stolz, M. (2016). Nanofibrous poly (3-hydroxybutyrate)/poly (3-hydroxyoctanoate) scaffolds provide a functional microenvironment for cartilage repair. *Journal of biomaterials applications*, 31(1), 77—91. <https://doi.org/10.1177/0885328216639749>.
- Codreanu, A., Balta, C., Herman, H., Cotoraci, C., Mihali, C. V., Zurbau, N., & Hermenean, A. (2020). Bacterial cellulose-modified polyhydroxyalkanoates scaffolds promotes bone formation in critical size calvarial defects in mice. *Materials*, 13(6), 1433. <https://doi.org/10.3390/ma13061433>.
- Comer, A. D., Abraham, J. P., Steiner, A. J., Korosh, T. C., Markley, A. L., & Pfleger, B. F. (2020). Enhancing photosynthetic production of glycogen-rich biomass for use as a fermentation feedstock. *Frontiers in energy research*, 8, 93. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00093>.
- Correa, J. P., Molina, V., Sanchez, M., Kainz, C., Eisenberg, P., & Massani, M. B. (2017). Improving ham shelf life with a polyhydroxybutyrate/polycaprolactone biodegradable film activated with nisin. *Food Packaging and Shelf Life*, 11, 31—39. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fpsl.2016.11.004>.
- Da Silva, C. K., Costa, J. A. V., & de Moraes, M. G. (2018). Polyhydroxybutyrate (PHB) synthesis by *Spirulina* sp. LEB 18 using biopolymer extraction waste. *Applied biochemistry and biotechnology*, 185, 822—833. <https://doi.org/10.1007/s12010-017-2687-x>.
- Degli Esposti, M., Chiellini, F., Bondioli, F., Morselli, D., & Fabbri, P. (2019). Highly porous PHB-based bioactive scaffolds for bone tissue engineering by in situ synthesis of hydroxyapatite. *Materials Science and Engineering: C*, 100, 286—296. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.03.014>.
- González-Resendiz, L., Sánchez-García, L., Hernández-Martínez, I., Viguera-Ramírez, G., Jiménez-García, L. F., Lara-Martínez, R., & Morales-Ibarria, M. (2021). Photoautotrophic poly (3-hydroxybutyrate) production by a wild-type *Synechococcus elongatus* isolated from an extreme environment. *Bioresource Technology*, 337, 125508. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125508>.
- Hondo, S., Takahashi, M., Osanai, T., Matsuda, M., Hasunuma, T., Tazuke, A., ..., & Asayama, M. (2015). Genetic engineering and metabolite profiling for overproduction of polyhydroxybutyrate in cyanobacteria. *Journal of bioscience and bioengineering*, 120(5), 510—517. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2015.03.004>.
- Kaewbai-Ngum, A., Incharoensakdi, A., & Monshupanee, T. (2016). Increased accumulation of polyhydroxybutyrate in divergent cyanobacteria under nutrient-deprived photoautotrophy: An efficient conversion of solar energy and carbon dioxide to polyhydroxybutyrate by *Calothrix scytonemicola* TISTR 8095. *Bioresource technology*, 212, 342—347. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.035>.
- Kamravamanesh, D., Kovacs, T., Pflügl, S., Druzhinina, I., Kroll, P., Lackner, M., & Herwig, C. (2018). Increased poly- β -hydroxybutyrate production from carbon dioxide in randomly mutated cells of cyanobacterial strain *Synechocystis* sp. PCC 6714: Mutant generation and characterization. *Bioresource technology*, 266, 34—44. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.06.057>.
- Kamravamanesh, D., Pflügl, S., Nischkauer, W., Limbeck, A., Lackner, M., & Herwig, C. (2017). Photosynthetic poly- β -hydroxybutyrate accumulation in unicellular cyanobacterium *Synechocystis* sp. PCC 6714. *AMB express*, 7, 1—12. <https://doi.org/10.1186/s13568-017-0443-9>.

- Kapoor, S., Gupta, D., Kumar, M., Sharma, S., Gupta, A. K., Misro, M. M., & Singh, H. (2016). Intracellular delivery of peptide cargos using polyhydroxybutyrate based biodegradable nanoparticles: Studies on antitumor efficacy of BCL-2 converting peptide, NuBCP-9. *International journal of pharmaceuticals*, 511(2), 876—889. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2016.07.077>.
- Karahaliloglu, Z., Ercan, B., Taylor, E. N., Chung, S., Denkbaz, E. B., & Webster, T. J. (2015). Antibacterial nanostructured polyhydroxybutyrate membranes for guided bone regeneration. *Journal of biomedical nanotechnology*, 11(12), 2253—2263. <https://doi.org/10.1166/jbn.2015.2106>.
- Kavitha, G., Kurinjimalar, C., Sivakumar, K., Aravind, R., Shree, C. G., Arthi, K., ..., & Rengasamy, R. (2016). Mass cultivation of UV-B adapted *Arthrospira platensis* RRGK under open raceway pond for the production of Poly- β -hydroxy butyrate. *International Journal of Biological Macromolecules*, 93, 1304—1316. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.09.105>.
- Khetkorn, W., Incharoensakdi, A., Lindblad, P., & Jantaro, S. (2016). Enhancement of poly-3-hydroxybutyrate production in *Synechocystis* sp. PCC 6803 by overexpression of its native biosynthetic genes. *Bioresource technology*, 214, 761—768. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.05.014>.
- Koch, M., Bruckmoser, J., Scholl, J., Hauf, W., Rieger, B., & Forchhammer, K. (2020). Maximizing PHB content in *Synechocystis* sp. PCC 6803: a new metabolic engineering strategy based on the regulator PirC. *Microbial cell factories*, 19, 1—12. <https://doi.org/10.1186/s12934-020-01491-1>.
- Köse, S., Kaya, F. A., Denkbaz, E. B., Korkusuz, P., & Cetinkaya, F. D. (2016). Evaluation of biocompatibility of random or aligned electrospun polyhydroxybutyrate scaffolds combined with human mesenchymal stem cells. *Turkish Journal of Biology*, 40(2), 410—419. <http://dx.doi.org/10.3906/biy-1508-18>.
- Ma, Y., Li, L., & Wang, Y. (2018). Development of PLA-PHB-based biodegradable active packaging and its application to salmon. *Packaging Technology and Science*, 31(11), 739—746. <https://doi.org/10.1002/pts.2408>.
- Manikandan, N. A., Pakshirajan, K., & Pugazhenthii, G. (2020). Preparation and characterization of environmentally safe and highly biodegradable microbial polyhydroxybutyrate (PHB) based graphene nanocomposites for potential food packaging applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 154, 866—877. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.03.084>.
- McAdam, B., Brennan Fournet, M., McDonald, P., & Mojicevic, M. (2020). Production of polyhydroxybutyrate (PHB) and factors impacting its chemical and mechanical characteristics. *Polymers*, 12(12), 2908. <https://doi.org/10.3390/polym12122908>.
- Meischel, M., Eichler, J., Martinelli, E., Karr, U., Weigel, J., Schmöller, G., ..., & Stanzl-Tschegg, S. E. (2016). Adhesive strength of bone-implant interfaces and in-vivo degradation of PHB composites for load-bearing applications. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 53, 104—118. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2015.08.004>.
- Pandian, S. R. K., Kunjiappan, S., Pavadai, P., Sundarapandian, V., Chandramohan, V., & Sundar, K. (2022). Delivery of ursolic acid by polyhydroxybutyrate nanoparticles for cancer therapy: in silico and in vitro studies. *Drug Research*, 72(02), 72—81. <https://doi.org/10.1055/a-1640-0009>.
- Perveen, K., Masood, F., & Hameed, A. (2020). Preparation, characterization and evaluation of antibacterial properties of epirubicin loaded PHB and PHBV nanoparticles. *International journal of biological macromolecules*, 144, 259—266. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.12.049>.
- Rajan, K. P., Thomas, S. P., Gopanna, A., & Chavali, M. (2019). Polyhydroxybutyrate (PHB): A standout biopolymer for environmental sustainability. In *Handbook of ecomaterials*, 1—23. Springer, Cham. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-68255-6_92.
- Rech, C. R., Brabes, K. C., Silva, B. E., Martinez, M. A., Silveira, T. F., Alberton, J., & Martelli, S. (2021). Antimicrobial and physical-mechanical properties of polyhydroxybutyrate edible films containing essential oil mixtures. *Journal of Polymers and the Environment*, 29, 1202—1211. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10924-020-01943-0>.
- Roh, H., Lee, J. S., Choi, H. I., Sung, Y. J., Choi, S. Y., Woo, H. M., & Sim, S. J. (2021). Improved CO₂-derived polyhydroxybutyrate (PHB) production by engineering fast-growing cyanobacterium *Synechococcus elongatus* UTEX 2973 for potential utilization of flue gas. *Bioresource technology*, 327, 124789. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124789>.

Rueda, E., & García, J. (2021). Optimization of the phototrophic Cyanobacteria polyhydroxybutyrate (PHB) production by kinetic model simulation. *Science of the Total Environment*, 800, 149561. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149561>.

Rueda, E., García-Galán, M. J., Díez-Montero, R., Vila, J., Grifoll, M., & García, J. (2020). Polyhydroxybutyrate and glycogen production in photobioreactors inoculated with wastewater borne cyanobacteria monocultures. *Bioresource technology*, 295, 122233. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122233>.

Sanhueza, C., Hermosilla, J., Bugallo-Casal, A., Da Silva-Candal, A., Taboada, C., Millán, R., & Acevedo, F. (2021). One-step electrospun scaffold of dual-sized gelatin/poly-3-hydroxybutyrate nano/microfibers for skin regeneration in diabetic wound. *Materials Science and Engineering: C*, 119, 111602. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.111602>.

Singh, A. K., Sharma, L., Mallick, N., & Mala, J. (2017). Progress and challenges in producing polyhydroxyalkanoate biopolymers from cyanobacteria. *Journal of Applied Phycology*, 29, 1213—1232. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-016-1006-1>.

Singh, M. K., Rai, P. K., Rai, A., Singh, S., & Singh, J. S. (2019). Poly- β -hydroxybutyrate production by the cyanobacterium *Scytonema geitleri* Bharadwaja under varying environmental conditions. *Biomolecules*, 9(5), 198. <https://doi.org/10.3390/biom9050198>.

Smith, A. J. (1983). Modes of cyanobacterial carbon metabolism. *Annales de l'Institut Pasteur/Microbiologie*, 134(1), 93—113. [https://doi.org/10.1016/S0769-2609\(83\)80099-4](https://doi.org/10.1016/S0769-2609(83)80099-4).

Stal, L. J. (1992). Poly (hydroxyalkanoate) in cyanobacteria: an overview. *FEMS Microbiology Reviews*, 9(2—4), 169—180. [https://doi.org/10.1016/0378-1097\(92\)90307-A](https://doi.org/10.1016/0378-1097(92)90307-A).

Suh, I. S., & Lee, C. G. (2003). Photobioreactor engineering: design and performance. *Biotechnology and bioprocess engineering*, 8, 313—321. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02949274>.

Tharasirivat, V., & Jantaro, S. (2023). Increased biomass and polyhydroxybutyrate production by *Synechocystis* sp. PCC 6803 overexpressing RuBisCO genes. *International journal of molecular sciences*, 24(7), 6415. <https://doi.org/10.3390/ijms24076415>.

Troschl, C., Meixner, K., Fritz, I., Leitner, K., Romero, A. P., Kovalcik, A., & Drosig, B. (2018). Pilot-scale production of poly- β -hydroxybutyrate with the cyanobacterium *Synechocystis* sp. CCALA192 in a non-sterile tubular photobioreactor. *Algal research*, 34, 116—125. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.07.011>.

Xavier, J. R., Babusha, S. T., George, J., & Ramana, K. V. (2015). Material properties and antimicrobial activity of polyhydroxybutyrate (PHB) films incorporated with vanillin. *Applied biochemistry and biotechnology*, 176, 1498—1510. <https://doi.org/10.1007/s12010-015-1660-9>.

Yen, H. W., Hu, I. C., Chen, C. Y., Nagarajan, D., & Chang, J. S. (2019). Design of photobioreactors for algal cultivation. In *Biofuels from algae*, 225—256. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64192-2.00010-X>.

Zahra, Z., Choo, D. H., Lee, H., & Parveen, A. (2020). Cyanobacteria: Review of current potentials and applications. *Environments*, 7(2), 13. <https://doi.org/10.3390/environments7020013>.

Zhang, S., Liu, Y., & Bryant, D. A. (2015). Metabolic engineering of *Synechococcus* sp. PCC 7002 to produce poly-3-hydroxybutyrate and poly-3-hydroxybutyrate-co-4-hydroxybutyrate. *Metabolic engineering*, 32, 174—183. <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2015.10.001>.

ASSESSMENT OF THE CREDITWORTHINESS OF A SMALL ENTERPRISE

H. Rohanova, A. Prozorova

National University of Food Technologies

Key words:

*Creditworthiness
Solvency
Borrower
creditworthiness
assessment
Small business
Construction industry
Finance*

Article history:

Received 07.07.2025
Received in revised form
21.07.2025
Accepted 11.08.2025

Corresponding author:

H. Rohanova

E-mail:

hanna.rohanova@gmail.com

Citation: Роганова Г. О.,
Прозорова А. Р. (2025).
Оцінка кредитоспроможності
малого підприємства. *Наукові праці НУХТ*,
31(4), 107—118.

DOI: 10.24263/2225-2924-
2025-31-4-9

ABSTRACT

The article is devoted to the study of the level of creditworthiness of a small business entity in the construction industry. An analysis of the scientific literature and the regulatory framework devoted to assessing the creditworthiness of enterprises was carried out. It was found that scientists offer diverse methods for assessing the creditworthiness of borrowing enterprises: an integral assessment of the financial condition based on discriminant analysis, forecasting indicators of the financial condition and cash flow by calculating the debt coverage ratio; models built on the basis of the theory of fuzzy logic; the use of artificial neural networks; taking into account risks for transactions using off-balance sheet financial instruments; a model that takes into account inflation risk, industry and production features of the enterprise; forecasting the probability of bankruptcy, assessing the quality of credit; determination of the viability coefficient of enterprises. The formation of the creditworthiness of an enterprise occurs at many stages of the enterprise's functioning. It was determined that creditworthiness was formed under the influence of various factors, the most important of which was industry affiliation. That is why the purpose of the article was to analyze the creditworthiness of a small enterprise in the construction industry in order to identify problematic aspects of managing its creditworthiness. It was found that the main source of financing the current activities of the studied enterprise LLC "EMAK" was loan capital. That is why determining the class of its creditworthiness is very relevant for this enterprise. Thus, during 2022—2024, the value of the integral indicator of creditworthiness of LLC "EMAK" corresponded to the 4—2—3 creditworthiness class, respectively, which indicates the gradual improvement of the conditions for repayment of loans and their servicing.

ОЦІНКА КРЕДИТОСПРОМОЖНОСТІ МАЛОГО ПІДПРИЄМСТВА

Г. О. Роганова, А. Р. Прозорова

Національний університет харчових технологій

Стаття присвячена дослідженню рівня кредитоспроможності суб'єкта малого підприємництва будівельної галузі. Здійснено аналіз наукової літератури та нормативно-законодавчої бази, присвячених оцінюванню кредитоспроможності підприємств. З'ясовано, що науковці пропонують різноспрямовані методи оцінки кредитоспроможності підприємств-позичальників: інтегральна оцінка фінансового стану на основі дискримінантного аналізу, прогнозування показників фінансового стану та руху грошових коштів шляхом розрахунку коефіцієнта покриття боргу; моделі, побудовані на основі теорії нечіткої логіки; застосування штучних нейронних мереж; урахування ризиків за операціями з використанням позабалансових фінансових інструментів; модель, що враховує інфляційний ризик, галузеві та виробничі особливості підприємства; прогнозування ймовірності банкрутства, оцінка якості кредиту; визначення коефіцієнта життєздатності підприємств. Формування кредитоспроможності підприємства відбувається на багатьох етапах функціонування підприємства. Визначено, що кредитоспроможність формується під впливом різноманітних факторів, найбільш вагомим із яких є галузева приналежність. Саме тому метою статті є здійснення аналізу кредитоспроможності малого підприємства будівельної галузі задля виявлення проблемних аспектів управління його кредитоспроможністю. З'ясовано, що основним джерелом фінансування поточної діяльності досліджуваного підприємства ТОВ «ЕМАК» є позиковий капітал, тож визначення класу його кредитоспроможності є дуже актуальним для підприємства. Таким чином, протягом 2022—2024 рр. значення інтегрального показника кредитоспроможності ТОВ «ЕМАК» відповідало 4—2—3 класу кредитоспроможності відповідно, що свідчить про поступове покращення умов для погашення кредитів та їх обслуговування.

Ключові слова: кредитоспроможність, платоспроможність, оцінка кредитоспроможності позичальника, мале підприємство, будівельна галузь, фінанси.

Постановка проблеми. Протягом останніх десятиліть в умовах війни вітчизняні підприємства малого бізнесу зіштовхуються з проблемами пошуку джерел фінансування для здійснення своєї діяльності, оскільки в основі ефективності бізнесу лежить його привабливість щодо залучення в господарську діяльність ресурсів, зокрема активів і робочої сили (Мороз, & Панічук, 2023). Однак суб'єктам підприємницької діяльності все важче отримувати банківське кредитування через високі ставки по кредиту та низьку кредитоспроможністю таких суб'єктів (Джеджула, & Цвик, 2016).

Для підприємства-позичальника з'ясування рівня власної кредитоспроможності є важливим, оскільки це сприяє виявленню недоліків операційної діяльності та управління фінансовими ресурсами на підприємстві з подальшим їх усуненням

(Кириченко, & Забіяка, 2023). Окрім того, своєчасне та правильне визначення рівня кредитоспроможності позичальника дасть змогу знизити кредитний ризик, встановити відповідний обсяг і рівень забезпечення за кредитом (Джеджула, & Цвик, 2016). Саме тому формування активів за рахунок власного капіталу і зобов'язань повинно бути ефективним та доцільним з точки зору результативності як для власників бізнесу, так і для його кредиторів (Мороз, & Панічук, 2023).

Для позикодавця недостатньо, щоб підприємство було платоспроможним, воно повинно бути кредитоспроможним, оскільки, на відміну від інших зобов'язань, кредитні зобов'язання підприємства перед банком повинні погашатися виключно грошима. Окрім того, підприємство можна визнати неплатоспроможним, але кредитоспроможним, і тут важливим аспектом є саме забезпеченість кредиту (Кириченко, & Забіяка, 2023). Аналіз фінансової звітності є класичним підходом, за яким визначають кредитоспроможність суб'єкта підприємницької діяльності. Однак більшість розрахункових показників оцінки фінансового стану дають лише загальне уявлення про прибутковість і фінансову стійкість, тому зазвичай розглядають і додаткові показники, такі як: якість менеджменту, перспективність і конкурентоспроможність продукції, репутація клієнта, дотримання ділової етики, частка ринку, наявність системи внутрішнього контролінгу, кредитна історія, платіжна дисципліна, наявність замовлень, якість маркетингової політики, наявність відкритих судових справ, плинність кадрів на ключових посадах тощо (Кириченко, & Забіяка, 2023; Єпіфанов, 2007). Саме тому сучасні методики оцінки кредитоспроможності суб'єктів підприємницької діяльності базуються на комплексному застосуванні кількісних і якісних показників такої оцінки (Єпіфанов, 2007).

Актуальність обраної теми статті обумовлена наявністю особливостей оцінки кредитоспроможності підприємств малого бізнесу з урахуванням виду діяльності, веденням підприємницької діяльності в умовах кризи, спричиненою повномасштабним вторгненням РФ в Україну. Саме тому для оцінки кредитоспроможності малих підприємств виникає необхідність використання таких методів, які б враховували специфіку діяльності малого підприємства та галузеві особливості ведення підприємницької діяльності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Разом із зародженням теорії кредиту в економічній науковій літературі у XIX ст. з'явився термін «кредитоспроможність позичальника», який використовували А. Сміт (Smith, 1970), Дж. Кейнс (Keynes, 1936), Н. Бунге (Бунге, 1852) та інші. Автори дослідження (Сарлінська, & Тваронавіцієнє, 2020) стверджують, що кожне із запропонованих визначень підкреслює основні аспекти кредитоспроможності без її системного формулювання, зважаючи на здатність позичальника отримувати, ефективно використовувати та погашати кредит.

На сьогодні оцінка кредитоспроможності здійснюється за різними підходами, які базуються на різноманітних методах збору та обробки інформації, що відображає різноспрямовані аспекти діяльності суб'єкта підприємництва та припустимий рівень ризику (Манжос, 2019). Цей факт є більш ніж очевидним саме в часи фінансових криз, коли фінансові установи можуть зазнавати великих збитків через неоплачені кредити позичальників (García, Giménez, Guijarro, 2023).

У праці (Єпіфанов, 2007) детально досліджено проблемами питання удосконалення оцінки кредитоспроможності та інвестиційної привабливості суб'єктів

господарювання, розглянуто наукові підходи і досвід провідних фінансових інститутів до сучасних концепцій оцінки кредитоспроможності позичальника. Автор статті (Терещенко, 2013) пропонує використовувати інтегральну оцінку фінансового стану позичальника на основі дискримінантного аналізу, прогнозних показників фінансового стану та руху грошових коштів шляхом розрахунку показника покриття боргу, врахування фактичного стану обслуговування боргу позичальником, а також результатів аналізу якісних критеріїв.

Наразі у світі існує кілька методологій, спрямованих на прогнозування ймовірності дефолту дебіторів на основі логістичного аналізу, який дає змогу розрізнити дебіторів. Нові ж методології використовують нейронні мережі або багатокритеріальні методи (García, Giménez, & Guijarro, 2023). Так, у праці (Великоіваненко, & Трокоз, 2017) досліджено підходи до моделювання кредитоспроможності позичальника, надано рекомендації з приводу застосування штучних нейронних мереж, зокрема карт самоорганізації Кохонена для оцінки кредитоспроможності. В публікації (Джеджула, & Цвик, 2016) обґрунтовано ефективність використання моделей, побудованих на основі теорії нечіткої логіки. Праця (Muñoz-Cancino, Bravo, Ríos, & Graña, 2023) містить дослідження динаміки ефективності оцінки кредитоспроможності та вплив на неї кредитної історії, поведінки щодо погашення боргів та особливостей соціальних мереж. Як наслідок, запропоновано використовувати систему класифікації машинного навчання, яка дасть змогу покращити управління кредитними ризиками.

Для оцінки кредитоспроможності для невеликих особистих позик у (Genovesi, S., Mönig, J., Schmitz, & oth., 2024) досліджено використання штучного інтелекту та визначено конкретні проблеми процедурної справедливості ШІ, властиві або обчислювальному процесу, або використанню системи в реальному сценарії: невинуватий нерівномірний розподіл прогнозного результату; збереження існуючої практики упередженості та дискримінації; відсутність прозорості щодо оброблених даних і пояснення алгоритмічного результату для заявників на кредит. У статті представлена методика, заснована на цільовому програмуванні, яка дає змогу враховувати судження експертів у моделі, як це пропонує Базельський комітет (García, Giménez, & Guijarro, 2023).

У статті (Фридинський, & Потолова, 2018) запропоновано оцінювати кредитоспроможність суб'єкта підприємницької діяльності з огляду на ризики за операціями з використанням позабалансових фінансових інструментів. Автори праці (Мороз, & Панічук, 2023) вважають, що узагальнюючим індикатором для оцінювання стану підприємства у сфері здатності повернення боргів, які відображаються за статтями пасиву балансу, має бути показник кредитоспроможності. Також зазначено необхідність відображення в балансі підприємства статті, яка буде свідчити про товарні запаси як складову платіжних активів.

За твердженням (Манжос, 2019) важливим фактором впливу на кредитоспроможність суб'єкта підприємницької діяльності є його галузева приналежність. Так, публікація (Стецюк, & Гудзь, 2014) містить обґрунтування актуальності розробки комплексної моделі управління кредитоспроможністю підприємства. Така модель передусім повинна враховувати інфляційний ризик, галузеві та виробничі особливості суб'єкта господарювання.

У працях (Іщенко, & Олійник, 2018; Халатур, Кравченко, Карамушка, & Козир, 2021; Іртішчева, & Крамаренко, 2011) здійснено оцінку кредитоспроможності аграрних підприємств. У (Іщенко, & Олійник, 2018) проведено оцінку кредитоспроможності сільськогосподарського підприємства за моделями: прогнозування ймовірності банкрутства, оцінки якості кредиту та комплексними моделями оцінки кредитоспроможності. У (Халатур, Кравченко, Карамушка, & Козир, 2021) обґрунтовано застосування комплексної експрес-методики оцінки кредитоспроможності в системі внутрішнього і зовнішнього контролю сільськогосподарського підприємства, яка дасть змогу вірно оцінювати можливість отримання, повернення кредиту і відсотків за нього з урахуванням рівня економічного розвитку. В публікації (Іртішчева, & Крамаренко, 2011) викладено різноманітні підходи до оцінки кредитоспроможності підприємств агропродовольчої сфери та запропоновано вдосконалення механізму оцінки кредитоспроможності таких підприємств. Дослідники підтвердили недосконалість наявних методик і підходів до оцінки кредитоспроможності з урахуванням особливостей функціонування сільськогосподарських підприємств.

У праці (Овчелупова, 2020) проаналізовано фактичні показники розвитку банківської системи України, у тому числі масштаби кредитних операцій комерційних банків, на основі нормативно-правового регулювання встановлено алгоритм визначення значення коефіцієнта ймовірності дефолту позичальника-юридичної особи, запропоновано заходи з удосконалення методичних підходів до оцінки кредитоспроможності позичальників комерційного банку.

Дослідження (Внукова, & Воротинцев, 2014) містить аналіз існуючих підходів і моделей розрахунку інтегральних показників кредитостійкості кредитних спілок та фінансових компаній в Україні. Автори вважають, що модель розрахунку інтегрального показника боржника-юридичної особи, що застосовується, не є оптимальною, тому запропоновано нові інтервали (межі) оцінки кредитостійкості кредитних спілок і фінансових компаній. У праці (Şerbu, Baranga, & Petru, 2021) представлено методологію z-скорингу для оцінки кредитоспроможності кредитних установ, методологію визначення рейтингу, що відповідає отриманому суб'єктами господарювання скорингу, розроблену на основі експертної оцінки, та аналіз існування значної кореляції між z-скорингом і рівнем коефіцієнтів левериджу та достатності капіталу.

У (Кириченко, & Забіяка, 2023) для оцінки кредитоспроможності підприємства запропоновано використання методики оцінювання фінансового стану та подальшої оцінки класу позичальника, також моделі Альтмана та визначення коефіцієнта життєздатності промислових підприємств.

У праці (Халатур, Кравченко, Карамушка, & Козир, 2021) автори стверджують, що неможливо використовувати існуючі моделі визначення кредитоспроможності підприємства, складені міжнародними рейтинговими агентствами, через відсутність ключових клієнтів для створення рейтингової шкали на основі регресійного аналізу, недостатньої глибини цих підприємств, відсутність щомісячних даних про розвиток галузі, складність кількісної оцінки ризиків та інновацій галузі, необхідність зовнішнього консультування для створення програмного забезпечення тощо.

Застосування різноманітних методик дає змогу доповнювати оцінку кредитоспроможності позичальника з урахуванням того, що реальні умови господарювання постійно змінюються (Спіфанов, 2007).

Метою дослідження є здійснення аналізу кредитоспроможності підприємства будівельної галузі задля виявлення проблемних аспектів управління кредитоспроможністю досліджуваного підприємства.

Матеріали і методи. Для досягнення поставленої мети використано такі методи дослідження: аналіз наукової літератури, порівняльний і коефіцієнтний аналіз, аналіз динаміки показників, розрахунок дискримінантної моделі, абстрагування та узагальнення, абстрактно-логічний. Матеріали дослідження: сучасні наукові публікації вітчизняних учених, Закони України, Постанови та Положення НБУ, Агентства з питань банкрутства підприємств та організацій, що стосуються оцінки кредитоспроможності підприємств-боржників, фінансова звітність підприємства за 2022—2024 рр.

Викладення основних результатів дослідження. Сьогодні існує декілька підходів до врахування впливу галузевих факторів на формування кредитоспроможності. Законодавством України передбачено застосування «Методики проведення поглибленого аналізу фінансово-господарського стану неплатоспроможних підприємств та організацій» (Методика № 81) та розрахунку індексів ділової активності (Манжос, 2019). Окрім того, для вітчизняних комерційних банків обов'язковим є використання норм Постанови Правління НБУ «Положення про визначення банками України розміру кредитного ризику за активними банківськими операціями» (від 30.06.2016 № 351) та Постанови Правління НБУ «Про внесення змін до деяких нормативно-правових актів Національного банку України» (від 16.03.2018 № 26). Враховуючи норми цих положень, українські банки розроблюють внутрішні положення для визначення класу кредитоспроможності позичальників (Овчелупова, 2020).

Оцінку кредитоспроможності об'єкта дослідження — ТОВ «ЕМАК», було здійснено відповідно до Постанови Правління НБУ від 30.06.2016 № 351. Вибір моделі визначення інтегрованого показника обґрунтовано основним видом діяльності підприємства (41.20 Будівництво житлових і нежитлових будівель) та розміром підприємства (мале підприємство) з урахуванням положень Закону України від 19.06.2003 № 978-IV «Про фінансово-кредитні механізми і управління майном при будівництві житла та операціях з нерухомістю».

Коротку характеристику джерел формування фінансових ресурсів досліджуваного підприємства надано в табл. 1. Основним та єдиним джерелом позикових коштів у 2022—2023 рр. були поточні зобов'язання, переважно інші поточні зобов'язання. У 2024 р. сформовано довгострокові зобов'язання в сумі 288 тис. грн, що незначно скоротило частку позикового капіталу у валюті балансу підприємства. В 2024 р. частка інших поточних зобов'язань склала 75,26% валюти балансу, поточної кредиторської заборгованості за товари, роботи, послуги — 23,7% валюти балансу; власного капіталу — менше за 1%. Також за період 2022—2024 рр. валюта балансу зросла більш ніж у 16 разів. Одночасно поточні зобов'язання зросли в 15,8 раза. Отже, операційна діяльність підприємства фінансується переважно за рахунок позикових коштів. Саме тому визначення рівня кредитоспроможності є дуже актуальним для досліджуваного підприємства ТОВ «ЕМАК».

Порядок оцінки кредитоспроможності за Положенням НБУ від 30.06.2016 № 351, яке є обов'язковим до використання у всіх банках країни, передбачає певні кроки (табл. 2).

Таблиця 1. Аналіз джерел фінансування підприємства

Показник	2022 р.		2023 р.		2024 р.		Абсолютне відхилення, тис. грн		Темп приросту, %	
	факт, тис. грн	частка, %	факт, тис. грн	частка, %	факт, тис. грн	частка, %	2023—2022	2024—2023	2023—2022	2024—2023
I. Власний капітал:										
зареєстрований капітал	102	1,22	102	0,42	102	0,07	0	0	0	0
нерозподілений прибуток (непокритий збиток)	-354,6	-4,25	398,8	1,66	948,4	0,69	753,4	549,6	-212,5	137,8
Усього за розділом I:	-252,6	-3,02	500,8	2,08	1050,4	0,76	753,4	549,6	-298,3	109,7
II. Довгострокові зобов'язання					288	0,21		288		
III. Поточні зобов'язання:										
поточна кредиторська заборгованість за:										
- товари, роботи, послуги	3538,6	42,37	1392,9	5,78	32613,5	23,70	-2145,7	31220,6	-60,6	2241,4
- розрахунками з бюджетом	119,9	1,44	94,1	0,39	11,7	0,01	-25,8	-82,4	-21,5	-87,6
- розрахунками зі страхування					13,9	0,01		13,9		
- розрахунками з оплати праці	2,3	0,03			54,9	0,04	-2,3	54,9		
інші поточні зобов'язання	4942,9	59,19	22100,9	91,75	103548,8	75,26	17158,0	81447,9	347,1	368,5
Усього за розділом III:	8603,7	103,02	23587,9	97,92	136242,8	99,03	14984,2	112654,9	174,2	477,6
Всього:	8351,1	100,00	24088,7	100,00	137581,2	100,00	15737,6	113492,5	188,4	471,1

Джерело: розраховано авторами на основі фінансової звітності.

Таблиця 2. Покроковий алгоритм визначення кредитоспроможності підприємства

№ п/п	Крок алгоритму	Зміст кроку
1.	Визначення моделі відповідно до виду діяльності та розміру підприємства	Орієнтуючись на розмір підприємства з урахуванням галузевої належності застосовується модель виду: $Z = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i$, де: Z — інтегральний показник; x_i — показники фінансової звітності; β_i — коефіцієнти логістичної моделі; β_0 — вільний член. Використовуються табл. 1—2 Додатку 7 Постанови Правління НБУ № 351

2.	Визначення порядку розрахунку показників і формування відповідної інформаційної бази для оцінки	Формування інформаційної бази, що складається з фінансових коефіцієнтів на основі даних фінансової звітності, які надалі беруть участь у розрахунку інтегрального показника
3.	Проведення розрахунків за кожним з показників (МК) і визначення їх основного значення (X)	Безпосередній розрахунок необхідних фінансових показників з урахуванням розміру підприємства: К1-К16 для великих і середніх підприємств, МК1-МК13 – для підприємств малого бізнесу
4.	Проведення розрахунків за моделлю та визначення інтегрального показника (Z)	Розрахунок показника оцінки фінансового стану за відповідною моделлю галузі. Використовуються табл. 1—2 Додатку 7 Постанови Правління НБУ № 351
5.	Присвоєння класу кредитоспроможності за значеннями інтегрального показника (Z)	Визначається клас позичальника; надалі банк має право коригувати клас. Використовуються табл. 4—5 Додатку 7 до Постанови Правління НБУ № 351
6.	Визначається значення коефіцієнта імовірності дефолту позичальника	Визначається показник з урахуванням об'єктивних факторів впливу на кредитоспроможність. Використовуються табл. 1 Додатку 9 Постанови Правління НБУ № 351

Джерело: узагальнено авторами на основі (Постанова Правління НБУ № 351; Овчелупова, 2020; Внукова, & Воротинцев, 2014; Тютюнник, Дорогань-Писаренко, & Тютюнник, 2017).

Для досліджуваного підприємства ТОВ «ЕМАК» використовується така модель:

$$Z = 1,775 + 0,472x_2 + 0,408x_{11} + 0,392x_{12} + 0,357x_{13} + 0,347x_{14}, \quad (1)$$

де x_2 — похідний показник від МК₂ (показник загальної ліквідності), x_{11} — похідний показник від МК₁₁ (показники покриття боргу чистим доходом), x_{12} — похідний показник від МК₁₂ (показник покриття активів прибутком до оподаткування), x_{13} — похідний показник від МК₁₃ (показники частки неопераційних елементів балансу), x_{14} — похідний показник від МК₁₄ (показники оборотності поточних активів).

Визначення фінансових показників ТОВ «ЕМАК» для подальшого розрахунку інтегрального показника наведено у табл. 3. За проведеними розрахунками можна зробити висновок про такі тенденції динаміки основних показників: збільшення МК₂ через випереджаюче збільшення оборотних активів проти поточних зобов'язань; від'ємне значення МК₁₁ у 2022—2023 рр. та його збільшення до позитивного значення у 2024 р.; від'ємне значення МК₁₂ у 2022 р. та набуття позитивного значення у 2023—2024 рр.; зменшення МК₁₃ як показника частки неопераційних елементів балансу; зменшення МК₁₄ як показника оборотності поточних активів.

Таблиця 3. Розрахунок фінансових показників ТОВ «ЕМАК»

Показник	На кінець року			Абсолютне відхилення	
	2022	2023	2024	2023—2022	2024—2023
МК ₂					
Оборотні активи	7056,4	19863	116565,8	12806,60	96702,80

Поточні зобов'язання і забезпечення	8603,7	23587,9	136242,8	14984,20	112654,90
МК ₂	0,8202	0,8421	0,8556	0,02	0,01
МК ₁₁					
Чисті короткострокові та довгострокові зобов'язання	-234,8	-26,1	110,2	208,70	136,30
Чистий дохід від реалізованої продукції	639,6	6384,6	38523,4	5745,00	32138,80
МК ₁₁	-0,3671	-0,0041	0,0029	0,36	0,01
МК ₁₂					
Фінансовий результат до оподаткування	-542,1	797,9	888	1340,00	90,10
Валюта балансу	8351,1	24088,7	137581,2	15737,60	113492,50
МК ₁₂	-0,0649	0,0331	0,0065	0,10	-0,03
МК ₁₃					
Неопераційні активи	1242,8	3822,6	19182,1	2579,80	15359,50
Валюта балансу	8351,1	24088,7	137581,2	15737,60	113492,50
МК ₁₃	0,1488	0,1587	0,1394	0,01	-0,02
МК ₁₄					
Поточні активи	8333,2	23685,6	136288,8	15352,40	112603,20
Чистий дохід від реалізованої продукції	639,6	6384,6	38523,4	5745,00	32138,80
МК ₁₄	13,03	3,71	3,54	-9,32	-0,17

Джерело: розраховано авторами на основі фінансової звітності.

Для визначення достатності показників для певного рівня кредитоспроможності було порівняно фактичні значення з нормативними значеннями.

Розрахунок фінансових показників ТОВ «ЕМАК» та визначення приведених значень наведено у табл. 4, що вказує на потенційний рівень кредитоспроможності та його динаміку. З визначених показників динаміка присутня за показником покриття активів прибутком до оподаткування, всі інші показники мають сталі приведені показники.

Таблиця 4. Розрахунок фінансових показників ТОВ «ЕМАК»

Показник	Значення МК			Значення МК, %			Значення К		
	2022	2023	2024	2022	2023	2024	2022	2023	2024
МК ₂	0,8202	0,8421	0,8556	82,0	84,2	85,6	-0,369	0,420	0,420
МК ₁₁	-0,3671	-0,0041	0,0029	-36,7	-0,4	0,3	1,063	1,063	1,063
МК ₁₂	-0,0649	0,0331	0,0065	-6,5	3,3	0,7	-0,952	0,848	0,128
МК ₁₃	0,1488	0,1587	0,1394	14,9	15,9	13,9	-0,874	-0,874	-0,874
МК ₁₄	13,03	3,71	3,54	1303,0	371,0	354,0	0,822	0,822	0,822

Джерело: розраховано авторами на основі фінансової звітності.

Динаміку значень інтегрального показника досліджуваного підприємства за 2022—2024 рр., розраховану за формулою (1), відображено на рис. 1.

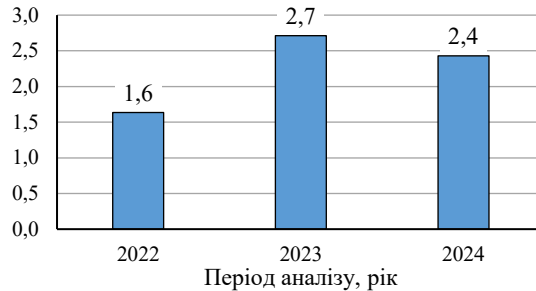


Рис. 1. Динаміка інтегрального показника кредитоспроможності ТОВ «ЕМАК».

Джерело: побудовано авторами на основі фінансової звітності

У 2022 р. значення інтегрального показника кредитоспроможності ТОВ «ЕМАК» дорівнювали 4 класу кредитоспроможності, що вказує на наявність проблем у фінансовому стані та наявності загроз для погашення кредитів та їх обслуговування. У 2023 р. відбулося різке покращення рівня кредитоспроможності та інтегральний показник збільшено до 2,7, що відповідало вже класу 2 кредитоспроможності і майже відмінному стану умов для погашення кредитів та їх обслуговування через підвищення рівня ліквідності та підвищення покриття активів прибутком. Отже, отримання прибутку призвело до збільшення рівня кредитоспроможності та покращення на два класи. У 2024 р. відбулося пониження класу кредитоспроможності до класу 3 через зменшення показника покриття активів прибутком до оподаткування, тож основним фактором зміни класу кредитоспроможності є рівень прибутковості підприємства та рівня покриття прибутком до оподаткування активів.

Висновки

Дослідження алгоритму визначення кредитоспроможності підприємства з використанням методики, затвердженої Постановою Правління НБУ № 351, дало змогу визначити особливості розрахунку інтегрального показника кредитоспроможності малого підприємства будівельної галузі. Оцінку кредитоспроможності здійснено у такій послідовності: визначення моделі відповідно до виду діяльності та розміру підприємства, визначення порядку розрахунку показників і формування відповідної інформаційної бази для оцінки кредитоспроможності, проведення розрахунків за кожним з показників (МК) та визначення їх основного значення (x), проведення розрахунків за моделлю та визначення інтегрального показника (Z), присвоєння класу кредитоспроможності за значеннями інтегрального показника. В 2022 р. значення інтегрального показника кредитоспроможності ТОВ «ЕМАК» відповідало 4 класу кредитоспроможності, що свідчить про наявність проблем у фінансовому стані та загроз для погашення кредитів та їх обслуговування. В 2023 р. клас кредитоспроможності підприємства підвищився до класу 2, що відповідає майже відмінному стану умов для погашення кредитів та їх обслуговування. В 2024 р. зниження кредитоспроможності до 3 класу пояснюється зниженням прибутковості та галузевими особливостями діяльності підприємства.

Література

- Бунге, Н. Х. (1852). *Теория кредита*. Киев.
- Великоіваненко, Г. І., & Трокоз, Л. О. (2017). Моделювання кредитоспроможності позичальників комерційного банку. *Наукові записки Національного університету «Острозька академія»*, 22, 137—141. <https://journals.oa.edu.ua/Economy/article/view/756>.
- Внукова, Н. М., & Воротинцев, М. М. (2014). Аналіз інтегральних показників рівня кредитоспроможності фінансових компаній і кредитних спілок. *Науковий вісник Львівського державного університету внутрішніх справ*, 2, 254—266. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvldu_e_2014_2_29.
- Джеджула, В. В., & Цвик, О. Г. (2016). Сучасні методичні підходи до оцінювання кредитоспроможності підприємства. *Економіка і суспільство*, 7, 290—294. https://economyandsociety.in.ua/journals/7_ukr/49.pdf.
- Єпіфанов, А. О. (Ред.). (2007). *Оцінка кредитоспроможності та інвестиційної привабливості суб'єктів господарювання*: монографія. Суми: УАБС НБУ.
- Іртищева, І. О., & Крамаренко, І. С. (2011). Методичні підходи до оцінки кредитоспроможності підприємств аграрної сфери. *Агросвіт*, 19, 2—4. http://nbuv.gov.ua/UJRN/agrosvit_2011_19_2.
- Іщенко, Н. М. & Олійник, О. М. (2018). Кредитоспроможність сільськогосподарських підприємств: аналіз факторів, що формують резерви її зростання. *Інфраструктура ринку*, 15, 89—95. http://www.marketinftr.od.ua/journals/2018/15_2018_ukr/16.pdf.
- Кириченко, С., & Забіяка, В. (2023). Діагностика кредитоспроможності підприємства з метою підвищення стабільності діяльності. *Економіка та суспільство*, 50. Взято з: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-50-56>.
- Манжос, С. Б. (2013). Проблеми оцінки кредитоспроможності позичальника з урахуванням галузевих особливостей. *Сталий розвиток економіки*, 4, 351—356. http://nbuv.gov.ua/UJRN/sre_2013_4_75.
- Методика проведення поглибленого аналізу фінансово-господарського стану неплатоспроможних підприємств та організацій: затв. наказом Агентства з питань банкрутства підприємств та організацій від 27.06.1997 р. № 81. Взято з <http://zakon1.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=z0288-97>.
- Мороз, Ю. Ю., & Панічук, О. В. (2023). Формування платіжних активів при оцінюванні кредитоспроможності підприємства: визнання та обліково-аналітичний аспект. *Інвестиції: практика та досвід*, 7, 23—31. <https://doi.org/10.32702/2306-6814.2023.7.23>.
- Овчелупова, О. (2020). Оцінка кредитоспроможності позичальників комерційного банку: напрямки підвищення якості інформаційно-аналітичного забезпечення». *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*, 3(13), 106—114. <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2020.13.106>.
- Про внесення змін до деяких нормативно-правових актів Національного банку України: Постанова Правління НБУ від 16.03.2018 р. № 26. Взято з: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0026500-18#Text>.
- Про затвердження Положення про визначення банками України розміру кредитного ризику за активними банківськими операціями: Постанова НБУ від 30.06.2016 № 351. Взято з: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0351500-16#n750>.
- Про фінансово-кредитні механізми і управління майном при будівництві житла та операціях з нерухомістю: Закон України від 19.06.2003 № 978-IV. Взято з: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/978-15#Text>.
- Річна фінансова звітність ТОВ «ЕМАК» за період 2022—2024 рр.
- Романишин, В., & Круш, В. (2024). Сучасні підходи до оцінки кредитоспроможності корпоративних підприємств малого бізнесу. *Економіка та суспільство*, 68. Взято з: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-68-162>.
- Стецюк, П. А., & Гудзь, О. Є. (2014). Управління кредитоспроможністю підприємства: теоретичні та практичні аспекти. *Облік і фінанси*, 3(65), 110—116.

Терещенко, О. В. (2013). Нові підходи до оцінки кредитоспроможності позичальників юридичних осіб. *Вісник НБУ*, 1(191), 25—30.

Тютюнник, Ю. М., Дорогань-Писаренко, Л. О., & Тютюнник, С. В. (2017). Послідовність оцінки фінансового стану боржників-юридичних осіб. *Економіка і суспільство*, 8, 695—699.

Фридинський, В. А., & Потолова, Я. Ю. (2018). Методичні підходи до оцінки кредитоспроможності позичальників. *Вісник НТУ «ХПІ»*, 64, 3—6.

Халатур, С. М., Кравченко, М. В., Карамушка, Д. К., & Козир, Е. В. (2021). Комплексна експрес-методика оцінки кредитоспроможності сільськогосподарських підприємств з урахуванням рівня їх економічного розвитку. *Економіка та держава*, 10, 47—42. <https://doi.org/10.32702/2306-6806.2021.10.37>.

García, F., Giménez, V., & Guijarro, F. (2023). Credit risk management: A multicriteria approach to assess creditworthiness. *Mathematical and Computer Modelling*, 57(7—8), 2009—2015. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2012.03.005>.

Genovesi, S., Mönig, J., Schmitz, A., Poretschkin, M., Akila, M., Kahdan, M., Kleiner, R., Krieger, L., Zimmermann, A. (2024). Standardizing fairness-evaluation procedures: interdisciplinary insights on machine learning algorithms in creditworthiness assessments for small personal loans. *AI and Ethics*, 4, 537—553. <https://doi.org/10.1007/s43681-023-00291-8>.

Caplinska, A., & Tvaronavičienė, M. (2020). Creditworthiness place in Credit Theory and methods of its evaluation. *Entrepreneurship and Sustainability Issues*, 7(3), 2542—2555. [http://doi.org/10.9770/jesi.2020.7.3\(72\)](http://doi.org/10.9770/jesi.2020.7.3(72)).

Keynes, J. M. (1936). *The General Theory of Employment, Interest and Money*.

Muñoz-Cancino, R., Bravo, C., Ríos, S., & Graña, M. (2023). On the dynamics of credit history and social interaction features, and their impact on creditworthiness assessment performance. *Expert Systems with Applications*, 218. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119599>.

Şerbu, R., Baranga, L., & Petru, O. (2021). Creditworthiness Assessment for Credit Institutions and for the Risk Associated with Excessive Leverage toward Sustainable Performance. *Econometrics in Sustainable Financial Markets*, 13(21). <https://doi.org/10.3390/su132111574>.

Smith, A. (1970). *The Wealth of Nations* (1). London: Dent, New York: Dutton.

ANALYSIS OF METHODS AND EQUIPMENT FOR COOLING BAKERY PRODUCTS IN MODERN BAKERIES

O. Kozak, M. Desyk, V. Telychkun

National University of Food Technologies

Key words:

Bakery products
Cooling method
Cooling equipment
Optimization of
production processes

Article history:

Received 11.07.2025
Received in revised form
28.07.2025
Accepted 12.08.2025

Corresponding author:

O. Kozak
E-mail:
oleksandrkozak2@gmail.
com

Citation: Козак О. С., Десик М. Г., Теличкун В. І. (2025). Аналіз способів і обладнання для охолодження хлібобулочної продукції на сучасних хлібопекарських підприємствах. *Наукові праці НУХТ*, 31(4), 119—135.
DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-4-10

ABSTRACT

For a long time, the food industry has been increasingly focusing on optimizing technological processes, reducing energy consumption and production costs, expanding the product range, accelerating production, and shortening the cooling time of finished products, particularly in bakery enterprises.

Modern bakery enterprises employ two main cooling methods: natural (convective) cooling and cooling using conditioned air.

Natural cooling is the simplest method but takes a long time, requires large areas, and does not ensure uniform cooling, which can affect product quality. The use of conditioned air allows for a reduction in cooling time; however, it requires complex equipment, significant energy consumption, and controlled operating conditions.

Both methods have drawbacks, such as process duration, large equipment size, difficulty in transporting products, uneven cooling, and the risk of bacterial contamination.

One of the promising directions for intensifying the cooling process of finished bakery products is the implementation of vacuum cooling, which is based on heat removal through the evaporation of moisture from products with sufficient gas and vapor permeability.

Vacuum cooling significantly reduces cooling time while ensuring uniform temperature distribution inside the product, which positively affects its quality. Vacuum cooling also contributes to the improvement of the structural and mechanical properties of baked goods, extends their shelf life, and reduces the risk of microbiological contamination.

An analytical review of existing cooling methods and equipment for bakery products, their advantages and disadvantages are presented, and the prospects for applying vacuum cooling as an effective alternative to traditional cooling methods are examined.

АНАЛІЗ СПОСОБІВ І ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОХОЛОДЖЕННЯ ХЛІБОБУЛОЧНОЇ ПРОДУКЦІЇ НА СУЧАСНИХ ХЛІБОПЕКАРСЬКИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

О. С. Козак, М. Г. Десик, В. І. Теличкун

Національний університет харчових технологій

Протягом тривалого часу харчові виробництва приділяють усе більше уваги оптимізації технологічних процесів, зменшенню енерговитрат і собівартості продукції, розширенню асортименту, прискоренню виробництва та, зокрема, скороченню часу охолодження готової продукції на хлібопекарських підприємствах.

На сучасних хлібопекарських підприємствах застосовуються два основні способи охолодження: природний (конвективний) та з використанням кондиціонованого повітря.

Природне охолодження є найпростішим, але займає багато часу, потребує великих площ і не забезпечує рівномірного охолодження, що може впливати на якість продукції. Використання кондиціонованого повітря дає змогу скоротити час охолодження, проте потребує складного обладнання, значних енергетичних витрат і контрольованих умов експлуатації. Обидва способи мають недоліки, такі як тривалість процесу, великі габарити обладнання, складність транспортування виробів, нерівномірне охолодження та ризик бактеріального забруднення.

Один із перспективних напрямів інтенсифікації процесу охолодження готових хлібобулочних виробів — впровадження вакуумного охолодження, яке ґрунтується на відведенні тепла за рахунок випаровування вологи з продуктів, що мають достатню газо- та паропроникність.

Вакуумне охолодження значно скорочує час охолодження, забезпечуючи рівномірний розподіл температури всередині виробу, що позитивно впливає на його якість. Вакуумне охолодження також сприяє покращенню структурно-механічних властивостей виробів, подовженню терміну зберігання та зменшенню ризику мікробіологічного забруднення.

У статті проведено аналітичний огляд існуючих способів та обладнання для охолодження хлібобулочних виробів, їх переваг і недоліків, а також розглянуто перспективи застосування вакуумного охолодження як ефективною альтернативи традиційним способам охолодження.

Ключові слова: хлібобулочні вироби, спосіб охолодження, обладнання для охолодження, оптимізація виробничих процесів.

Постановка проблеми. Охолодження готової продукції в сучасному хлібопекарському виробництві є важливим етапом, який впливає не лише на якість кінцевого продукту, а й на його безпеку та термін зберігання (Козак, Теличкун, 2023; Ajani, Zhu, & Sun, 2022). Охолодження знижує температуру виробів до необхідного рівня, що забезпечує стабільність текстури та збереження органолептичних

властивостей. Крім того, процес охолодження має важливий вплив на термін зберігання, оскільки час і умови охолодження визначають мікробіологічну чистоту продукції (Alibas, & Koksai, 2014; Козак, Теличкун, Теличкун, 2024).

Традиційні способи охолодження, як-от природне (конвективне) та з використанням кондиціонованого повітря, поширені на хлібопекарських підприємствах, але мають як переваги, так і значні недоліки (Alibas, & Koksai, 2015; Bahrani, Monteau, Rezzoug, Loisel, & Maache-Rezzoug, 2014). Природне охолодження відзначається низькими енергетичними витратами, але триває довго та потребує значних виробничих площ (Клапатюк, Ковальов, & Федорів, 2014). Через повільність і нерівномірний розподіл температури можливе погіршення якості виробів — утворення тріщин на скоринці, нерівномірне охолодження, що впливає на структуру й смак (Cai, Tuo, Song, Zheng, Gu, & Wang, 2018).

Охолодження за допомогою кондиціонованого повітря прискорює процес охолодження завдяки більш контрольованим умовам температури та вологості, але вимагає значних енергетичних витрат і складного обладнання для підтримки оптимальних параметрів (Chen, Li, & Chua, 2018; Kozak, & Telychkun, 2024). Це не лише підвищує енергетичні витрати, а й ускладнює підтримку необхідних умов. Крім того, цей спосіб, як і природне охолодження, вразливий до бактеріального забруднення через тривалий контакт виробів з повітрям (Primo-Martín, Beukelaer, Namer, & Vliet, 2008; Zhu, Li, & Sun, 2020).

Обмеження традиційних методів охолодження стимулюють пошук ефективніших та енергоощадних технологій. Одним з таких перспективних напрямків є вакуумне охолодження (Everington, 2003). Ця технологія ґрунтується на принципі зниження тиску в спеціальній камері, що сприяє швидкому випаровуванню вологи з хлібобулочних виробів (McDonald, 2001). Завдяки газо- та паропроникності продуктів охолодження відбувається швидко й рівномірно, що забезпечує високу якість виробів. Вакуумне охолодження скорочує час процесу, зберігаючи текстуру, смак і структуру хлібобулочних виробів (Козак, Теличкун, 2023; Kinner, Rüegg, Weber, Buchli, Durrer, & Müller, 2021).

Вакуумне охолодження має і недоліки, зокрема високу вартість обладнання та складність інтеграції у виробничі лінії (Wang, Kan, Huang, & Lu, 2020).

Наразі вакуумне охолодження не застосовується в потоковому виробництві, що вказує на потребу в подальших дослідженнях, які мають бути спрямовані на зниження енергетичних витрат, скорочення часу охолодження, збереження якості продукції та мінімізацію ризику бактеріального забруднення. (Kinner, Rüegg, Weber, Buchli, Durrer, & Müller, 2021; Kozak, & Telychkun, 2024) Важливо також забезпечити економічну доцільність масштабного впровадження цієї технології, що підвищить ефективність і конкурентоспроможність хлібопекарської галузі (Feng, & Li, 2015; Zhu, Li, & Sun, 2020).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останні роки значна увага надається оптимізації процесу охолодження хлібобулочних виробів, оскільки цей етап виробництва має вирішальне значення для забезпечення високої якості та безпеки готової продукції, а також для підвищення ефективності всього виробничого процесу (Guessasma, & Nouri, 2015; Kozak, & Telychkun, 2024; Zhu, Li, Sun, & Wang, 2018). Охолодження є одним із ключових завершальних етапів, що впливає на структуру, смакові властивості, а також на мікробіологічну безпеку продукції. У

зв'язку з цим активно проводяться дослідження щодо зменшення енергетичних витрат, скорочення часу охолодження та підвищення якості продукції за рахунок використання новітніх способів охолодження (Guessasma, & Nouri, 2015).

У зв'язку з необхідністю удосконалення традиційних способів охолодження (природного та кондиціонованим повітрям), багато дослідників звертаються до інноваційних способів охолодження, серед яких вакуумне охолодження займає одну з провідних позицій (Peng, & Cheng, 2017). Проведені дослідження показують, що вакуумне охолодження має значні переваги серед яких: скорочення часу охолодження з декількох годин до хвилин, покращення їх структурно-механічних властивостей і зниження ризику мікробіологічного забруднення, але, на жаль, вакуумний спосіб охолодження досі не реалізований в умовах потокового виробництва (Ajani, Zhu, & Sun, 2022; Kozak, & Telychkun, 2024).

Таким чином, сучасні дослідження зосереджуються на вдосконаленні існуючих способів охолодження та пошуку нових, інноваційних технологій, таких як вакуумне охолодження (Zhu, Li, & Sun, 2020). Ця технологія має великий потенціал для значного підвищення ефективності процесу охолодження хлібобулочних виробів і може стати перспективною альтернативою традиційним способам. Зважаючи на її численні переваги, вакуумне охолодження може стати основою для створення більш енергоефективних і економічних виробничих процесів у хлібопекарській галузі (Kozak, & Telychkun, 2024).

Мета дослідження: аналіз способів охолодження хлібобулочних виробів, оцінка перспектив впровадження вакуумного способу охолодження та визначення оптимальних рішень для скорочення часу охолодження, зниження енергетичних витрат, покращення якості продукції, зменшення ризиків мікробіологічного забруднення та подовження терміну зберігання.

Матеріали і методи. Проведення комплексного аналізу наукової літератури і технічних характеристик обладнання для різних способів охолодження хлібобулочних виробів, зокрема природного (конвективного), кондиціонованого та вакуумного. Вивчення основних принципів роботи кожного з цих способів, їх ефективність і технологічні особливості. У процесі аналізу було визначено ключові переваги і недоліки кожного способу охолодження, включаючи час охолодження, та вплив на якість продукції. Також розглянуто обмеження, з якими стикаються підприємства при застосуванні цих способів, та можливі шляхи їх усунення.

Викладення основних результатів дослідження. Охолодження — це важливий етап виробництва хлібобулочних виробів, який впливає на якісні показники готової продукції та її придатність до реалізації. Охолодження проводять для запобігання утворення конденсату в упаковці, забезпечення виробу необхідних структурних властивостей, що дозволять проводити нарізання готового виробу, а також для покращення транспортабельності виробів (Gao, Wang, Dong, & Zhou, 2018). Гарячі хлібобулочні вироби чутливі до механічного впливу, рекомендована максимальна температура виробу для проведення процесів нарізання та пакування складає 30 °C (Kinner, Rüegg, Weber, Buchli, Durrer, & Müller, 2021; Kozak, & Telychkun, 2024).

Способи охолодження хлібобулочних виробів на сучасних хлібопекарських виробництвах. На практиці використовують три способи охолодження хлібобу-

лочних виробів: природний (конвективний), охолодження кондиціонованим повітрям, вакуумний (Feng, & Li, 2015; Kinner, Rüegg, Weber, Buchli, Durrer, & Müller, 2021).

Природне (конвективне) охолодження — це найдавніший і найпростіший спосіб охолодження, який полягає в поступовому зниженні температури готових виробів за рахунок контакту з навколишнім середовищем. Цей спосіб охолодження має свої переваги та недоліки (Kozak, & Telychkun, 2024).

Переваги природного способу охолодження:

- збереження смаку й аромату. При повільному охолодженні волога рівномірно розподіляється по всьому об'єму виробу, що сприяє насиченості його смаку та аромату (Kozak, & Теличкун, 2023; Ajani, Zhu, & Sun, 2023);

- м'яка скоринка. Поступове охолодження дозволяє скоринці стати більш м'якою (Kozak, Теличкун, & Теличкун, 2024);

- економія енергії. Не вимагає додаткових енерговитрат, на відміну від інших способів охолодження (Ajani, Zhu, & Sun, 2023);

- простий у виконанні. Не потребує спеціального обладнання.

Недоліки природного способу охолодження:

- тривалість процесу. Охолодження може зайняти значний час, що може бути недоцільним для великих обсягів виробництва (Клапатюк, Ковальов, & Федорів, 2014);

- ризик утворення конденсату. При високій вологості повітря на поверхні хліба може утворюватися конденсат, що може призвести до пліснявіння (Chen, Li, & Chua, 2018);

- нерівномірне охолодження. Великі хліби можуть охолоджуватися нерівномірно, що може вплинути на їхню якість (Demarchi, Irigoien, & Giner, 2018);

- ризик бактеріальної забрудненості. Тривале перебування виробів на відкритому повітрі обумовлює осідання пилу з навколишнього середовища на výroбах, як наслідок, збільшується ризик утворення плісняви, зменшується термін придатності (Kozak, & Теличкун, 2023).

Охолодження хлібобулочних виробів кондиціонованим повітрям — це один з найпоширеніших способів охолодження готових виробів на хлібопекарських підприємствах. Цей спосіб дозволяє досягти оптимальних умов для охолодження великих об'ємів продукції за відносно короткий час (Demarchi, Irigoien, & Giner, 2018).

Процес охолодження кондиціонованим повітрям передбачає створення спеціальних камер, в яких підтримується певний рівень температури та вологості. Гарячі хлібобулочні вироби розміщують на спеціальних стелажах або конвеєрах. Потім через камери пропускається кондиціоноване повітря, яке відбирає тепло від виробів і поступово знижує їхню температуру (Dostal, & Petera, 2004; Kozak, & Telychkun, 2024).

Основні параметри при охолодження хлібобулочних виробів кондиціонованим повітрям (Peng, & Cheng, 2017):

- температура повітря, зазвичай, підтримується в діапазоні 15—25 °С;

- вологість повітря залежить від типу хлібобулочного виробу і варіюється в межах 60—80%.

Переваги охолодження хлібобулочних виробів кондиціонованим повітрям:

- швидкість. Використання кондиціонованого повітря дає змогу значно швидше охолодити великі об'єми продукції в порівнянні з природним охолодженням (Peng, & Cheng, 2017).

- рівномірність. Кондиціоноване повітря забезпечує рівномірне охолодження по всій поверхні виробу (Wang, Kan, Huang, & Lu, 2020);

- контрольовані умови. Можливість точного регулювання температури і вологості робочого повітря оптимізує процес для різних типів виробів (Zhu, Li, & Sun, 2020);

- автоматизація. Процес охолодження може бути повністю автоматизованим, що знижує трудові витрати.

Недоліки охолодження хлібобулочних виробів кондиціонованим повітрям:

- потребує енерговитрат на кондиціонування повітря та роботу вентиляційних систем і обладнання (Feng, & Sun, 2014);

- ризик пересушення. При неправильно підібраних параметрах може відбуватись пересушування поверхні виробів, що негативно впливає на їхню якість (Grenier, Monteau, Le Bail, & Hayert, 2002);

- металоємність. Обладнання для охолодження хлібобулочних виробів кондиціонованим повітрям займає великі виробничі площі, як наслідок, має велику металоємність (Demarchi, Irigoien, & Giner, 2018).

Вакуумний спосіб охолодження — це інноваційний спосіб, який поступово знаходить все ширше застосування в хлібопекарській промисловості. Цей спосіб ґрунтується на зниженні тиску у вакуум-камері, де розміщуються хлібобулочні вироби. Зниження тиску сприяє інтенсивному випаровуванню вологи з продуктів, що, у свою чергу, призводить до їх швидкого і рівномірного охолодження. Завдяки цьому процес охолодження відбувається значно швидше порівняно з традиційними методами, що значно скорочує час охолодження і зберігає оптимальні органолептичні характеристики продукції (Kozak, & Telychkun, 2024).

Переваги вакуумного охолодження хлібобулочних виробів:

- швидкість. Процес охолодження відбувається в рази швидше, ніж при традиційних методах (Alibas, & Koksal, 2015);

- збереження якості. Відсутність конденсату та пилу на поверхні продуктів запобігає розмоканню скоринки, зберігається хрусткість скоринки (Cai, Tuo, Song, Zheng, Gu, & Wang, 2018);

- збереження кольору. Швидке охолодження дозволяє зберегти колір виробу;

- економія енергії. За рахунок високої ефективності процесу скорочуються витрати енергії (Demarchi, Irigoien, & Giner, 2018);

- збільшення терміну зберігання. Швидке охолодження запобігає бактеріальному забрудненню виробів, як наслідок, збільшується термін зберігання (Gao, Wang, Dong, & Zhou, 2018).

Недоліки вакуумного охолодження хлібобулочних виробів (Козак, Теличкун, Теличкун, 2024):

- більший відсоток усихання порівняно з іншими способами охолодження;

- спосіб нереалізований в умовах потокового виробництва.

Отже, вакуумний спосіб охолодження — перспективний метод, який дає змогу значно покращити якість і збільшити термін зберігання хлібобулочних виробів.

У табл. 1 зведено результати аналітичного огляду способів охолодження хлібобулочних виробів, що використовуються на сучасних хлібопекарських підприємствах.

Таблиця 1. Результати аналітичного огляду способів охолодження хлібобулочних виробів, що використовуються на сучасних хлібопекарських підприємствах

Спосіб охолодження	Переваги	Недоліки
Природне охолодження	Економічний, простий	Тривалість, нерівномірність охолодження
Охолодження кондиціонованим повітрям	Рівномірне охолодження, автоматизація	Високі енерговитрати, металоємність обладнання, ризик пересушення
Вакуумне охолодження	Швидкість, ефективність, збільшення терміну зберігання та покращення якості	Більший відсоток усихання

Отже, вакуумний спосіб охолодження — перспективний спосіб, який дає змогу значно зменшити час охолодження, збільшити термін зберігання, покращити якість хлібобулочних виробів.

Обладнання для охолодження хлібобулочних виробів на сучасних хлібопекарських виробництвах. Обладнання для охолодження хлібобулочних виробів природним (конвективним) способом. На багатьох підприємствах до цього часу охолодження хлібобулочних виробів використовуючи природний (конвективний) теплообмін з навколишнім середовищем. Використання такого способу охолодження хлібобулочних виробів не потребує великих енерговитрат, причому кінцева температура та швидкість перебігу процесу залежить від температури навколишнього середовища (Ajani, Zhu, & Sun, 2022).

Охолодження природним способом здійснюється за допомогою вагонеток і спіральних охолоджувачів (Козак, & Теличкун, 2023).

Вагонетка (рис. 1) призначена для охолодження, зберігання та транспортування готових хлібобулочних виробів на дерев'яних або пластикових лотках (Chen, Li, & Chua, 2018).

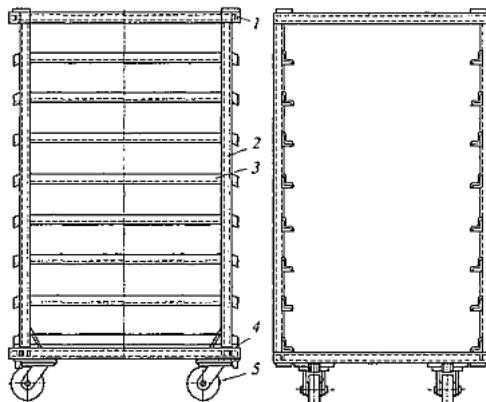


Рис. 1. Вагонетка для охолодження хлібобулочних виробів природним способом: 1 — верхня напрямна; 2 — вертикальні стійки; 3 — напрямні; 4 — нижня рама; 5 — колесо

Охолодження природним (конвективним) способом, готових продуктів хлібопекарської галузі за допомогою вагонеток має ряд недоліків (Козак, Теличкун, Теличкун, 2024):

- тривалість процесу охолодження (від 2,5 до 6 год залежить від маси готового виробу, рецептури, температури навколишнього середовища та вологості повітря у приміщенні для охолодження, та інших умов) (Alibas, & Koksal, 2014);

- займає великий відсоток загальної виробничої площі цеху для охолодження готової продукції (Cai, Tuo, Song, Zheng, Gu, & Wang, 2018);

- високий ризик бактеріальної забрудненості поверхні хліба, початок процесу черствіння через тривалий контакт із навколишнім середовищем (Demarchi, Irigoien, & Giner, 2018; Kozak, & Telychkun, 2024);

- необхідність постійного підтримання необхідної температури і вологості у приміщеннях (особливо у літній час) (McDonald, 2001);

- необхідність використання ручної праці.

Для автоматизації процесу охолодження хлібобулочних виробів на підприємствах впроваджено спіральні охолоджувачі (рис. 2).

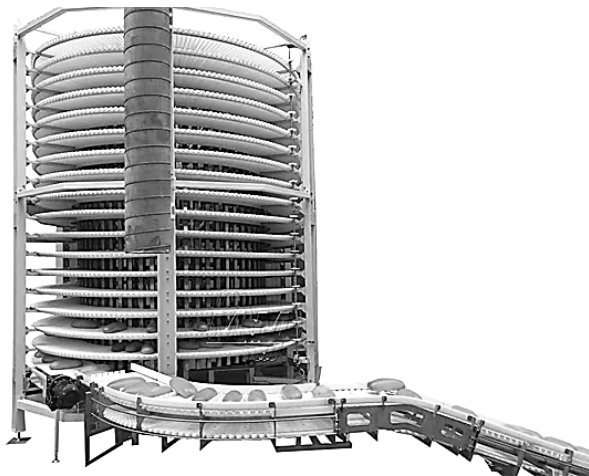


Рис. 2. Спіральний охолоджувач для охолодження хлібобулочних виробів природним способом

Використання спіральних охолоджувачів в технологічній схемі виробництва забезпечує рівномірність охолодження виробів, які подаються на нарізання та пакування, покращення санітарно-гігієнічних умов, раціональне використання виробничих площ, дає змогу автоматизувати заключні стадії виробничого процесу, підвищує культуру виробництва (Primo-Martín, Beukelaer, Hamer, & Vliet, 2008). Одним з технологічних рішень для автоматизації такого тривалого процесу є впровадження спірального конвеєра (спірального охолоджувача). Зважаючи на спіральну геометрію розташування стрічки в просторі, стає можливим накопичення великої довжини стрічки в мінімальному обсязі, що істотно економить виробничі площі (Feng, & Sun, 2014). Крім того, на стрічці спірального охолоджувача продукт транспортується максимально делікатно, без зміни свого положення відносно стрічки (Kozak, & Telychkun, 2024).

Обладнання для охолодження хлібобулочних виробів з використанням кондиціонованого повітря. На підприємствах хлібопекарської галузі для автоматизації та інтенсифікації процесу охолодження хлібобулочних виробів набуває поширення використання охолодження за допомогою кондиціонованого повітря. Використання такого способу скорочує процес охолодження (Peng, & Cheng, 2017).

Подача повітря при такому способі здійснюється за рециркуляційною схемою. Гаряче повітря відбирається у верхній зоні охолодження, після чого зволожується, охолоджується в кондиціонері і повертається в охолоджувач спочатку через зону з продуктом що має найнижчу температуру, або двома потоками в зону з гарячим виробом і в зону зниженої температури (Zhang, Zhang, Su, Zhang, Zhao, & Li, 2014).

Використання двох потоків повітря покращує інтенсивність та зменшує усихання. Оптимальні параметри повітря, що нагнітається для охолодження хліба, — температура 15—25 °С, відносна вологість 60—80% (Zhu, Li, & Sun, 2020).

Охолодження кондиціонованим повітрям здійснюється за допомогою охолоджувальних конвеєрів, колискових і спіральних кулерів.



Рис. 3. Охолоджувальний конвеєр КОХ-2 для охолодження хлібобулочних виробів з використанням кондиціонованого повітря

Використання охолоджувальних конвеєрів з встановленими на них кулерами, що нагнітають кондиціоноване повітря (рис. 3) в технологічній схемі виробництва хлібобулочних виробів дає змогу забезпечити рівномірність охолодження виробів, які подаються на нарізання та пакування, зменшити ризик порушення санітарно-гігієнічних вимог, раціонально використовувати виробничі площі, автоматизувати заключні стадії виробничого процесу, підвищити культуру виробництва (Kinner, Rüegg, Weber, Buchli, Durrer, & Müller, 2021).

Колісковий кулер (рис. 4) марки КЛ-1 призначений для охолодження протягом 55—60 хв хлібин масою 0,5 кг в кількості 2400 шт., що випікаються в тунельній печі, а також подачі охолоджених виробів на нарізання та упаковку (Guo, Song, Song, & Liu, 2018).

Робота коліскового кулера відбувається за принципом роботи вистійної шафи. Гарячі вироби вкладаються в коліски гребінчасто-гратчастого типу.

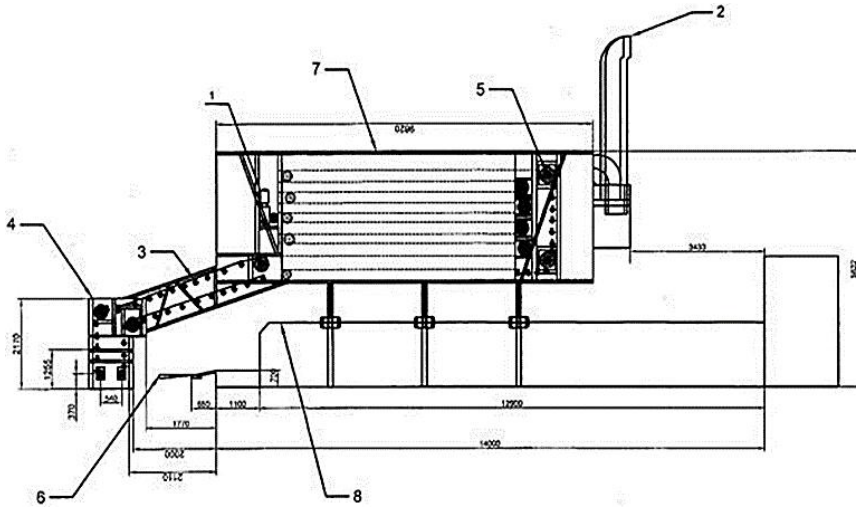


Рис. 4. Колисковий кулер для охолодження хлібобулочних виробів з використанням кондиціонованого повітря: 1 — вентилятор; 2 — витяжна труба; 3 — колиска; 4 — завантажувально-розвантажувальний транспортер; 5 — привідний вал; 6 — перевантажувальний транспортер; 7 — камера охолодження; 8 — тунельна піч; 9 — натяжний вал

Спіральний кулер для охолодження хлібобулочних виробів (рис. 5) призначається для швидкого охолодження хлібобулочних виробів, має відносно компактні розміри і високу енергоефективність (Козак, Теличкун, & Теличкун, 2024).

Спіральний кулер включає в себе подвійний спіральний конвеєр, холодильну камеру, холодильний агрегат і допоміжні транспортери. Привід конвеєра налаштовується частотним перетворювачем, що дає змогу реалізувати безступінчасту систему регулювання швидкості руху. Це впливає на точність регулювання продуктивності системи і ступінь охолодження. Система допоміжних транспортерів може складатися з декількох прямих, поворотних, підйомних або опускних конвеєрів. Їх кількість і конфігурація залежать від планування цеху та способів організації процесів виробництва (Козак, & Теличкун, 2023).

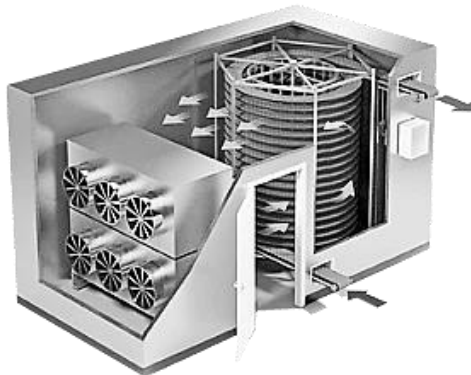


Рис. 5. Спіральний кулер для охолодження хлібобулочних виробів з використанням кондиціонованого повітря

Відносна вологість повітря в охолоджувачі повинна бути близько 60—80%. На охолодження 1 кг хліба витрачається в годину 1 кг повітря температурою 15—18 °С. Для зрошування камери в кондиціонері витрачається від 0,9—1,4 до 1,8—2,7 кг води на 1 кг повітря (Ajani, Zhu, & Sun, 2022).

Обладнання для охолодження хлібобулочних виробів вакуумним способом.

Вакуумне охолодження є інноваційним і актуальним способом охолодження харчових продуктів. При такому способі охолодження внаслідок адіабатного кипіння вологи, яка міститься в продукті, відбувається зниження температури готового продукту за рахунок зниження тиску. Основними вимогами до виробів, що охолоджуються вакуумним способом є вологість, за рахунок випаровування якої відбувається охолодження та необхідна пористість (газова проникність) (Kozak, & Telychkun, 2024).

Вакуумний охолоджувач хлібобулочних виробів є установкою, що дає змогу охолодити хліб за 3—5 хвилин. Апарат включає в себе: робочу вакуумну камеру, в якій за допомогою вакуум-насоса створюється розрідження повітря, як наслідок, відбувається охолодження продукту за рахунок адіабатного кипіння вологи (McDonald, 2001).



Рис. 6. Камера для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів Revent VC200W

Таким чином, протягом 3 хв виріб остигає з 98—100 °С до 30—35 °С. При цьому з виробу видаляються надлишки вільної вологи, що подовжує його термін придатності. Також хліб, охолоджений вакуумним способом, має рівномірну хрустку скоринку, на якій не утворюються тріщини, як у випадку з класичним охолодженням, збільшується об'єм і пористість. Крім цього, хліб, після вакуумного охолодження, можна відразу пакувати, нарізати, продавати, споживати (Zhu, Li, & Sun, 2020).

Яскравим представником існуючого обладнання для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів є вакуум-охолоджувач Revent VC200W (рис. 6).

Вакуумний спосіб охолодження хлібобулочних виробів наразі нереалізований в умовах потокового виробництва, проте існують запатентовані конструкції створені з метою вирішення проблематики впровадження вакуумного способу охолодження в потокове виробництво.

У результаті аналізу існуючих конструктивних патентних рішень виділено основні конструктивні елементи обладнання для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів в умовах потокового виробництва. Так, апарат для вакуумного охолодження свіжовипеченого хліба (Патент України на корисну модель №146333) містить (рис. 7): вакуумні камери і підключену до них вакуумну систему для видалення пари і повітря, що забезпечує необхідний рівень вакууму. Камери встановлені на роторі, що обертається, і оснащені рухомими кришками. Ротор містить пристрої для завантаження і розвантаження вакуумних камер (Теличкун, Теличкун, & Десик, 2021).

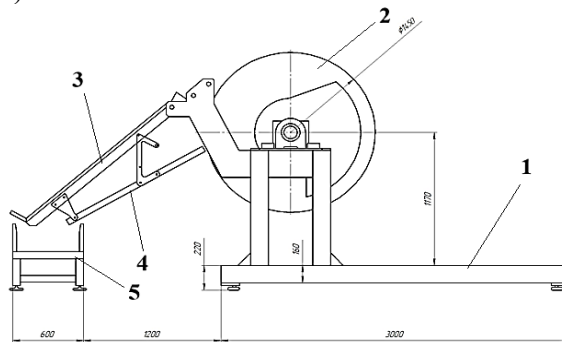


Рис. 7. Апарат для вакуумного охолодження свіжовипеченого хліба: 1 — рама; 2 — ротор, на якому закріплено вакуум-камери; 3 — завантажувальний конвеєр; 4 — вивантажувальний конвеєр; 5 — конвеєр для транспортування охолодженої продукції

Запропонована в патенті конструкція передбачає розміщення вакуум-камер на роторі. Кожна камера оснащена рухомою кришкою, а ротор забезпечений завантажувальним і розвантажувальним механізмом (Теличкун, Теличкун, & Десик, 2021). До недоліків можна віднести складну систему ущільнення.

Апарат для вакуумного охолодження хлібобулочних та кондитерських борошнених виробів з рухомим столиком (Патент України на корисну модель № 156000) містить (рис. 8): вакуумну камеру і підключену до неї систему створення розрідження для видалення пари і повітря та забезпечення необхідного рівня вакууму. Використовуються вакуумні камери роз'ємного типу, що складаються з нерухомої кришки та рухомого столу. Додатково пристрій оснащений напрямними для завантаження і розвантаження (Десик, Теличкун, Теличкун, & Козак, 2024).

Запропонована в патенті конструкція передбачає використання вакуум-камер роз'ємного типу, що складається з нерухомої кришки та рухомого столика. Такий підхід забезпечує компактність обладнання та не вимагає використання складної системи ущільнення.

Апарат для вакуумного охолодження хлібобулочних та кондитерських борошнених виробів з завантажувальним пристроєм (Патент України на корисну модель

№156905) містить (рис. 9): вакуумні камери з підключеною до них системою створення розрідження для видалення пари та повітря та забезпечення необхідного рівня вакууму. Вакуумні камери роз'ємного типу з рухомими кришками і столиком, який також виконує функцію розвантажувального механізму. Апарат додатково оснащений завантажувальним пристроєм (Десик, Теличкун, Теличкун, & Козак, 2024).

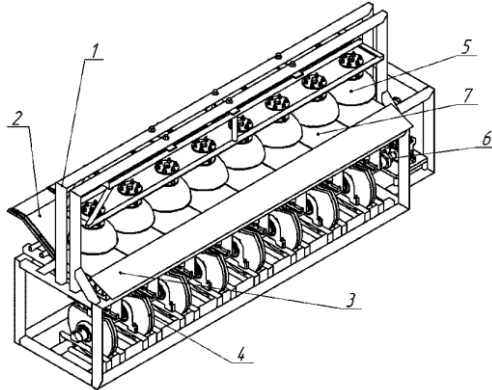


Рис. 8. Апарат для вакуумного охолодження хлібобулочних і кондитерських борошняних виробів з рухомих столиком: 1 — рама; 2 — приймальна похила з направляючими; 3 — вивантажувальна похила; 4 — кулачковий механізм; 5 — вакуум-камери; 6 — електропривод; 7 — підйомні столики

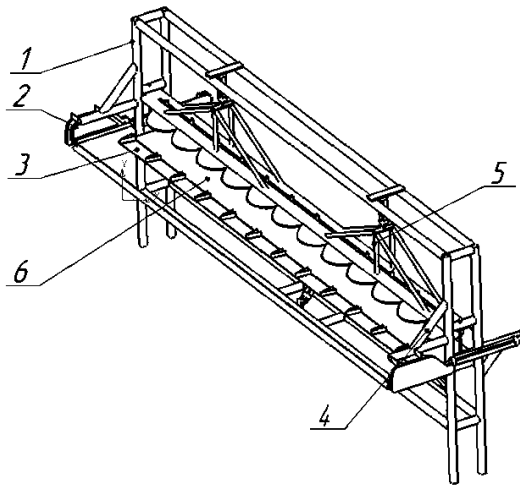


Рис. 9. Апарат для вакуумного охолодження хлібобулочних і кондитерських борошняних виробів із завантажувальним пристроєм: 1 — рама; 2 — захватний пристрій; 3 — напрямні; 4 — вакуум-камери; 5 — підйомно-опускний механізм; 6 — вивантажувальний пристрій

Запропонована в патенті конструкція передбачає використання вакуум-камери, що складається з рухомої кришки та столика, який служить розвантажувальним механізмом. Апарат додатково оснащений завантажувальним пристроєм, що

забезпечує переміщення ряду заготовок з поду печі на столик та їх позиціонування (Десик, Теличкун, Теличкун, & Козак, 2024).

На основі аналізу патентних рішень можна виділити ключові елементи конструкції обладнання для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів в умовах потокового виробництва:

- вакуумна камера, яка може бути виконана у вигляді роз'ємної конструкції з рухомою кришкою та нерухомим столиком для вакуумування;
- завантажувальний пристрій, призначений для автоматичного переміщення свіжоспечених продуктів з печі на стіл вакуумування. Може включати напрямні та механізми для точного позиціонування продуктів;
- розвантажувальний механізм, який може бути об'єднаний зі столиком вакуумування, бути виконаний як окремий елемент або поєднаний із завантажувальним механізмом.



Рис. 10. Схема розміщення ключових конструктивних елементів апарата для вакуумного охолодження хліба в умовах потокового виробництва

На основі отриманих у процесі наукової роботи розрахунково-дослідних даних (Козак, & Теличкун, 2023; Козак, Теличкун, & Теличкун, 2024; Kozak, & Telych- kун, 2024), опираючись на існуючі патентні рішення з впровадження вакуумного способу охолодження в потокове виробництво (Десик, Теличкун, Теличкун, & Ко- зак, 2024; Десик, Теличкун, Теличкун, & Козак, 2024; Теличкун, Теличкун, & Де- сик, 2021), розроблено схему розміщення ключових конструктивних елементів апарата для вакуумного охолодження хліба в умовах потокового виробництва (рис. 10) який працює таким чином: щойно випечений виріб з поду печі потрапляє на гірку з направляючими та крокоміром, після чого він потрапляє до накопичу- вального конвеєра з крокомірами, після накопичені вироби в кількості 4 шт. (1 порція) за допомогою захватного механізму переміщається на столик для ваку- умування, порція батонів накривається вакуум- камерою та охолоджуються, після за рахунок завантаження наступної порції до вакуумного столика охолоджені ба- тони зіштовхуються до розвантажувальних конвеєрів з направляючими, які тран- спортують вже охолоджені вироби на подальші операції — нарізання та пакування.

Висновки

1. Вакуумне охолодження є найбільш ефективним способом для забезпечення швидкого охолодження, збереження якості продукції та збільшення терміну її збе- рігання.

2. Природне охолодження економічно вигідне, але неефективне для великих виробництв через тривалість процесу та ризик утворення конденсату.

3. Охолодження кондиціонованим повітрям забезпечує рівномірне охолодження, але потребує значних енергетичних витрат.

4. На основі аналізу патентних рішень визначено основні конструктивні елементи, які необхідні для створення апарата для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів в умовах потокового виробництва.

5. Розроблено схему розміщення конструктивних елементів апарата для вакуумного охолодження хлібобулочних виробів в умовах потокового виробництва.

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>.

Козак, О. С., Теличкун, Ю. С., Теличкун, В. І. (2024). Визначення реологічних характеристик м'якушки батона для розрахунку параметрів процесу вакуумного охолодження. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*, 30(4), 99—108. Взято з: https://drive.google.com/file/d/18hoS0JEJXuABWHIdoQRA9ILDalBVrR4x/view?usp=drive_link.

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. 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>.

Alibas, I., & Koksals, N. (2014). Forced-air, vacuum, and hydro precooling of cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. botrytis cv. Freemont): part I. Determination of precooling parameters. *Food Science and Technology*, 34, 730—737. Взято з: <https://doi.org/10.1590/1678-457X.6456>.

Alibas, I., & Koksals, N. (2015). Forced-air, vacuum, and hydro precooling of cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. botrytis cv. Freemont): Part II. Determination of quality parameters during storage. *Food Science and Technology* (Campinas), 35(1), 45—50. Взято з: <https://doi.org/10.1590/1678-457X.6456>.

Bahrani, S. A., Monteau, J. Y., Rezzoug, S. A., Loisel, C., & Maache-Rezzoug, Z. (2014). Physics-based modeling of simultaneous heat and mass transfer intensification during vacuum steaming processes of starchy material. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 85, 216—226. Взято з: <https://doi.org/10.1016/j.ccep.2014.09.005>.

Bellara, S. R., McFarlane, C. M., Thomas, C. R., & Fryer, P. J. (2000). The growth of *Escherichia coli* in a food simulant during conduction cooling: combining engineering and microbiological modeling. *Chemical engineering science*, 55(24), 6085—6095. Взято з: [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(00\)00178-0](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(00)00178-0).

Besbes, E., Jury, V., Monteau, J. Y., & Le Bail, A. (2013). Characterizing the cellular structure of bread crumb and crust as affected by heating rate using X-ray microtomography. *Journal of Food Engineering*, 115(3), 415—423. Взято з: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.10.005>.

Besbes, E., Jury, V., Monteau, J. Y., & Le Bail, A. (2013). Water vapor transport properties during staling of bread crumb and crust as affected by heating rate. *Food Research International*, 50(1), 10—19. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.09.041>.

Bosmans, G. M., Lagrain, B., Fierens, E., & Delcour, J. A. (2013). The impact of baking time and bread storage temperature on bread crumb properties. *Food chemistry*, 141(4), 3301—3308. Взято з: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.06.031>.

- Cai, B., Tuo, X., Song, Z., Zheng, Y., Gu, H., & Wang, H. (2018). Modeling of spray flash evaporation based on droplet analysis. *Applied Thermal Engineering*, 130, 1044—1051. Взято з: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.083>.
- Chaunier, L., Chrusciel, L., Delisée, C. et al. (2008). Permeability and Expanded Structure of Baked Products Crumbs. *Food Biophysics*, 3, 344—351. Взято з: <https://doi.org/10.1007/s11483-008-9073-8>.
- Chen, Q. K. J. M., Li, Y., & Chua, K. J. (2018). Experimental and mathematical study of the spray flash evaporation phenomena. *Applied Thermal Engineering*, 130, 598—610. Взято з: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.018>.
- Davidou, S., Le Meste, M., Debever, E., & Bekaert, D. J. F. H. (1996). A contribution to the study of staling of white bread: effect of water and hydrocolloid. *Food hydrocolloids*, 10(4), 375—383. Взято з: [https://doi.org/10.1016/S0268-005X\(96\)80016-6](https://doi.org/10.1016/S0268-005X(96)80016-6).
- De Elvira, C., Sanz, P. D., & Carrasco, J. A. (1996). Characterising the detachment of thermal and geometric centres in a parallelepipedic frozen food subjected to a fluctuation in storage temperature. *Journal of food engineering*, 29(3—4), 257—268. Взято з: [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(96\)00001-5](https://doi.org/10.1016/0260-8774(96)00001-5).
- Demarchi, S. M., Irigoyen, R. M. T., & Giner, S. A. (2018). Vacuum drying of rosehip leathers: Modelling of coupled moisture content and temperature curves as a function of time with simultaneous time-varying ascorbic acid retention. *Journal of Food Engineering*, 233, 9—16. Взято з: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.03.027>.
- Desmond, E. M., Kenny, T. A., Ward, P., & Sun, D. W. (2000). Effect of rapid and conventional cooling methods on the quality of cooked ham joints. *Meat Sci.*, 56(3), 27. Взято з: [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(00\)00052-8](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(00)00052-8).
- Dostal, M., & Petera, K. (2004). Vacuum cooling of liquids: mathematical model. *Journal of food engineering*, 61(4), 533—539. Взято з: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00223-1](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00223-1).
- Erdođdu, F., Balaban, M. O., & Chau, K. V. (1998). Modeling of heat conduction in elliptical cross section: I. Development and testing of the model. *Journal of food engineering*, 38(2), 223—239. Взято з: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(98\)00100-9](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(98)00100-9).
- Everington, D. (2003). Vacuum technology for food processing. *Food Technology International Europe*, 5, 71—74.
- Falcone, P. M., Baiano, A., Zanini, F., Mancini, L., Tromba, G., Dreossi, D. M. A. D., & Nobile, M. A. D. (2005). Three-dimensional quantitative analysis of bread crumb by X-ray microtomography. *Journal of Food Science*, 70(4), E265—E272. Взято з: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.tb07182.x>
- Feng, C. H., & Li, C. (2015). Immersion vacuum-cooling as a novel technique for cooling meat products: research advances and current state-of-the art. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 14(6), 785—795. Взято з: https://login.research4life.org/tacsgr1doi_org/10.1111/1541-4337.12157.
- Feng, C. H., & Sun, D. W. (2014). Optimisation of immersion vacuum cooling operation and quality of Irish cooked sausages by using response surface methodology. *International Journal of Food Science and Technology*, 49(8), 1850—1858. Взято з: <https://doi.org/10.1111/ijfs.12494>.
- Feng, C. H., Drummond, L., Zhang, Z. H., & Sun, D. W. (2013). Effects of processing parameters on immersion vacuum cooling time and physico-chemical properties of pork hams. *Meat Science*, 95(2), 425—432. Взято з: <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.04.057>.
- 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>.
- Gowda, B. S., Narasimham, G. S. V. L., & Murthy, M. K. (1997). Forced-air precooling of spherical foods in bulk: a parametric study. *International journal of heat and fluid flow*, 18(6), 613—624. Взято з: [https://doi.org/10.1016/S0142-727X\(97\)00028-3](https://doi.org/10.1016/S0142-727X(97)00028-3).
- Grenier, A., Monteau, J.-Y., Le Bail, A., Hayert, M. (2002). Effect of external conditions on the rate of post-baking chilling of bread. *J. Food Eng.*, 55, 19—24. Взято з: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00224-2](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00224-2).

Guessasma, S., & Nouri, H. (2015). Compression behaviour of bread crumb up to densification investigated using X-ray tomography and finite element computation. *Food Research International*, 72, 140—148. Взято з: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.03.038>.

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>.

Kozak, O., & Telychkun, V. (2024). Mathematical model of vacuum cooling process for wheat bread. *Ukrainian Food Journal*, 13(4), 780—793. Взято з: <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2024-13-4-11>.

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-Martín, 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*, 6, 1—8. 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.

УДК 66.047.596:533.6

STUDY OF THE AERODYNAMICS OF THE DRYING AGENT IN THE FLUIDIZED BOTTOM OF A SPRAY DRYER

A. Sliusenko, S. Lementar, V. Ponomarenko

National University of Food Technologies

Key words:

*Aerodynamics
Drying agent
Fluidized bottom
Spray dryer
CFD modeling*

Article history:

Received 09.07.2025
Received in revised form
30.07.2025
Accepted 14.08.2025

Corresponding author:

A. Sliusenko

E-mail:

andriy_slyusenko@ukr.net

Citation: Слюсенко А. М., Лемента́р С. Ю., Понома́ренко В. В. (2025). Дослідження аеродинаміки сушильного агента у флюїдному дніщі розпилювальної сушарки. *Наукові праці НУХТ*, 31(4), 136—148. DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-4-11

ABSTRACT

Spray drying is one of the most effective and widely used technologies for drying liquid materials in various industries. For the further drying of wet dispersed particles of the material, sectioning of spray dryer is used. One such case is the integration of the fluidized bottom design into the dryer — a section for further drying in a fluidized bottom. To achieve high-quality further drying, the fluidized bottom must ensure uniform contact between the material and the drying agent. This requires a detailed analysis of the aerodynamics of the flows in it.

The study of aerodynamic parameters, such as the speed and distribution of the drying agent in the fluidized bottom, allowed to determine the conditions under which effective further drying of wet particles of the material was ensured. In particular, an important characteristic was the interaction between the particles and the flow of the drying agent, which directly affected the uniformity of drying.

The purpose of the research was to study the aerodynamic parameters of the drying agent in the fluidized bottom of a spray dryer. The main focus was on determining the influence of the fluidized bottom design on the uniformity of the drying agent distribution in it.

To achieve this goal, CFD modeling was used in the ANSYS CFX program. The aerodynamics of the drying agent in the fluidized bottom of a typical design with a distribution grid and a modernized design with a distribution grid and conical inserts were studied. The obtained CFD modeling results allowed to find that the drying agent velocity above the distribution grid of the fluidized bottom of a typical design was uneven - this led to uneven drying of wet material particles.

To eliminate this drawback, it was proposed to integrate a distribution device in the form of conical inserts into the fluidized bottom. Based on the results of CFD modeling, a rational ratio of the sizes of these inserts was determined, which allowed improving the drying process.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-4-11

ДОСЛІДЖЕННЯ АЕРОДИНАМІКИ СУШИЛЬНОГО АГЕНТА У ФЛЮЇДНОМУ ДНИЩІ РОЗПИЛЮВАЛЬНОЇ СУШАРКИ

А. М. Слюсенко, С. Ю. Лементар, В. В. Пономаренко

Національний університет харчових технологій

Розпилювальне сушіння є однією з найбільш ефективних і широко використовуваних технологій для сушіння рідких матеріалів у різних галузях промисловості. Для досушування вологих дисперсних частинок матеріалу застосовується секціонування розпилювальних сушарок. Одним із таких випадків є інтеграція в конструкцію сушарки флюїдного днища — секції досушування в киплячому шарі. Для досягнення якісного досушування флюїдне днище повинно забезпечувати рівномірний контакт між матеріалом і сушильним агентом. Саме для цього потрібен детальний аналіз аеродинаміки потоків у ньому.

Дослідження аеродинамічних параметрів, таких як швидкість і розподілення сушильного агента у флюїдному днищі, дає змогу визначити умови, за яких забезпечується ефективно досушування вологих частинок матеріалу. Зокрема, важливою характеристикою є взаємодія між частинками та потоком сушильного агента, що безпосередньо впливає на рівномірність сушіння.

Метою пропонованого дослідження є вивчення аеродинамічних параметрів сушильного агента у флюїдному днищі розпилювальної сушарки. Основна увага спрямована на визначення впливу конструкції флюїдного днища на рівномірність розподілення сушильного агента в ньому.

Для досягнення поставленої мети використано CFD-моделювання в програмі ANSYS CFX. Досліджено аеродинаміку сушильного агента у флюїдному днищі типової конструкції з розподільчою решіткою та модернізованої конструкції з розподільчою решіткою і конічними вставками. Отримані результати CFD-моделювання дали змогу встановити, що над розподільчою решіткою флюїдного днища типової конструкції швидкість сушильного агента нерівномірна, що призводить до нерівномірного досушування частинок вологого матеріалу.

Для усунення цього недоліку запропоновано інтегрувати у флюїдне днище розподільчий пристрій у вигляді конічних вставок. На основі результатів CFD-моделювання визначено раціональне співвідношення розмірів цих вставок, що покращує процес досушування.

Ключові слова: аеродинаміка, сушильний агент, флюїдне днище, розпилювальна сушарка, CFD-моделювання.

Постановка проблеми. Сушіння є одним із найбільш застосовуваних процесів у багатьох галузях промисловості, зокрема в харчовій, хімічній, фармацевтичній тощо. Одним із найбільш поширених методів його здійснення є сушіння в розпилювальних сушарках (Ткаченко, & Дубковецький, 2004; Huang, Kumar, & Mujumdar, 2006), в яких процес видалення вологи з рідкого матеріалу (продукту) здійснюється при його розпиленні в сушильному агенті (гарячому повітрі). При такому

способі сушіння досягається значна поверхня масопередачі, чим пояснюється висока інтенсивність сушіння за незначний час контакту та забезпечується максимальне збереження корисних речовин вихідного продукту (Турчина, Малецька, Жукотський, & Ткаченко, 2020; Погожих, Потапов, Пак, & Жеребкін, 2016).

У відомих конструкціях розпилювальних сушарок, наприклад сушарки Niro FSD та A1-OP2Ч, для досушування вологих дисперсних частинок матеріалу є секція досушування в киплячому шарі, так зване флюїдне днище (Сидоров, 2012). Воно являє собою секцію з конічної та циліндричної частин, всередині якої розміщена решітка з отворами для розподілення сушильного агента, що подається під неї. При проходженні потоку гарячого повітря через отвори розподільчої решітки відбувається досушування вологого матеріалу, який опускається на неї. Висушені частинки в подальшому відводяться із нього та подаються на наступну технологічну операцію.

Особливе значення для ефективності процесу досушування у флюїдному днищі має його конструкція, оскільки вона впливає на тепломасообмін між сушильним агентом і матеріалом, що піддається сушінню.

Аеродинамічні параметри потоків (швидкість, турбулентність, напрямок руху тощо) у флюїдному днищі розпилювальних сушарок вимагають ретельного вивчення, оскільки потік сушильного агента безпосередньо впливає на швидкість та рівномірність сушіння (Langrish, 2007; Gabites, Abrahamson, & Winchester, 2010). Вивчення аеродинамічних параметрів дозволяє виявити раціональні умови для забезпечення рівномірного розподілення потоку гарячого повітря під і над розподільчою решіткою та найбільш ефективного досушування матеріалу. Тут важливо розуміти, як конструкція флюїдного днища впливає на процес досушування вологих частинок.

Важливим також є питання збереження якості кінцевого продукту, оскільки нерівномірне сушіння може призвести до утворення дефектів у структурі висушених частинок, таких як тріщини, нерівномірне розподілення вологи або навіть втрата корисних властивостей продукту (Белінська, & Фалендиш, 2020; Снежнік, & Петрова, 2010). При забезпеченні стабільного температурного режиму та рівномірного контакту вологих частинок із сушильним агентом над розподільчою решіткою флюїдного днища можна мінімізувати зазначені недоліки, тому дослідження аеродинаміки сушильного агента є важливим етапом у процесі удосконалення сушарок і технології сушіння.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Процес сушіння в розпилювальних сушарках є багатограним і складним з точки зору фізичних явищ, що при цьому відбуваються, зокрема аеродинамічних і термодинамічних процесів (Santos et al., 2018). Вивчення аеродинаміки сушильного агента в таких сушарках було предметом численних наукових досліджень.

Для дослідження та покращення аеродинамічних параметрів сушильного агента в розпилювальних сушарках широко застосовуються підходи обчислювальної гідрогазодинаміки (Computational Fluid Dynamics — CFD). За допомогою CFD-моделювання можна прогнозувати поведінку потоку сушильного агента та його

взаємодію з розпилюваним матеріалом, що дає змогу визначити оптимальні геометричні розміри сушарки й технологічні параметри процесу сушіння (Lo, 2005; Fletcher et al., 2006).

Згідно з дослідженнями (Марчевський, & Гробовенко, 2018), аеродинамічні параметри потоку сушильного агента відіграють ключову роль у визначенні швидкості та рівномірності сушіння. Такі параметри потоку гарячого повітря, як швидкість і температура, найбільш впливають на ефективність перенесення тепла від сушильного агента до матеріалу, що піддається сушінню (Тарасенко та ін., 2015). В праці (Anis, Muttashillatul, Kusumastuti, & Widyo, 2022) показано, що за рахунок оптимізації швидкості потоку гарячого повітря можна значно покращити розподілення тепла, зменшуючи втрати енергії та підвищуючи ефективність сушіння. Дослідження (Zhang, Huang, Wang, & Mujumdar, 2010) показали, що температура сушильного агента значно впливає на залишкову вологість і вміст білка у висушеному продукті. Дослідження (Shiravi, Mujumdar, & Kubes, 1995) доводять, що високий рівень турбулентності сприяє інтенсифікації процесу теплоперенесення, зокрема через підвищення інтенсивності енергообміну між сушильним агентом і дисперсними частинками матеріалу, однак надмірна турбулентність може призвести до нерівномірного сушіння й утворення дефектів у структурі висушених частинок. Встановлено (Lementar, Ponomarenko, Lulka, & Dubivko, 2015), що додатковий контур підведення сушильного агента забезпечує зниження надлишкової турбулентності потоків, що призводить до підвищення якості продукту та запобігає його прилипанню до стінок сушарки.

Проводилися дослідження щодо визначення якості кінцевого продукту (сухого молока), отриманого в сушарках з флюїдним днищем. У праці (Власенко, Власенко, & Новгородська, 2012) зазначається, що використання сушарки з флюїдним днищем покращує мікробіологічні показники сухого молока. В дослідженні (Власенко, 2013) встановлено, що за кольором, смаком, запахом, консистенцією та фізико-хімічними показниками зразки, отримані в сушарках з флюїдним днищем, відповідають вимогам міжнародних стандартів, що підвищує рівень рентабельності виробництва до 31% (порівняно із сушарками без такої секції досушування вологих частинок).

Аналіз літератури підтверджує важливість дослідження аеродинаміки сушильного агента у флюїдному днищі розпилювальних сушарок для підвищення ефективності процесу сушіння.

Метою дослідження є визначення взаємозв'язку між конструктивним виконанням флюїдного днища розпилювальної сушарки та аеродинамікою сушильного агента в ньому.

Матеріали і методи. Для дослідження аеродинамічних параметрів сушильного агента у флюїдному днищі використано CFD-моделювання в програмному забезпеченні ANSYS CFX. При моделюванні розглядається флюїдне днище промислової розпилювальної сушарки A1-OP2Ч.

Для проведення CFD-моделювання створено 3D-моделі флюїдного днища різної конструкції (рис. 1), які формують розрахункові області для дослідження:

- типова конструкція з решіткою (рис. 1, а);
- модернізована конструкція з решіткою та конічними вставками (рис. 1, б).

Моделювалась аеродинаміка сушильного агента у флюїдному днищі модернізованої конструкції з розподільчим пристроєм у вигляді конічних вставок, який призначений для розділення та перенаправлення частини потоку сушильного агента із середини флюїдного днища до його стінок.

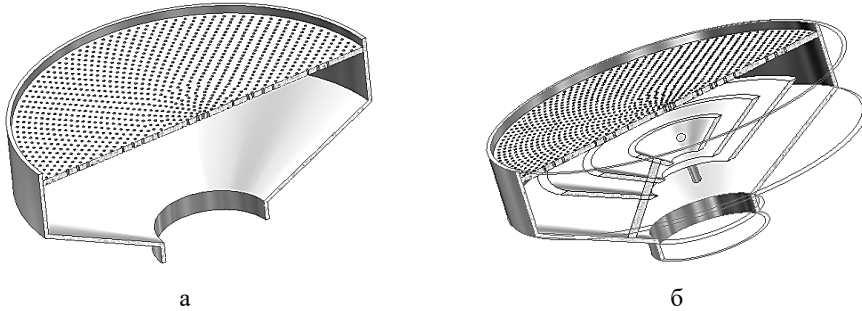


Рис. 1. 3D-моделі флюїдного днища: а — типова конструкція з решіткою; б — модернізована конструкція з решіткою та конічними вставками

Варіювалося співвідношення між розмірами конічних вставок (діаметр при основі та вершині вставки) відносно внутрішнього діаметра корпусу флюїдного днища та патрубку підведення сушильного агента (рис. 2):

- більша вставка: $D_o^b = 0,5 \dots 0,75 D_k, D_e^b = 0,5 \dots 0,75 D_n$;
- середня вставка: $D_o^c = 0,25 \dots 0,5 D_k, D_e^c = 0,25 \dots 0,5 D_n$;
- менша вставка: $D_o^m = 0,1 \dots 0,25 D_k, D_e^m = 0,1 \dots 0,25 D_n$.

Позначення:

D_o^b, D_o^c, D_o^m — діаметр конічної вставки при основі, відповідно, більшої, середньої та меншої;

D_e^b, D_e^c, D_e^m — діаметр конічної вставки при вершині, відповідно, більшої, середньої та меншої;

D_k — внутрішній діаметр корпусу флюїдного днища (1280 мм);

D_n — внутрішній діаметр патрубку підведення сушильного агента (400 мм).

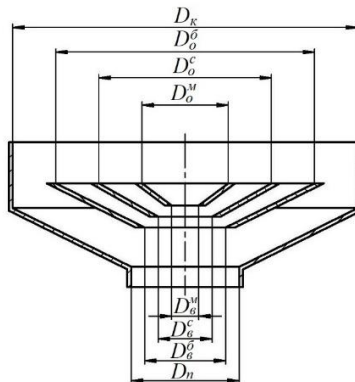


Рис. 2. Схематичне зображення конструкції модернізованого флюїдного днища

Розрахункова область для CFD-моделювання, в якій здійснюється рух сушильного агента, була згенерована за допомогою ANSYS CFX. На рис. 3 показано один із варіантів моделі такої області для ілюстрації. Умови моделювання описано для одного з випадків, однак для всіх інших варіантів конструкції флюїдного днища ці налаштування залишаються однаковими.

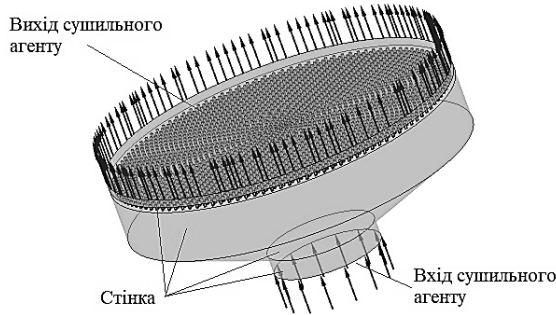


Рис. 3. Розрахункова область і поверхні, до яких прикладаються граничні умови

Для CFD-моделювання була створена сітка з використанням структурованих і неструктурованих елементів. В отворах розподільчої решітки та поблизу них застосована більш дрібна сітка для підвищення точності результатів. Загальна кількість комірок у розрахункових областях всіх моделей була в діапазоні 417...420 тис., що входить в межі академічної версії програми ANSYS.

У цьому дослідженні розглядається лише аеродинаміка сушильного агента (модельне середовище — повітря), тобто однофазна система. CFD-моделювання процесу досушування з урахуванням вологих дисперсних частинок матеріалу, теплообмінних процесів між ними та сушильним агентом є наступним етапом наукового дослідження.

Для проведення CFD-моделювання аеродинаміки сушильного агента використано тип аналізу Steady State. Для урахування турбулентності, спираючись на результати праці (Langrish, 2009), обрано $k-\varepsilon$ модель.

Визначено поверхні, до яких прикладаються граничні умови: вхід сушильного агента, вихід сушильного агента, стінка (рис. 3). Для граничної умови «Вхід сушильного агента» встановлено масову витрату повітря 0,4 кг/с, що відповідає експлуатаційним параметрам сушарки А1-ОР2Ч із продуктивністю 600 кг/год за випареною вологою. Для граничної умови «Вихід сушильного агента» задано нульовий тиск виходу (відсутність протитиску). Усі інші поверхні, що відповідають граничній умові «Стінка», мають параметр Smooth Wall. Критерій збіжності розрахунків становить 0,0001, а загальна кількість ітерацій — 1000.

Викладення основних результатів дослідження. На рис. 4 представлено розподілення швидкості сушильного агента у флюїдному днищі типової конструкції. Ця візуалізація дає змогу дослідити аеродинаміку сушильного агента та попередньо оцінити ефективність досушування вологих дисперсних частинок у ньому.

Аналіз наведених результатів дав змогу визначити, що швидкість сушильного агента при вході в флюїдне днище становить близько 2,5 м/с.

При наближенні до розподільчої решітки центральна частина потоку сушильного агента за рахунок опору зі сторони решітки гальмується до приблизно 1 м/с, потік сушильного агента розходиться до країв решітки. При цьому його швидкість під решіткою суттєво відрізняється: біля її центру вона становить близько 1 м/с, зростає до 2...2,5 м/с при віддаленні від центральної частини і при наближенні до стінки корпусу флюїдного днища знижується до 0,5 м/с.

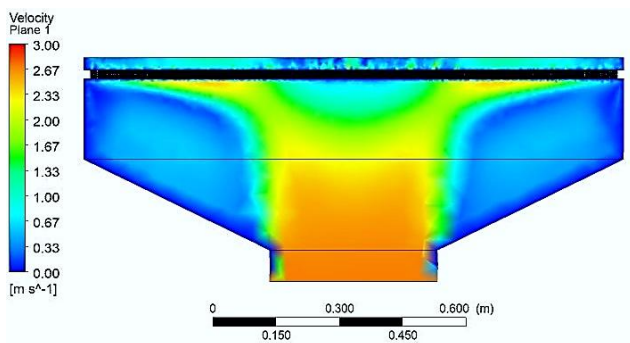


Рис. 4. Розподілення швидкості сушильного агента у флюїдному днищі типової конструкції

На рис. 5 представлено розподілення швидкості сушильного агента над розподільчою решіткою флюїдного днища типової конструкції.

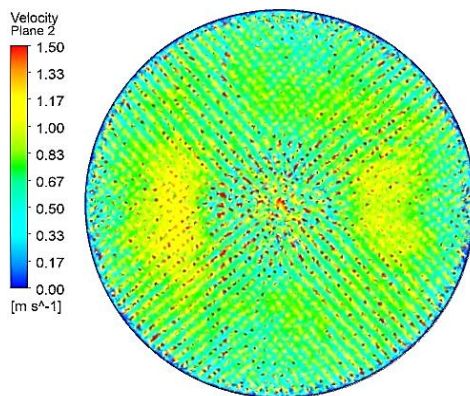


Рис. 5. Розподілення швидкості сушильного агента над розподільчою решіткою флюїдного днища типової конструкції

На основі результатів CFD-моделювання (рис. 5) встановлено, що швидкість сушильного агента над решіткою нерівномірна — добре помітно кільцеву область, де основна частина сушильного агента рухається зі швидкістю 0,9...1,1 м/с. В областях всередині «кільця» та поза ним сушильний агент має швидкість 0,4...0,7 м/с. Максимальне значення його швидкості над решіткою (1,4 м/с) знаходиться в межах раціонального діапазону (1...1,5 м/с), при якому не відбувається витіснення (повернення) частинок назад у сушильну башту.

На рис. 6 зображено лінії напрямку руху потоку сушильного агента, які наочно ілюструють його аеродинаміку під решіткою: потік сушильного агента, що надходить через вхідний патрубок, зіткнувшись із решіткою, розсіюється і рухається до стінок флюїдного днища.

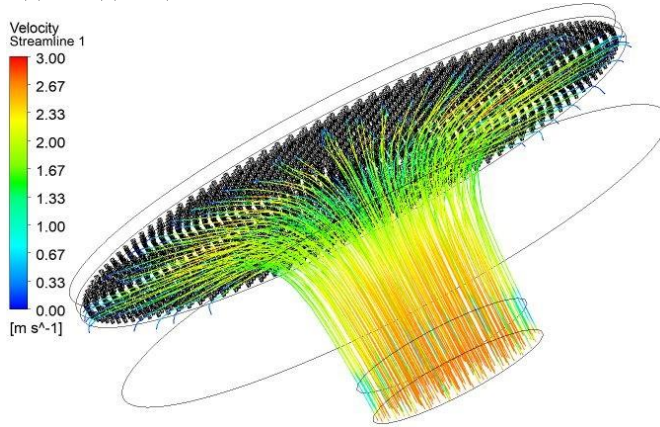


Рис. 6. Лінії напрямку руху потоку сушильного агента під розподільчою решіткою флюїдного днища типової конструкції

Таким чином, проведене CFD-модельовання аеродинаміки сушильного агента у флюїдному днищі типової конструкції показує його недостатню ефективність. Вона проявляється в тому, що за рахунок різної швидкості сушильного агента над розподільчою решіткою вологі частинки матеріалу, які опускаються на неї, будуть досушуватися нерівномірно.

З метою усунення цього недоліку пропонується інтегрувати у флюїдне днище розподільчий пристрій у вигляді концентрично розташованих конічних вставок, які розділяють потік сушильного агента, формуючи кільцеві канали для його проходження під решітку.

Розміщення цих вставок ґрунтується на принципах гідродинаміки та опору потоку в каналах складної форми. Так, характер потоку сушильного агента (ламінарний чи турбулентний) визначається числом Рейнольдса:

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\mu}, \quad (1)$$

де: ρ — густина сушильного агента, v — середня швидкість потоку, D_h — гідравлічний діаметр каналу, μ — динамічна в'язкість сушильного агента.

Залежності від числа Рейнольдса опір потоку описується різними законами. При ламінарному режимі втрати тиску пропорційні швидкості потоку, а при турбулентному — приблизно пропорційні квадрату швидкості (White, 2011).

Гідравлічний опір (ζ) каналу визначає втрати тиску (ΔP) при заданій витраті (Q) або середній швидкості (v):

$$\Delta P = \zeta \frac{\rho v^2}{2} \quad \text{або} \quad \Delta P = \zeta \frac{\rho}{2} \left(\frac{Q}{A} \right)^2, \quad (2)$$

де A — площа поперечного перерізу каналу.

Для кільцевого каналу коефіцієнт гідравлічного опору залежить від числа Рейнольдса та відносної шорсткості стінок. При ламінарному режимі коефіцієнт гідравлічного опору можна аналітично визначити, враховуючи в'язкі сили. При турбулентному режимі для визначення ζ використовуються емпіричні формули (наприклад, рівняння Кольбрука-Вайт або діаграма Муді), які враховують як в'язкість, так і інерційні сили та шорсткість.

Різниця діаметрів основи та вершини вставки визначає зміну ширини кільцевого каналу по висоті. Якщо різниця велика, ширина каналу істотно змінюється, що впливає на локальну швидкість потоку та гідравлічний опір на різних ділянках.

Здійснено CFD-моделювання аеродинаміки сушильного агента у флюїдному днищі з конічними вставками різних розмірів (для прикладу в статті наводяться результати досліджень при двох співвідношеннях розмірів вставок). На рис. 7—9 представлені результати CFD-моделювання з таким співвідношенням розмірів конічних вставок (конструкція № 1):

- більша вставка $D_o^{\delta} = 0,75D_k$; $D_e^{\delta} = 0,75D_n$;
- середня вставка $D_o^{\epsilon} = 0,5D_k$; $D_e^{\epsilon} = 0,5D_n$;
- менша вставка $D_o^{\mu} = 0,25D_k$; $D_e^{\mu} = 0,25D_n$.

На рис. 7 показано розподілення швидкості сушильного агента у флюїдному днищі модернізованої конструкції (конструкція № 1).

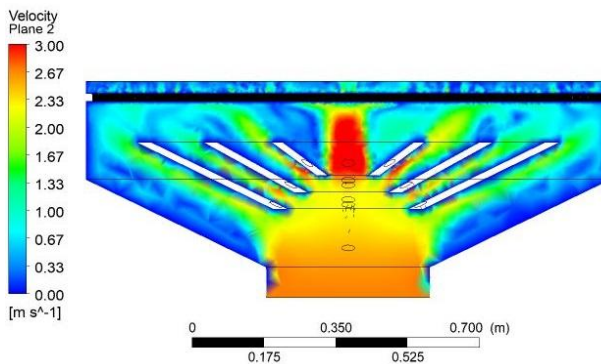


Рис. 7. Розподілення швидкості сушильного агента у флюїдному днищі модернізованої конструкції (конструкція № 1)

Аналіз отриманих даних (рис. 7) засвідчує, що інтеграція у флюїдне днище конічних вставок позитивно вплинула на розподілення швидкості сушильного агента під решіткою — швидкість повітря більш рівномірна. Однак, як видно з рис. 7, при виході сушильного агента з конічних вставок досягається його турбулізація, про що свідчить наявність відривних зон і значних перепадів швидкості.

Аналіз розподілення швидкості сушильного агента над розподільчою решіткою (рис. 8) також підтверджує доцільність інтеграції конічних вставок у флюїдне днище. Розподілення швидкості сушильного агента є більш рівномірним, однак у центрі розподільчої решітки є незначна область з підвищеною швидкістю (2 м/с).

Аналіз ліній напрямку руху потоку сушильного агента, які представлені на рис. 9, засвідчує покращення розподілення повітря у флюїдному днищі конструкції.

На рис. 10—11 представлені результати CFD-моделювання при раціональному співвідношенні розмірів конічних вставок (конструкція № 2):

- більша вставка: $D_o^{\beta} = 0,65D_k$; $D_{\beta}^{\beta} = 0,75D_n$;
- середня вставка: $D_o^{\epsilon} = 0,4D_k$; $D_{\epsilon}^{\epsilon} = 0,5D_n$;
- менша вставка: $D_o^m = 0,15D_k$; $D_m^m = 0,25D_n$.

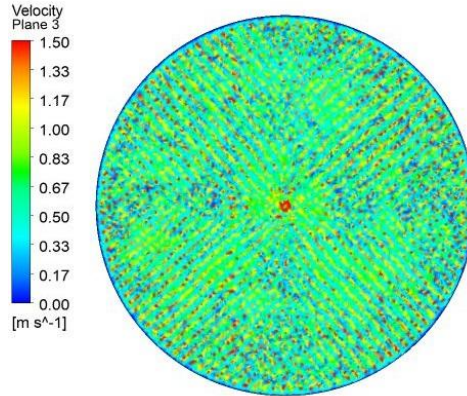


Рис. 8. Розподілення швидкості сушильного агента над розподільчою решіткою флюїдного днища модернізованої конструкції (конструкція № 1)

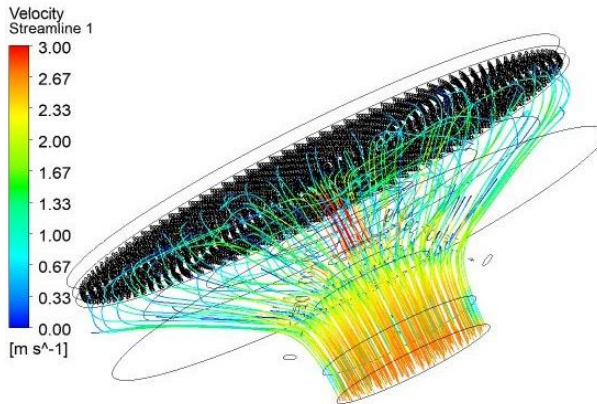


Рис. 9. Лінії напрямку руху потоку сушильного агента під розподільчою решіткою флюїдного днища модернізованої конструкції (конструкція №1)

На рис. 10 представлено розподілення швидкості сушильного агента у флюїдному днищі з вищезазначеними розмірами конічних вставок. Аналіз і порівняння результатів (порівняно з результатами, які наведені для конструкції № 1) дозволили встановити, що при такому співвідношенні розмірів конічних вставок досягається зниження турбулентності потоку (зменшення вихорів) і покращення розподілення сушильного агента під розподільчою решіткою.

Аналіз розподілення швидкості сушильного агента над розподільчою решіткою (рис. 11) показує, що в центрі решітки за рахунок зміни розмірів конічних вставок відбулося зниження його максимальної швидкості до 1,4 м/с.

Таким чином, CFD-моделювання, здійснене в межах цього дослідження, виявилось ефективним інструментом для візуалізації аеродинаміки сушильного агента та визначення раціонального співвідношення розмірів конічних вставок розподільчого пристрою. Такий пристрій за функціональністю аналогічний розподільчим стінкам або дефлекторам, які використовуються в дифузорах (Serantola, & Birk, 2015; Meng, Zuo, Nishi, & Liu, 2020), та демонструє свою ефективність у виконанні поставлених завдань.

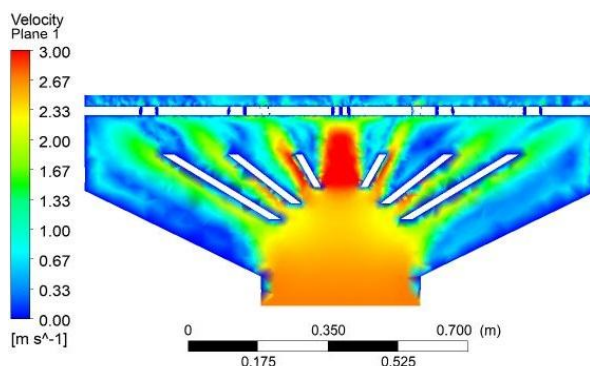


Рис. 10. Розподілення швидкості сушильного агента у флюїдному днищі модернізованої конструкції (конструкція № 2)

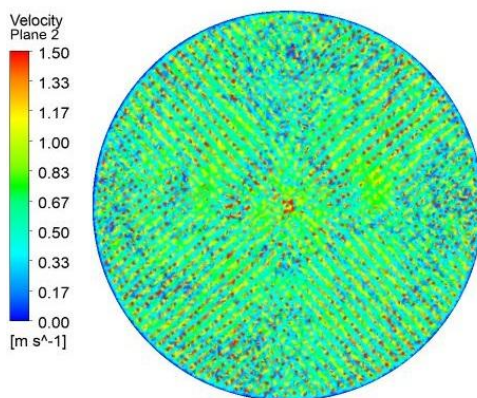


Рис. 11. Розподілення швидкості сушильного агента над розподільчою решіткою флюїдного днища модернізованої конструкції (конструкція № 2)

Висновки

Проведені дослідження із застосуванням CFD-моделювання дали змогу встановити, що в флюїдному днищі сушарки А1-ОР2Ч досягається нерівномірна швидкість сушильного агента над розподільчою решіткою. Це призводить до недостатньо ефективного досушування дисперсних частинок продукту.

Для покращення ефективності процесу досушування пропонується інтегрувати у флюїдне днище розподільчий пристрій у вигляді конічних вставок.

На основі результатів CFD-моделювання аеродинаміки сушильного агента у флюїдному днищі модернізованої конструкції визначено раціональне співвідношення розмірів конічних вставок, при якому досягається найкраще розподілення сушильного агента над решіткою, що однозначно приводить до покращення ефективності досушування. Раціональне співвідношення розмірів конічних вставок: більша вставка: $D^{\delta}_o = 0,65D_k$, $D^{\delta}_s = 0,75D_n$; середня вставка: $D^e_o = 0,4D_k$, $D^e_s = 0,5D_n$; менша вставка: $D^u_o = 0,15D_k$, $D^u_s = 0,25D_n$.

Подальші дослідження будуть спрямовані на CFD-моделювання аеродинаміки й теплообміну між сушильним агентом та вологими дисперсними частинками з метою вдосконалення технології сушіння.

Література

Белінська, К. О., & Фалендиш, Н. О. (2020). Дослідження впливу температури сушіння на органолептичні показники та хімічний склад молока. *Наукові праці НУХТ*, 26(5), 113—122. <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/32581>.

Власенко, В. В., Власенко, І. Г., & Новгородська Н. В. (2012). Характеристики сухого молока, виробленого на сушарках із застосуванням флюїдного дна. *Науковий вісник ЛНУВМБТ імені С. З. Гжицького*, 14, 2(52), 200—204. http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvlnu_2012_14_2%283%29_40.

Власенко, І. Г. (2013). Вивчення якісних показників сухого молока виробленого з приміненням флюїдного дна сушильної установки. *Збірник наукових праць ВНАУ*, 3(73), 168—173. <https://repository.vsau.org/getfile.php/6871.pdf>.

Марчевський, В. М., & Гробовенко, Я. В. (2018). Аеродинаміка вихрових потоків сушильного агента у сушильній камері. *Вісник ЖДТУ*, 1(81), 38—42. [https://doi.org/10.26642/tm-2018-1\(81\)-38-42](https://doi.org/10.26642/tm-2018-1(81)-38-42).

Погожих, М. І., Потапов, В. О., Пак, А. О., & Жеребкін, М. В. (2016). *Енергоефективні технології та техніка сушіння харчової сировини*. Харків: ХДУХТ. <https://repo.btu.kharkov.ua/handle/123456789/4518>.

Снежкін, Ю. Ф., & Петрова, Ж. О. (2010). Харчові порошки з рослинної сировини. Класифікація, методи отримання, аналіз ринку. *Біотехнологія*, 3(5), 43—49. http://nbuv.gov.ua/UJRN/biot_2010_3_5_6.

Сидоров, Ю. І. (2012). Розпилювальні сушарки в біотехнології. *Біотехнологія*, 5(4), 46—54. http://nbuv.gov.ua/UJRN/biot_2012_5_4_6.

Тарасенко, Т. А., Євлаш, В. В., Неміріч, О. В., Вашека, О. М., Гавриш, А. В., & Кравченко, О. І. (2015). Теоретичне дослідження способів сушіння овочів та фруктів. *Науковий вісник ЛНУВМБТ імені С. З. Гжицького*, 17, 4(64), 148—158. http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvlnu_2015_17_4_30.

Ткаченко, О. В., & Дубковецький, І. В. (2004). Гідродинамічні та теплові параметри в камерах розпилюючого зневоднення. *Промислова теплотехніка*, 26(6), 121—124. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/61598>.

Турчина, Т. Я., Малецька, К. Д., Жукотський, Е. К., & Ткаченко О. В. (2020). Розрахунок радіуса факелу розпилу при сушінні рідких гетерогенних систем із складними реологічними властивостями. *Теплофізика та теплоенергетика*, 42(4), 33—40. <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2020.4>.

Anis, S., Muttashillatul, U. S., Kusumastuti, A., & Widyo, B. W. (2022). Analysis of Inlet Temperature and Airflow Rate on Drying Process in a Spray Dryer Using Computational Fluid Dynamics Method. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 94(1), 163—171. <https://doi.org/10.37934/arfmts.94.1.163171>.

Cerantola, D. J., & Birk, A. M. (2015). Investigation of Tabs in Short Annular Diffusers With Swirling Flow. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 137(9), 092601. <https://doi.org/10.1115/1.4029695>.

Fletcher, D. F., Guo, B., Harvie, D. J. E., Langrish, T. A. G., Nijdam, J. J., & Williams, J. (2006). What is important in the simulation of spray dryer performance and how do current CFD models perform? *Applied Mathematical Modelling*, 30(11), 1281—1292. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2006.03.006>.

Gabites, J. R., Abrahamson, J., & Winchester, J. A. (2010). Air flow patterns in an industrial milk powder spray dryer. *Chemical Engineering Research and Design*, 88(7), 899—910. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2009.12.009>.

Huang, L., Kumar, K., & Mujumdar, A. (2006). A comparative study of a spray dryer with rotary disc atomizer and pressure nozzle using computational fluid dynamic simulations. *Chemical Engineering and Processing*, 45(6), 461—470. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2005.11.004>.

Langrish, T. (2007). New engineered particles from spray dryers: research needs in spray drying. *Drying Technology*, 25(6), 981—993. <https://doi.org/10.1080/07373930701396766>.

Langrish, T. (2009). Multi-scale mathematical modelling of spray dryers. *Journal of Food Engineering*, 93(2), 218—228. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.01.019>.

Lementar, S., Ponomarenko V., Lulka, D., & Dubivko, A. (2015). Modeling of the air supply system in spray dryer. *Ukrainian Food Journal*, 4(1), 77—189. <http://www.irbis-nbuv.gov.ua/publ/REF-0000589772>.

Lo, S. (2005). Application of computational fluid dynamics to spray drying. *Lait*, 85(4—5), 353—359. <https://doi.org/10.1051/lait:2005024>.

Meng, X., Zuo, Z., Nishi, M., & Liu, S. (2020). A Numerical Study on the Flow Mechanism of Performance Improvement of a Wide-Angle Diffuser by Inserting a Short Splitter Vane. *Processes*, 8(2), 143. <https://doi.org/10.3390/pr8020143>.

Santos, D., Maurício, A. C., Sencadas, V., Santos, J. D., Fernandes, M. H., & Gomes, P. S. (2018). Spray Drying: An Overview. *Biomaterials — Physics and Chemistry — New Edition*, 3—35. <https://doi.org/10.5772/intechopen.72247>.

Shiravi, A. H., Mujumdar, A. S., & Kubes, G. J. (1995). Numerical Study of Heat Transfer and Fluid Flow in Multiple turbulent Impinging Jets. *Drying Technology*, 13(5—7), 1359—1375. <https://doi.org/10.1080/07373939508917027>.

White, F. M. (2011). *Fluid Mechanics*. New York: McGraw-Hill. https://www.academia.edu/27474944/F_White_Fluid_Mechanics.

Zhang, C. H., Huang, L. X., Wang, C. P., & Mujumdar, A. S. (2010). Experimental and Numerical Investigation of Spray-Drying Parameters on the Dried Powder Properties of *Ginkgo biloba* Seeds. *Drying Technology*, 28(3), 380—388. <http://doi.org/10.1080/07373931003645033>.

RESEARCH OF THE PROPERTIES OF A COATING WITH A COOLING EFFECT BASED ON CALCIUM CARBONATE FOR OVERHEAD POWER LINE WIRES

V. Romaniuk, V. Shpak, P. Zinkevych
National University of Food Technologies

Key words:

Cooling coating
Calcium carbonate
Overhead power line
Wire
Power capacity

Article history:

Received 11.07.2025
Received in revised form
25.07.2025
Accepted 15.08.2025

Corresponding author:

V. Shpak

E-mail:

shpakvv@nuft.edu.ua

Citation: Романюк, В. Т., Шпак В. В., Зінкевич П. О. (2025). Дослідження властивостей покриття з охолоджувальним ефектом на основі карбонату кальцію для проводів повітряних ліній електропередавання. *Наукові праці НУХТ*, 31(4), 149—157.
DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-4-12

ABSTRACT

One of the possible ways to increase the capacity of overhead power lines is to use coatings with a cooling effect on the wires of the lines.

Among the pigments for the production of coatings with a cooling effect, CaCO_3 is worth highlighting. For the research, the pigment was synthesized using calcium chloride (96.1%) and household soda ash. Aqueous solutions of CaCl_2 and Na_2CO_3 were prepared in a 1:1 ratio at the rate of 10 g of the substance (for both substances) per 0.1 l of water. After mixing the solutions (for 1 minute) and subsequent precipitation of CaCO_3 , it was washed with demineralized water and dried.

The coating was manufactured using a polymer base in the form of a transparent adhesive-sealant based on a silane-modified polymer due to its water resistance, resistance to high and low temperatures ($-40\dots+90\text{ }^\circ\text{C}$) and elasticity, which made it resistant to the operating conditions of overhead power lines in many cases. The coating was applied to a piece of multi-core aluminum wire with a length of 33.5 cm and a diameter of 1.5 cm (approximately equivalent to a wire for overhead power lines A-185). The experiment was based on comparing the temperature of the wire and the environment (Δt — temperature difference). The ambient temperature was measured with the same thermocouple as the wire temperature. The experiment was carried out in the dark to exclude the influence of solar radiation and to study the emissivity of the coating (without taking into account its reflectivity). To stabilize the temperatures before the measurements, the experimental setup was at ambient temperature for at least 2 hours. The best temperature difference obtained was $\Delta t = -0.6 \pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$, i.e. the wire temperature was lower than the ambient temperature by $0.6 \pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$ (at ambient temperature $t_1 = -3 \pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$ and wire temperature $t_2 = -3.6 \pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$).

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОКРИТТЯ З ОХОЛОДЖУВАЛЬНИМ ЕФЕКТОМ НА ОСНОВІ КАРБОНАТУ КАЛЬЦІЮ ДЛЯ ПРОВОДІВ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ

В. Т. Романюк, В. В. Шпак, П. О. Зінкевич

Національний університет харчових технологій

Одним із можливих способів підвищення пропускної здатності повітряних ліній електропередавання (ЛЕП) може бути використання покриттів з охолоджувальним ефектом на проводах лінії.

Серед пігментів для виготовлення покриттів з охолоджувальним ефектом варто виділити CaCO_3 . Для досліджень пігмент був синтезований шляхом використання хлориду кальцію (96,1%) та побутової кальцинованої соди. Були приготовані водні розчини CaCl_2 та Na_2CO_3 у співвідношенні 1:1 з розрахунку 10 г речовини (для обох речовин) на 0,1 л води. Після змішування розчинів (протягом 1 хв) та подальшого випадання в осад CaCO_3 , пігмент був промитий демінералізованою водою і висушений.

Покриття було виготовлене з використанням полімерної основи у вигляді прозорого клею-герметика на основі силан-модифікованого полімеру через його водостійкість, стійкість до високих і низьких температур (-40 — $+90$ °C) та еластичність, що роблять його стійким до умов роботи проводів повітряних ЛЕП. Покриття було нанесене на відрізок багатожильного алюмінієвого проводу з довжиною 33,5 см та з діаметром 1,5 см (приблизний еквівалент проводу для повітряних ЛЕП А-185).

Дослід базувався на порівнянні температури проводу та навколишнього середовища (Δt — різниця температур). Температура навколишнього середовища вимірювалась такою самою терморпарою, як і температура проводу. Дослід проводився у темний час доби для виключення впливу сонячного випромінювання та дослідження випромінювальної здатності покриття (без врахування його відбиваючої здатності). Для стабілізації температур перед проведенням вимірювань дослідна установка знаходилась за температури навколишнього середовища не менше 2 годин. Найкращий отриманий результат різниці температур — $\Delta t = -0,6 \pm 0,1$ °C, тобто температура проводу була нижчою за температуру навколишнього середовища на $0,6 \pm 0,1$ °C (при температурі навколишнього середовища $t_1 = -3 \pm 0,1$ °C і температурі проводу $t_2 = -3,6 \pm 0,1$ °C).

Ключові слова: покриття з охолоджувальним ефектом, карбонат кальцію, повітряна лінія електропередавання, провід, пропускна здатність.

Постановка проблеми. Як відомо, атмосфера Землі має так зване «інфрачервоне вікно» на проміжку приблизно 8—13 мкм. Ці частоти інфрачервоного випромінювання є прозорими для атмосфери, тобто атмосфера не поглинає випромінювання на цих частотах, а пропускає його через себе і також не випромінює теплову енергію на цих частотах.

Існують речовини, які випромінюють теплову енергію у вигляді інфрачервоного випромінювання на частотах «інфрачервоного вікна». Якщо виготовити покриття на основі такої речовини та нанести його на поверхню об'єкта, яка буде спрямована в небо, можна охолодити цю поверхню нижче за температуру навколишнього середовища. Вказані покриття мають великий потенціал для використання у сфері будівництва та архітектури. Використання таких покриттів на дахах і стінах будівель дає змогу пасивно знижувати температуру повітря всередині приміщень та економити кошти на охолодження повітря системами кондиціонування (Wijewardane, 2022; Lim, 2020).

Покриття з охолоджувальним ефектом можуть використовуватись і в інших сферах, зокрема в електроенергетиці, наприклад, для охолодження розподільчих пристроїв (Melideo, 2023).

Одним із можливих застосувань покриттів з охолоджувальним ефектом є охолодження проводів повітряних ліній електропередавання (ЛЕП) з метою підвищення їх пропускної здатності.

Таке застосування висуває свої вимоги до покриття, тобто воно повинно мати можливість працювати в умовах, в яких працюють проводи повітряних ЛЕП та бути економічним (оскільки повітряні ЛЕП мають великі довжини та вимагатимуть великих об'ємів покриття, а важкі умови експлуатації, ймовірно, вимагатимуть його періодичного перенанесення).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ідея використання покриттів для проводів повітряних ЛЕП не нова, однак дослідження на цю тему переважно присвячені наданню проводам сніго-/льодовідштовхувальних властивостей для покращення їх експлуатаційних характеристик у зимовий період (Zhang, Zhang, Yue, & Zeng, 2023; Farzaneh, & Chisholm, 2022; Balordi та ін., 2023).

Застосування знайшли супергідрофобні покриття, отримані методом розпилення наноструктурованого шару ZnO та молекулярного шару гексадецилтриметоксисилану. Напилення протягом 15 хв призвело до мікронанощорсткої структури, що складається з щільно агрегованих нанокластерів. Встановлено, що затримка замерзання крапель води становить приблизно 2 год, затримка замерзання поверхні — приблизно 5 год при $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, а адгезія льоду на поверхні становить лише $12\pm 4,7\text{ кПа}$ (Liu, Yuan, Liao, Wang, & Gao, 2020).

Також існують покриття, які мають переважно захисну функцію. Повітряні лінії з проводами з таким покриттям менше схильні до пошкоджень, більш надійні, безпечні та мають менші габарити (Binkevych, 2017). Подібні покриття захищають проводи від корозії та від формування коронного розряду на їх поверхні (Tao, Cheng, Wang, Zhang, & Liao, 2022). Гальванічні покриття центральних сталевих жил проводів ЛЕП, крім захисту від корозії, певною мірою зменшують опір проводу (Бінкевич, 2012).

Порівнювали корозійну стійкість звичайної оцинкованої сталеві лінії та сталеві лінії з покриттям зі сплаву Zn-5% Al-Re. Після 1000 год корозії в нейтральному сольовому тумані оцинкований шар оцинкованої сталеві лінії майже зник. Сталева лінія з покриттям зі сплаву Zn-5% Al-Re кородувала лише поверхневий шар, а перехідний шар не кородував (Li та ін., 2020).

Покриття також застосовують для інтенсифікації процесу охолодження проводів повітряних ЛЕП. Досліджено вплив покриття з карбоновими наноструктурами

та встановлено зменшення температури проводу на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, зменшення втрат на 30% і збільшення ефективності передачі енергії на $20\text{—}30\%$ порівняно з проводами без покриття (Kumar, Pal, & Shah, 2017).

Описано також покриття графеном мідних проводів, що підвищує електропровідність і забезпечує захист від корозії. Однак недоліком є складність реалізації та висока вартість графену (Mishra та ін., 2023).

Інтенсифікація процесу охолодження проводів (через вплив на їхню випромінювальну здатність) дасть змогу підвищити пропускну здатність ЛЕП (Riba, Liu, & Moreno-Eguilaz, 2024).

Механізм дії покриття з охолоджувальним ефектом на основі теплового випромінювання на частотах «інфрачервоного вікна» атмосфери також передбачає відбиття сонячного випромінювання, зокрема у видимому діапазоні (рис. 1).

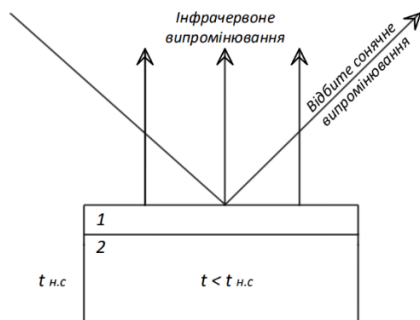


Рис. 1. Механізм дії покриття з охолоджувальним ефектом: 1 — покриття з охолоджувальним ефектом; 2 — об’єкт з покриттям; t — температура об’єкта з покриттям; $t_{н.с.}$ — температура навколишнього середовища

Серед пігментів для виготовлення покриттів з охолоджувальним ефектом варто виділити CaCO_3 . Ця речовина є дуже поширеною, безпечною (використовується навіть у харчовій промисловості безпосередньо при виробництві харчових продуктів) та дешевою і вирізняється простотою виготовлення. Покриття з охолоджувальним ефектом на основі пігменту CaCO_3 в останні роки вже довели свою ефективність (Li та ін., 2020).

Досліджено охолоджувач з одним шаром композиту CaCO_3 без металевого відбивача, який є дешевим і не викликає світлового забруднення. Результати порівнювали з білою фарбою. Охолоджувач на основі CaCO_3 має охолоджувальну потужність $93,1\text{ Вт/м}^2$ та може знизити температуру в середньому на $6,52\text{ }^{\circ}\text{C}$ та $3,38\text{ }^{\circ}\text{C}$ за температури навколишнього середовища вдень і вночі відповідно. Таким чином, його можна використовувати як охолоджувач протягом усього дня (Lim, Chae, Son, Ha, & Lee, 2022).

Досліджено охолоджувальні фарби, що складаються з BaSO_4 та CaCO_3 як пігментів, в умовах тропічного клімату. Охолоджувальна фарба з BaSO_4 змогла досягти зниження температури нижче навколишнього середовища до $-6,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ та середньої чистої охолоджувальної потужності $71,0\text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$, тоді як охолоджувальна фарба CaCO_3 досягла максимального зниження температури нижче навколишнього середовища на $-6,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ та середньої чистої охолоджувальної потужності

69,9 Вт·м⁻². Обидві фарби змогли значно перевершити білу фарбу на різних поверхнях з точки зору охолоджувальної продуктивності (Joseph та ін., 2023).

Вивчали вплив об'ємної концентрації частинок карбонату кальцію (CaCO₃) та порожнистих мікрочастинок діоксиду кремнію (SiO₂) у фарбах на акриловій основі на охолоджувальну здатність. Сонячне відбиття фарби збільшується зі збільшенням загального вмісту об'ємної концентрації частинок, доки не буде досягнуто його пікового вмісту. Додавання CaCO₃ покращує сонячне відбиття завдяки посиленню відбиття в ближньому інфрачервоному діапазоні, але зменшує теплове випромінювання. Фарба із загальним вмістом об'ємної концентрації частинок 0,45 та їхнім співвідношенням CaCO₃:SiO₂ — 1:1 досягає найкращої продуктивності охолодження (Atiganyanun, & Kumnorkaew, 2023).

Метою дослідження є визначення властивостей, які повинно мати покриття з охолоджувальним ефектом для використання на проводах повітряних ЛЕП на основі аналізу умов їх роботи та моделювання складу таких покриттів для підвищення пропускної здатності ЛЕП, які, зокрема, забезпечують електричною енергією підприємства харчової промисловості.

Матеріали і методи. В роботі використовувалось покриття, розроблене авторами на основі CaCO₃. Для перевірки властивостей (в контексті підвищення пропускної здатності повітряних ліній електропередавання) покриття було нанесене на відрізок багатожильного алюмінієвого проводу з довжиною 33,5 см та з діаметром 1,5 см (приблизний еквівалент проводу для повітряних ЛЕП А-185) (Lim, Chaе, Son, Ha, & Lee, 2022). З обох сторін проводу його було зафіксовано нейлоновими стяжками білого кольору. Через багатожильну конструкцію проводу була можливість зручно розмістити датчик температури (термопара типу «К»), вставивши його з одного кінця проводу і розташувавши його посередині проводу.

Використовуючи термопари типу «К», в темний час доби вимірювались температури проводу та навколишнього середовища для визначення різниці температур та оцінки здатності покриття випромінювати теплову енергію у вигляді інфрачервоного випромінювання.

Статистичний аналіз: представлені дані являють собою середнє арифметичне значення трьох повторів ± стандартне відхилення.

Викладення основних результатів дослідження. Для розроблення охолоджувального покриття повинен застосовуватись пігмент та основа, яка цей пігмент утримує та має властивості, що дають змогу використовувати це покриття в певних заданих умовах (Mansour, & Farha, 2025).

Пігмент CaCO₃ був синтезований шляхом використання хлориду кальцію (96,1%) та побутової кальцинованої соди за формулою:



Були приготовані водні розчини CaCl₂ та Na₂CO₃ у співвідношенні 1:1 з розрахунку 10 г речовини (для обох речовин) на 0,1 л води. Після змішування розчинів (протягом 1 хв) та подальшого випадання в осад CaCO₃, він був промитий демінералізованою водою та висушений.

Покриття було виготовлене з використанням полімерної основи у вигляді прозорого клею-герметика на основі силан-модифікованого полімеру через його водостійкість, стійкість до високих і низьких температур (-40...+90 °С) та еластич-

ність, що роблять його стійким до умов роботи проводів повітряних ЛЕП у багатьох випадках. Також ця речовина має безкислотну полімеризацію (Kang, Yu, & Zhang, 2009), що важливо, оскільки CaCO_3 розкладається кислотами.

Експериментальним шляхом співвідношення між полімерною основою та пігментом було обране 1:6. Таке співвідношення базується на тому, що відсоток пігменту повинен бути високим, однак покриття достатньою мірою зберігає властивості полімерної основи. Для проведення випробувань механічні властивості покриття достатні, однак для застосування подібного покриття на практиці воно є дещо крихким, також процес нанесення покриття на провід ускладнювався його особливою консистенцією — суміш проявляла властивості неньютонівської рідини.

Оскільки отримати суміш, яку можна було б наносити із вказаним співвідношенням між полімерною основою та пігментом було неможливо, для розв'язання цієї проблеми було вирішено розчинити полімерну основу в розчиннику. Для цього був використаний вайт-спірит, який після нанесення суміші на обрану поверхню випаровується, залишаючи готове покриття. Отже, фінальне співвідношення полімерної основи до пігменту та розчинника було 1:6:3.

Провід було покрито покриттям з товщиною 1 мм. Нижня сторона проводу була залишена без покриття, оскільки це нераціонально, враховуючи принцип роботи такого покриття. Схематично дослідна установка зображена на рис. 2.

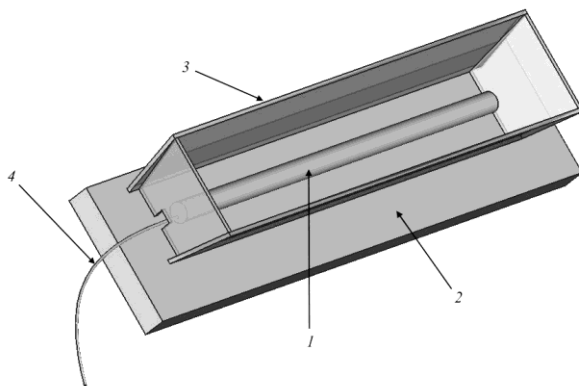


Рис. 2. Дослідна установка: 1 — провід з покриттям; 2 — дерев'яна основа; 3 — екран; 4 — термопара

Провід 1 був зафіксований на дерев'яній основі 2 таким чином, щоб він не торкався цієї основи (провід був прикріплений до основи в точках, де був зафіксований нейлоновими стяжками). Для ізоляції проводу від впливу теплового випромінювання об'єктів, що знаходились поруч, був виготовлений екран 3 з використанням алюмінієвої фольги та картону.

Дослід базувався на порівнянні температури проводу та навколишнього середовища (Δt — різниця температур). Температура навколишнього середовища вимірювалась такою самою термопарою, як і температура проводу. Дослід проводився у темний час доби для уникнення впливу сонячного випромінювання та до-

слідження випромінювальної здатності покриття (без урахування його відбиваючої здатності). Для стабілізації температур перед проведенням вимірювань дослідна установка знаходилась за температури навколишнього середовища не менше 2 годин.

На рис. 3 наведені результати вимірювань протягом місяця (травень). В цей період спостерігалася бездождова стабільна погода, без сильних поривів вітру, що дало змогу виключити вплив цих факторів. Виявлено, що о 18 год температура проводу переважає температуру навколишнього середовища. Це можна пояснити впливом сонячного випромінювання та низькою відбивальною здатністю покриття. Середнє значення різниці температур між проводом і навколишнім середовищем для темного часу доби (з 22:00 до 4:00) становило $1,99 \pm 0,07$ °C.

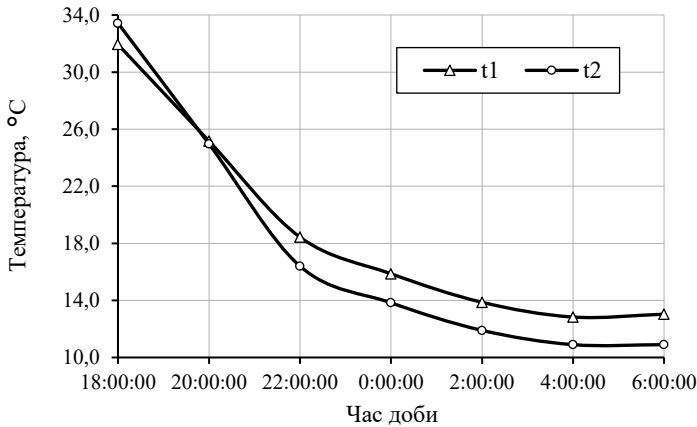


Рис. 3. Зміна температур у часі: t_1 — температура навколишнього середовища; t_2 — температура проводу

Найкращий отриманий результат різниці температур — $\Delta t = -0,6 \pm 0,1$ °C, тобто температура проводу була нижчою за температуру навколишнього середовища на $0,6 \pm 0,1$ °C (при температурі навколишнього середовища $t_1 = -3 \pm 0,1$ °C і температурі проводу $t_2 = -3,6 \pm 0,1$ °C).

У (Lim, Chae, Son, Ha, & Lee, 2022) досліджувалась випромінювальна система охолодження на основі покриття з охолоджувальним ефектом на базі CaCO_3 , яка могла знижувати температуру в середньому на $3,38$ °C нижче за температуру навколишнього середовища вночі. Однак у цьому дослідженні використовувалось покриття з більш складним складом та на основі ДРНА, який утворює тверде покриття, тоді як на проводах повітряних ЛЕП потрібно, щоб це покриття зберігало певну еластичність для витримування нормальних деформацій проводу, які виникають внаслідок вітрових навантажень, зміни температур та інших умов роботи.

При дослідженні подібного покриття з пігментом CaCO_3 вдалося отримати $\Delta t = -1,7$ °C (Li та ін., 2020), що є більш ніж вдвічі кращим результатом, однак у вказаному дослідженні використовувалось покриття на основі акрилу, яке не може працювати в умовах роботи проводів повітряних ЛЕП.

Дослідження показали, що холодне покриття може знизити температуру поверхні бетонної плити на $7,5$ °C, крім того, воно може бути на 15 °C холоднішим за

сріблясто-сіре покриття. Однак зразки покриття були алкідні та хлоркаучукові, що не можуть працювати в умовах роботи проводів повітряних ЛЕП (Synnefa, Santamouris, & Livada, 2006).

Отриманий результат підтверджує перспективність запропонованого способу підвищення пропускної здатності повітряних ЛЕП.

Подальші дослідження можуть бути присвячені вивченню і покращенню відбиваючої здатності покриття, оптимізації запропонованої рецептури та застосуванню покриття в умовах роботи проводу близьких до реальних (з урахуванням нагрівання проводу під час протікання струму через лінію).

Висновки

Досліджено покриття на основі пігменту CaCO_3 та встановлено раціональне співвідношення полімерної основи до пігменту та розчинника 1:6:3.

Встановлено, що покриття на основі пігменту CaCO_3 та силан-модифікованого полімерного герметика дає змогу охолодити відрізок багатожильного алюмінієвого проводу з довжиною 33,5 см та з діаметром 1,5 см (приблизний еквівалент проводу для повітряних ЛЕП А-185 на $0,6 \pm 0,1$ °C нижче за температуру навколишнього середовища (яка становила $-3 \pm 0,1$ °C)).

Покриття з охолоджувальним ефектом на основі пігменту CaCO_3 потенційно можуть використовуватися на проводах повітряних ЛЕП для їх охолодження та підвищення пропускної здатності ліній.

Література

Бінкевич, Т. (2012). Підвищення пропускної здатності повітряних ліній електропередавання та застосування проводів нових марок. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*, 736 (Електроенергетичні та електромеханічні системи), 3—9.

Atiganyanun, S., Kumnorkaew, P. (2023). Effects of pigment volume concentration on radiative cooling properties of acrylic-based paints with calcium carbonate and hollow silicon dioxide microparticles. *International Journal of Sustainable Energy*, 42(1), 612—626. <https://doi.org/10.1080/14786451.2023.2221082>.

Balordi, M., De Magistris, G. S., Casali, A., Pini, F., Cammi, A., Lacavalla, M., Rotella, V. (2023). The Anti-Snow Behaviour of icephobic Coatings: Laboratory and In-Field testing. *Coatings*, 13(3), 616. <https://doi.org/10.3390/coatings13030616>.

Binkevych, T. (2017). Means of lightning protection of overhead power transmission lines with isolated neutral. *Computational problems of electrical engineering*, 7(1), 11—16. <https://doi.org/10.23939/jcpee2017.01.011>.

Farzaneh, M., Chisholm, W. A. (2022). Protective coatings for overhead lines in winter conditions. In *CIGRE green books* (pp. 195—309). https://doi.org/10.1007/978-3-030-87455-1_6.

Joseph, W. R., Tan, J. Y., Koyande, A. K., Khoiroh, I., Joynson, J., Willis, S. (2023). Subambient passive radiative cooling effects of barium sulfate and calcium carbonate paints under Malaysia's tropical climate. *Environmental Science Advances*, 2(12), 1662—1679. <https://doi.org/10.1039/d3va00161j>.

Kang, J.-S., Yu, C.-L., Zhang, F. (2009). Effect of Silane Modified SiO_2 Particles on Poly(MMA-HEMA) Soap-free Emulsion Polymerization. *Iranian Polymer Journal*, 18(12114), 927—935.

Kumar, S., Pal, G., Shah, T. (2017). High performance overhead power lines with carbon nanostructures for transmission and distribution of electricity from renewable sources. *Journal of Cleaner Production*, 145, 180—187. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.053>.

Li, X., Peoples, J., Huang, Z., Zhao, Z., Qiu, J., Ruan, X. (2020). Full Daytime Sub-ambient Radiative Cooling in Commercial-like Paints with High Figure of Merit. *Cell Reports Physical Science*, 1(10), 100221. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2020.100221>.

Li, Q., Naderiallaf, H., Lei, Z., Wang, Y., Liu, P., Zhang, L., Wang, Z., Zhang Z. (2020). Surface charge pattern analysis based on the field-dependent charging theory: A review. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 27, 257—269. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2019.008430>.

Lim, H., Chae, D., Son, S., Ha, J., Lee, H. (2022). CaCO₃ micro particle-based radiative cooling device without metal reflector for entire day. *Materials Today Communications*, 32, 103990. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103990>.

Lim, Y. (2020). Novel materials and concepts for regulating infra-red radiation: radiative cooling and cool paint. In *Elsevier eBooks*, 113—131. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-822103-7.00005-4>.

Liu, G., Yuan, Y., Liao, R., Wang, L., Gao, X. (2020). Fabrication of a porous slippery icephobic surface and effect of lubricant viscosity on anti-icing properties and durability. *Coatings*, 10, 896. <https://doi.org/10.3390/coatings10090896>.

Mansour, S. A., Farha, A. H. (2025). A Review of Near-Infrared Reflective Nanopigments: Aesthetic and Cooling Properties. *Crystals*, 15(3), 271. <https://doi.org/10.3390/cryst15030271>.

Melideo, F. (2023). *SRI researchers have developed a paint that provides a sustainable passive cooling solution*. ipcm. Available at: <https://www.ipcm.it/en/post/sri-researchers-paint-provides-passive-cooling.aspx>.

Mishra, N., Vlamidis, Y., Martini, L., Lanza, A., Gebeyehu, Z. M., Jouvray, A., La Sala, M., Gemmi, M., Mišeikis, V., Perry, M., Teo, K. B. K., Forti, S., Coletti, C. (2023). Industrial graphene coating of Low-Voltage copper wires for power distribution. *ACS Applied Engineering Materials*, 1(7), 1937—1945. <https://doi.org/10.1021/acsaenm.3c00249>.

Riba, J., Liu, Y., Moreno-Eguilaz, M. (2024). Analyzing the role of emissivity in stranded conductors for overhead power lines. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 159, 110027. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.110027>.

Synnefa, A., Santamouris, M., Livada, I. (2006). A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment. *Solar Energy*, 80(8), 968—981. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.08.005>.

Tao, B., Cheng, L., Wang, J., Zhang, X., Liao, R. (2022). A review on mechanism and application of functional coatings for overhead transmission lines. *Frontiers in Materials*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.995290>.

Wijewardane, S. (2022). Inventions, innovations, and new technologies: Paints and coatings for passive cooling. *Solar Compass*, 3—4, 100032. <https://doi.org/10.1016/j.solcom.2022.100032>.

Zhang, Z., Zhang, H., Yue, S., Zeng, W. (2023). A review of icing and Anti-Icing technology for transmission lines. *Energies*, 16(2), 601. <https://doi.org/10.3390/en16020601>.

STUDY OF HEAT EXCHANGE PROCESSES IN DENSE FLOWING FILMS OF SOLUTIONS CYCLICALLY DISTURBED BY WAVE FLOWS DURING EVAPORATION

V. Petrenko, M. Prydko, O. Pylipenko, D. Maksymenko

National University of Food Technologies

Key words:

Heat transfer
Film
Waves
Intensification
Evaporation
Solution
Concentration

Article history:

Received 03.07.2025
Received in revised form
18.07.2025
Accepted 04.08.2025

Corresponding author:

V. Petrenko
E-mail:
petrenkovp@ukr.net

Citation: Петренко В. П., Прядко М. О., Пилипенко О. Ю., Максименко Д. В. (2025). Дослідження процесів теплообміну в густих стікаючих плівках розчинів, циклічно збурених хвильовими напливами під час випаровування. *Наукові праці НУХТ*, 31(4), 158—171.
DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-4-13

ABSTRACT

The heat transfer processes in flowing dense concentrated films of solutions with a formed structure of separated wave influxes, developing in long channels during evaporative concentration, were considered. A mathematical model of heat transfer was proposed as a sequence of cyclic processes of disturbance and restoration of the temperature and concentration fields in the film, deformed during the movement of wave influxes. Analytical expressions for the thermal and concentration fields in the film during the relaxation period of the temperature and concentration profiles after the disturbance were given, as a result of approximate solutions of the differential equations of convective heat conduction and diffusion for a film moving in a laminar mode with a parabolic velocity profile. A correlation was proposed to generalize the results of studies of heat transfer in freely flowing dense films periodically disturbed by large wave influxes during evaporation in the absence of bubbling boiling. The correlation based on the ratio of the lengths of the sections between the two wave inflows — with the development of the velocity profile after the disturbance and with a stable parabolic velocity profile in the film, since they have different wall temperature gradients and, accordingly, different values of the average integral heat flux densities. The results of comparisons of calculated values with experimental data were presented. Physical modeling was carried out on a vertical stainless steel pipe with an internal diameter of 30 mm and a length of 9 m, sectioned into sections of 440 mm for the collection of heating steam condensate. Model liquid — sugar solution with a concentration of 55—72%, volumetric liquid flux (0,1—0,6) 10^{-3} m²/s.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛООБМІНУ В ГУСТИХ СТІКАЮЧИХ ПЛІВКАХ РОЗЧИНІВ, ЦИКЛІЧНО ЗБУРЕНИХ ХВИЛЬОВИМИ НАПЛИВАМИ ПІД ЧАС ВИПАРОВУВАННЯ

В. П. Петренко, М. О. Прядко, О. Ю. Пилипенко, Д. В. Максименко
Національний університет харчових технологій

Розглянуто процеси теплоперенесення в стікаючих густих концентрованих плівках розчинів зі сформованою структурою відокремлених хвильових напливів, що розвиваються в довгих каналах під час випарувального концентрування. Запропоновано математичну модель теплоперенесення як послідовність циклічних процесів порушення та відновлення температурного й концентраційного полів у плівці, деформованих під час руху хвильових напливів. Надано аналітичні вирази для теплового та концентраційного полів у плівці в період релаксації профілей температури та концентрації після збурення як результат наближених розв'язків диференціальних рівнянь конвективної теплопровідності та дифузії для плівки, що рухається в ламінарному режимі з параболічним профілем швидкості.

Запропоновано кореляцію для узагальнення результатів досліджень теплообміну у вільностікаючих густих плівках, періодично збурених великими хвильовими напливами під час випаровування за відсутності бульбашкового кипіння. Кореляція базується на співвідношенні довжин ділянок між двома хвильовими напливами — ділянок з розвитком профілю швидкості після збурення та з усталеним параболічним профілем швидкості в плівці, оскільки на них впливають як різні пристінні температурні градієнти, так і середньо-інтегральні густини теплового потоку. Наведено результати порівнянь розрахункових значень з експериментальними даними, що відповідають режиму випаровування з вільної поверхні. Фізичне моделювання здійснено на вертикальній трубі з нержавіючої сталі діаметром 30 мм довжиною 9 м, секціонованою на ділянки довжиною 440 мм для відбору конденсату нагрівної пари. Нагрівання здійснене сухою насиченою парою. Модельна рідина — цукровий розчин концентрацією 55—72%. Діапазон зміни щільності зрошення $(0,1-0,6) 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$. Швидкість пари — до 5 м/с.

Ключові слова: теплообмін, плівка, хвиля, інтенсифікація, випаровування, розчин, концентрування.

Постановка проблеми. В харчовій галузі особлива увага приділяється виробництву якісних харчових концентратів (фруктові та овочеві соки, цукрові розчини), які є термолабільними розчинами і вимагають під час концентрування мінімального часу контакту з гарячою поверхнею, а процес випарювання здійснювати в умовах глибокого розрідження. Внаслідок високої в'язкості течія висококонцентрованих плівок розчинів по вертикальній поверхні особливо за низьких температур в області розрідження має ламінарний характер. При цьому в довгих теплообмінних каналах на відстані 1,0—1,5 м формуються рідинні напливи, які руха-

ються по поверхні плівки у формі великих хвиль з монотонним збільшенням амплітуди по довжині каналу. Так, під час стікання по вертикальній пласкій поверхні густих концентрованих плівок яблучного концентрату утворюються тривимірні серповидні напливи (Прядко, Глоба, & Форсюк, 2015), які просуваються по поверхні плівки. Крім того, в процесі концентрування густих плівок у кип'ятильних каналах пропорційно густині теплового потоку зменшується щільність зрошення, але при цьому стрімко наростає в'язкість. Тому, на відміну від випаровування плівок малов'язких розчинів, які в міру зменшення товщини розриваються на струмки та ривулети, густі плівки в процесі концентрування потовщуються (Петренко, Рябчук, & Бурлака, 2014) зі зростанням амплітуди рідинних напливів. Періодичність збурень плівки рідинними напливами порушує усталений режим теплоперенесення і змінює характер процесів теплообміну. Для їх адекватного відображення необхідно аналізувати поточні зміни гідродинамічного, теплового та концентраційного полів у процесі випаровування води з поверхні плівки в межах міжхвильового циклу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні публікації щодо гідродинаміки плівкових течій стосуються переважно малов'язких плівок з малою витратою рідини і присвячені питанням стійкості поверхні плівки до нанесення малих збурень і розвитку хвильової структури в процесах її виникнення. Так, у (Mukhopadhyay, & Chattopadhyay, 2018; Chattopadhyay, Mukhopadhyay, & Barua, 2021; Samanta, 2020) теоретично доведено, що течія в'язкої стікаючої плівки рідини постійної товщини навіть за малої витрати нестійка до нескінченно малих збурень і при подальшому їх розвитку стає хвильовою. В разі нагрівання виникає ще й термокапілярна нестійкість, яка прискорює та інтенсифікує процеси хвилеутворення на поверхні стікаючих плівок (Chattopadhyay, Mukhopadhyay, & Barua, 2021; Choudhury, & Samanta, 2023). Рухаючись вниз по поверхні теплообміну, хвилі розвиваються і деформуються, утворюючи відносно стійку структуру високочастотних поверхневих капілярних хвиль (Zhou, & Prosperetti, 2020), по яким прокочуються низькочастотні великі хвилі (Malamataris, & Balakotaiah, 2008; Usha, Chattopadhyay, & Tiwari 2020; Nguyen, & Balakotaiah, 2000; Kostoglou, Samara, & Karapantsios, 2010; Malamatairis, & Balakotaiah, 2008). Рух великих хвиль супроводжується явищем утворення вихору зі зміною напрямку руху потоку в пристінній області (Nikolaos, Malamataris, & Balakotaiah, 2008). Цей фактор стає визначальним у процесі моделювання теплоперенесення в плівці під час проходження великої хвилі по поверхні стікаючої плівки (Mascarenhas, & Mudawar, 2013). У праці (Samanta, 2019) на основі еволюційних рівнянь для компонент нормальної швидкості та нормальної завихреності виконано аналіз лінійної стійкості тривимірної рідини, накладеної на зсув, що тече по похилій площині. Аналіз модальної стабільності демонструє, що потік, викликаний зсувом, є більш нестійким до індивідуальних збурень вздовж потоку, тому за таких умов процеси хвилеутворення розвиваються більш інтенсивно. За наявності турбулентності процес розвитку хвиль на поверхні плівки прискорюється (Alhousseini, & Chen, 2000). Особлива увага приділяється процесам розвитку турбулентності в плівках, зважаючи на особливість її розвитку внаслідок демпфування міжфазною поверхнею. Перелік алгебраїчних моделей турбулентності наведено в (Mascarenhas, & Mudawar, 2013). Процеси теплоперенесення в слаботурбулентних плівках розглянуто в (Petrenko, & Pryadko, 2020).

Що стосується висвітлення процесів теплоперенесення в густих висококонцентрованих плівках під час пароутворення, то в літературі наведені лише співвідношення для розрахунку середньоінтегральних характеристик теплообміну в плівках без деталізації механізму процесів теплоперенесення в стікаючих плівках з розвинутою структурою великих хвиль або хвильових напливів.

Мета дослідження: дослідити вплив рідинних напливів на інтенсивність теплоперенесення в густих ламінарних плівках під час випаровування.

Матеріали і методи. Фізичне моделювання виконано на експериментальній трубі з нержавіючої сталі довжиною 9 м діаметром $30 \cdot 1,5$ мм секціонованою ділянками по 440 мм з відведенням конденсатів нагрівної пари на окремі вимірювальні стакани. На нижні 4 секції нагрівна суха насичена пара подавалась незалежно від верхніх секцій. Об'ємна щільність зрошення змінювалась в діапазоні $0,1 \dots 0,6 \cdot 10^{-3}$ м²/с; концентрація цукрового розчину на вході в канал — 55...72 %. В трубі підтримувався атмосферний тиск. Тиск нагрівної пари не перевищував 1,4 бар з умови запобігання бульбашкового кипіння плівки.

Викладення основних результатів дослідження. У (Denner, Charogiannis, Pradas, & Christos, 2018) показано, що досягнення максимальної висоти поодинокі великої хвилі зумовлено рециркуляцією потоку в горбі великої хвилі. Тобто внаслідок гальмування рідини при основі потовщення виникає повільний обертовий вихор, який переміщує рідину в процесі її руху по поверхні плівки. В результаті перемішування має місце певна деформація профілів концентрації та температури, які за час паузи між проходженнями напливів відновлюються до попереднього рівня (рис. 1).



Рис. 1. Характер профілів швидкості та температури після (верх) та до (низ) проходження напливу (великої хвилі): суцільна лінія — профіль швидкості; штрихова — температури

Тому теплоперенесення в густій плівці з розвинутою структурою рухомих рідинних напливів розглянемо як циклічний процес порушення та відновлення температурного поля в міжхвильову паузу. Згідно з (Петренко, 2009) для плівки цукрового розчину концентрацією 63% з об'ємною щільністю зрошення $0,3 \cdot 10^{-3}$ м²/с

при температурі 100 °С стабілізація профілю швидкості після збурення завершується на відстані близько 15 мм. Оскільки відстань між напливами знаходиться в межах 120 мм, то на решті відстані, яка становить 80...85% від загальної довжини міжхвильової паузи, реалізується усталений параболический профіль швидкості. За ламінарного режиму руху із супутнім потоком розвиток температурного поля в плівці після збурення можна виразити рівнянням конвективної теплопровідності:

$$\left[\left(\frac{\tau_i}{\rho v} + \frac{g\delta}{v} \right) y - \frac{g}{2v} y^2 \right] \frac{\partial t(x,y)}{\partial x} = a \frac{\partial^2 t(x,y)}{\partial y^2}, \quad (1)$$

або у безрозмірному вигляді:

$$\left[\left(\frac{\tau_i \delta^2}{\rho v} + \frac{g\delta^3}{v} \right) \eta - \frac{g\delta^3}{2v} \eta^2 \right] \frac{\partial \theta(\eta,\xi)}{\partial \xi} = a \frac{\partial^2 \theta(\eta,\xi)}{\partial \eta^2}, \quad (2)$$

де $\theta(\eta, \xi) = \frac{t(\eta,\xi) - t_i}{t_{cm} - t_i}$ — безрозмірна температура; $\eta = \frac{y}{\delta}$, $\xi = \frac{x}{\delta}$ — безрозмірні поперечна та повздовжня координати; a — температуропровідність; v — кінематична в'язкість; δ — товщина плівки; ρ — густина рідини; t_{cm} , t_i — температура стінки та температура рідини на міжфазній поверхні плівки відповідно; τ_i — дотична напружка на поверхні плівки.

Поле концентрацій $C(x, y)$ за ламінарного режиму руху плівки може бути знайдене з рівняння конвективної дифузії:

$$\left[\left(\frac{\tau_i}{\rho v} + \frac{g\delta}{v} \right) y - \frac{g}{2v} y^2 \right] \frac{\partial C(x,y)}{\partial x} = D_m \frac{\partial^2 C(x,y)}{\partial y^2}, \quad (3)$$

де D_m — коефіцієнт молекулярної дифузії.

У рівняннях (1)—(3) поперечна координата y, η відрховується від поверхні теплообміну. Точний розв'язок (2) проблематичний, тому температурне поле в плівці знаходимо наближеним методом Тарга заміною лівої частини (2) середнім значенням:

$$\int_0^1 \left[\left(\frac{\tau_i}{\rho \delta v} + \frac{g}{v} \right) \eta - \frac{g}{2v} \eta^2 \right] \frac{\delta^3}{a} \frac{\partial \theta(\eta,\xi)}{\partial \xi} d\eta = \left(\frac{\tau_i \delta^2}{2\rho v} + \frac{g\delta^3}{3v} \right) \frac{1}{a} \frac{\partial \theta_{cp}(\xi)}{\partial \xi}.$$

Оскільки

$$\left(\frac{\tau_i \delta^2}{2\rho v} + \frac{g\delta^3}{3v} \right) \frac{1}{a} = \left(\frac{\tau_i \delta}{2\rho v} + \frac{g\delta^2}{3v} \right) \frac{\delta}{a} = \frac{\bar{u}\delta}{a} = \frac{\Gamma_v}{a} = \frac{Pe}{4},$$

то рівняння (2) набуває вигляду:

$$\frac{Pe}{4} \frac{\partial \theta_{cp}(\xi)}{\partial \xi} = \frac{\partial^2 \theta(\eta,\xi)}{\partial \eta^2}, \quad (4)$$

де Γ_v — об'ємна щільність зрошення; \bar{u} — середня швидкість рідини в плівці; $Pe = \frac{4\Gamma_v}{a} = \frac{4\bar{u}\delta}{a}$ — число Пекле.

Ступінь збурення температурного профілю залежатиме від потужності хвилі, яка прокочується по поверхні плівки. В усталеному режимі температурний профіль лінійний, і температурні градієнти на поверхні стінки та міжфазній поверхні збігаються. В період прогрівання температурний градієнт на стінці перевищує градієнт на міжфазній поверхні плівки. Під час проходження великої хвилі пристінний, перегрітий відносно температури насичення, шар плівки транспортуються на поверхню, де в результаті самовипаровування відбувається охолодження перенесеної маси рідини до стану насичення. Ступінь «прогинання» температурного профілю після проходження великої хвилі залежатиме від потужності центрального вихору. Якщо плівка рідини догріта до стану насичення, а температура поверхні теплообміну миттєво підвищиться, температурна хвиля почне рухатися в

нормальному до поверхні теплообміну напрямку і досягне міжфазної поверхні, коли на ній з'явиться температурний градієнт. Отже, гранична температурна крива визначається появою температурного градієнта на міжфазній поверхні, тобто умовою:

$$\eta = 0; \quad \theta = 1; \quad \eta = 1, \quad \frac{\partial \theta}{\partial \eta} = 0. \quad (5)$$

Подвійне інтегрування (4) з наведеними граничними умовами дає

$$\theta(\eta, \xi) = \frac{Pe}{4} \frac{\partial \theta_{cp}(\xi)}{\partial \xi} \left(\frac{\eta^2}{2} - \eta \right) + 1. \quad (6)$$

На основі виразу для середньої температури плівки

$$\theta_{cp} = \int_0^1 \theta(\eta, \xi) \frac{u(\eta)}{\bar{u}} d\eta = \int_0^1 \theta(\eta, \xi) \frac{\left[\left(\frac{\tau_i}{\rho v} + \frac{g\delta}{v} \right) \eta - \frac{g\delta}{2v} \eta^2 \right]}{\left(\frac{\tau_i}{2\rho v} + \frac{g\delta}{3v} \right)} d\eta = 1 - D \frac{\partial \theta_{cp}(\xi)}{\partial \xi}$$

отримуємо диференціальне рівняння

$$\frac{\partial \theta_{cp}}{\partial \xi} + \theta_{cp} \frac{1}{D} = \frac{1}{D},$$

розв'язком якого, за початкових умов $\xi = 0, \theta_{cp} = 0$, є вираз:

$$\theta_{cp} = 1 - \exp\left(-\frac{\xi}{D}\right), \quad (7)$$

де $D = \frac{Pe}{80} \frac{25\tau_i + 16\rho g\delta}{3\tau_i + 2\rho g\delta}$.

Підставивши похідну $\frac{d\theta_{cp}(\xi)}{d\xi}$ з (7) в (6), отримаємо розподіл температури граничної кривої в плівці при $\xi = \xi_m$, за якої $\frac{\partial \theta}{\partial \eta} = 0$:

$$\theta(\eta, \xi_m) = \left(\frac{Pe}{4}\right) \frac{1}{D} \exp\left(-\frac{\xi_m}{D}\right) \left(\frac{\eta^2}{2} - \eta\right) + 1. \quad (8)$$

Координату ξ_m знаходимо з (8) за умови, що при $\xi = \xi_m$ безрозмірна температура дорівнює нулю, ($\theta(1, \xi_m) = 0$):

$$\xi_m = D \ln\left(\frac{Pe}{8D}\right). \quad (9)$$

Після «просідання» температурного профілю, спричиненого дією великої хвилі, відбувається прогрівання плівки при постійній температурі міжфазної поверхні t_i , яка дорівнює сумі температури насичення t_{sat} та фізико-хімічній температурній депресії Δ_i , відповідно, концентрації розчину на міжфазній поверхні плівки C_i :

$$t_i = t_{sat} + \Delta_i(C_i). \quad (10)$$

У період прогрівання плівки від граничної кривої (8) до усталеного температурного профілю в області $\xi \geq \xi_m$ температурне поле можна отримати з (4) за граничних умов $\eta = 0; \theta = 1; \eta = 1; \theta = 0$.

Інтегрування (4) за даних граничних умов дає:

$$\theta(\eta, \xi) = \frac{Pe}{8} \frac{\partial \theta_{cp}(\xi)}{\partial \xi} (\eta^2 - \eta) - \eta + 1. \quad (11)$$

На основі виразу для середньої температури плівки на ділянці $\xi \geq \xi_m$:

$$\theta_{cp} = \int_0^1 \left(\frac{Pe}{8} \frac{\partial \theta_{cp}}{\partial \xi} (\eta^2 - \eta) - \eta + 1 \right) \frac{\left[\left(\frac{\tau_i}{\rho v} + \frac{g\delta}{v} \right) \eta - \frac{g\delta}{2v} \eta^2 \right]}{\left(\frac{\tau_i}{2\rho v} + \frac{g\delta}{3v} \right)} d\eta = R_1 - R \frac{\partial \theta_{cp}(\xi)}{\partial \xi}$$

отримуємо диференціальне рівняння:

$$\frac{\partial \theta_{cp}}{\partial \xi} + \theta_{cp} \frac{1}{R} = \frac{R_1}{R},$$

розв'язком якого є вираз:

$$\theta_{cp} = R_1 + C_1 \exp\left(-\frac{\xi}{R}\right), \quad (12)$$

де $R = \frac{(7\rho g \delta + 10\tau_i) Pe}{(3\tau_i + 2\rho g \delta) 160}$; $R_1 = \frac{\tau_i + \frac{3}{4}\rho g \delta}{3\tau_i + 2\rho g \delta}$.

Константу інтегрування C_1 знаходимо з початкової умови (8), позначивши середньо-інтегральну температуру при $\xi = \xi_m$, як $\theta_{cp,m}$:

$$\theta_{cp,m} = \int_0^1 \left[\frac{Pe}{4} \frac{1}{D} \exp\left(-\frac{\xi_m}{D}\right) \left(\frac{\eta^2}{2} - \eta\right) + 1 \right] \frac{\left[\left(\frac{\tau_i + g\delta}{\rho v} \right) \eta - \frac{g\delta}{2v} \eta^2 \right]}{\left(\frac{\tau_i + g\delta}{2\rho v} + \frac{g\delta}{3v} \right)} d\eta = 1 - \exp\left(-\frac{\xi_m}{D}\right).$$

Підставивши отриманий вираз у (12) замість θ_{cp} , отримаємо константу інтегрування C_1 :

$$C_1 = \left[1 - R_1 - \exp\left(-\frac{\xi_m}{R}\right) \right] \exp\left(\frac{\xi_m}{R}\right),$$

а вираз для середньої температури при $\xi \geq \xi_m$ набуває вигляду:

$$\theta_{cp} = R_1 + \left[1 - R_1 - \exp\left(-\frac{\xi_m}{R}\right) \right] \exp\left(\frac{\xi_m - \xi}{R}\right). \quad (13)$$

Продиференціювавши (13) по ξ :

$$\frac{\partial \theta_{cp}}{\partial \xi} = \left[\frac{R_1 - 1}{R} + \frac{1}{R} \exp\left(-\frac{\xi_m}{R}\right) \right] \exp\left(\frac{\xi_m - \xi}{R}\right)$$

та підставивши отриманий вираз у вихідне рівняння (11), отримаємо розподіл температури в плівці в області $\xi \geq \xi_m$:

$$\theta(\eta, \xi) = \frac{Pe}{8} \left[\frac{R_1 - 1}{R} + \frac{1}{R} \exp\left(-\frac{\xi_m}{R}\right) \right] \exp\left(\frac{\xi_m - \xi}{R}\right) (\eta^2 - \eta) - \eta + 1. \quad (14)$$

За більш глибокого проникнення потужного вихору в плівку внаслідок руху великих рідинних напливів відбувається інтенсивне перемішування плівки, а поперечна координата з «нульовим» перегрівом плівки відносно температури насичення зміщується з міжфазної поверхні в глибину плівки. За таких умов гранична умова $\frac{\partial \theta(1, \xi)}{\partial \eta} = 0$ змінюється на $\frac{\partial \theta(\infty, \xi)}{\partial \eta} = 0$, початкова умова на $\theta(0, 0) = 0$, параболічний профіль швидкості в рівнянні (2) на постійну швидкість, а рівняння конвективної теплопровідності набуває вигляду:

$$\frac{Pe}{4} \frac{\partial \theta(\eta, \xi)}{\partial \xi} = \frac{\partial^2 \theta(\eta, \xi)}{\partial \eta^2}. \quad (15)$$

За таких граничних умов рівняння (15) має точний розв'язок:

$$\theta(\eta, \xi) = \operatorname{erfc}\left(\frac{\eta}{4} \sqrt{\frac{Pe}{\xi}}\right). \quad (16)$$

Графічна інтерпретація (14, 16) наведена на рис. 2.

Похідна від (14) на стінці ($\eta = 0$) при $\xi \geq \xi_m$:

$$\frac{d\theta(\eta, \xi)}{d\eta_{\eta=0}} = -\frac{Pe}{8} \left[\frac{R_1 - 1}{R} + \frac{1}{R} \exp\left(-\frac{\xi_m}{R}\right) \right] \exp\left[\frac{\xi_m - \xi}{R}\right] - 1,$$

а від (16) на стінці ($\eta = 0$) при $\xi \leq \xi_m$:

$$\frac{d\theta(\eta, \xi)}{d\eta_{\eta=0}} = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{Pe}{\xi}}.$$

Відповідно, густина теплового потоку на стінці ($\eta = 0$) в області $\xi \geq \xi_m$:

$$q(\xi)_{\eta=0} = -\lambda \frac{t_{cm}-t_i}{\delta} \frac{d\theta}{d\eta_{\eta=0}} = \lambda \frac{t_{cm}-t_i}{\delta} \left\{ \frac{Pe}{8} \left[\frac{R_1-1}{R} + \frac{1}{R} \exp\left(-\frac{\xi_m}{D}\right) \right] \exp\left(\frac{\xi_m-\xi}{R}\right) + 1 \right\}, \quad (17)$$

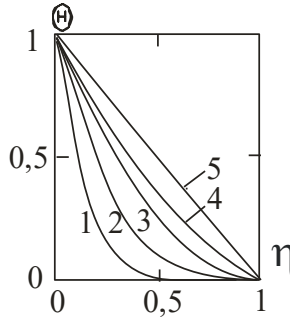


Рис. 2. Безрозмірний температурний профіль за вільного стікання на різній відстані від нанесення збурення за співвідношеннями (14), (16): цукровий розчин концентрацією 65%, температура насичення — 100 °С; об’ємна щільність зрошення $\Gamma_v = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$. Крива № 3 розрахована за співвідношенням (8) і відповідає умові $\xi = \xi_m$. Криві 1, 2 розраховані за співвідношенням (16). Криві 4, 5 — за (14): 1 — $\xi = 40$; 2 — 120; 3 — 235; 4 — 350; 5 — 1000

густина теплового потоку на стінці в області $\xi \leq \xi_m$:

$$q_1(\xi)_{\eta=0} = -\lambda \frac{t_{cm}-t_i}{\delta} \frac{d\theta}{d\eta_{\eta=0}} = \lambda \frac{t_{cm}-t_i}{2\delta\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{Pe}{\xi}}. \quad (18)$$

Невизначеною залишається температура плівки на міжфазній поверхні плівки t_i , яка входить у вираз для густини теплового потоку. Для знаходження температури t_i відповідно до (10) необхідно знати концентрацію розчину на міжфазній поверхні $C_i = C(\delta, x)$.

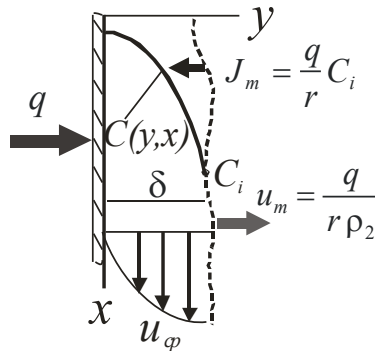


Рис. 3. Схема розподілу концентрації в плівці з випаровуванням з міжфазної поверхні

У процесі випаровування з міжфазної поверхні утворюється нормальний до міжфазної поверхні потік маси розчиненого компонента $J_m = \frac{q}{r} C(\delta, x)$, який дифундує вглибину плівки завдяки молекулярній і турбулентній дифузії. Тоді умову рівноваги потоків на міжфазній поверхні запишемо як:

$$-D_m \frac{\partial C(\delta, x)}{\partial y} = \frac{q}{r\rho} C(\delta, x), \quad (19)$$

де D_m — коефіцієнт молекулярної дифузії; r — теплота фазового перетворення. На теплообмінні поверхні ($y = 0$) поперечний потік маси відсутній, тому $\frac{\partial C(0,x)}{\partial y} = 0$. Оскільки зростання концентрації на міжфазній поверхні $C_i = C(\delta, x)$ супроводжується падінням густини теплового потоку q , їх добуток в області густих розчинів змінюється мало, тому з певним наближенням можна прийняти, що нормальний до міжфазної поверхні потік маси J_m в рамках одного міжхвильового циклу є величиною постійною:

$$\frac{q}{r} C_i | y = \delta = J_m = const. \quad (20)$$

Якщо спростити (3), замінивши параболічний профіль швидкості на постійне значення, а в коефіцієнті дифузії для в'язкої ламінарної плівки залишити лише молекулярну складову (без турбулентності):

$$\bar{u} \frac{\partial C(x,y)}{\partial x} = D_m \frac{\partial^2 C(x,y)}{\partial y^2}, \quad (21)$$

то приходимо до задачі дифузії (теплопровідності) з граничними умовами другого роду з точним (відомим) розв'язком рівняння (17) для розподілу концентрації розчиненого компонента в перетині і плівки:

$$C(\eta, \xi) = C_o + \frac{2J_m}{\rho D_m} \sqrt{\frac{D_m x}{\bar{u}}} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{(\delta-y)^2 \bar{u}}{4D_m x}\right) - \frac{(\delta-y)}{2\sqrt{D_m \frac{x}{\bar{u}}}} \operatorname{erfc}\left(\frac{(\delta-y)}{2\sqrt{D_m \frac{x}{\bar{u}}}}\right) \right\},$$

або в безрозмірному вигляді:

$$C(\eta, \xi) = C_o + \frac{2J_m \delta}{\rho D_m} \sqrt{\frac{4\xi}{Pe_m}} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{(1-\eta)^2}{\frac{16\xi}{Pe_m}}\right) - \frac{(1-\eta)}{2\sqrt{\frac{4\xi}{Pe_m}}} \operatorname{erfc}\left(\frac{(1-\eta)}{2\sqrt{\frac{4\xi}{Pe_m}}}\right) \right\}, \quad (22)$$

де $Pe_m = \frac{4\Gamma_v}{D_m}$ — число Пекле дифузійне; C_o — початкова концентрація на початку циклу при $\xi = 0$.

Концентрацію на міжфазній границі $C_i(\xi)$ знаходимо з рівняння (22) при $\eta = 1$:

$$C_i(\xi) = C_o + \frac{4J_m \delta}{\rho D_m \sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{\xi}{Pe_m}}. \quad (23)$$

Функція підвищення температури кипіння на міжфазній поверхні внаслідок дії фізико-хімічної температурної депресії для цукрового розчину в діапазоні концентрацій $0,37 < C < 0,75$ (в частках від одиниці) виражається як:

$$\Delta_i(\xi) = 16,22 \frac{T^2}{r} \left(\frac{C_i(\xi)}{0,62655 - 0,695 C_i(\xi)} \right), \quad (24)$$

а в діапазоні концентрацій $0,75 < C < 0,85$:

$$\Delta_i(\xi) = \left(1156,9 - 6322 C_i(\xi) + 1,3 \cdot 10^4 C_i^2(\xi) - \right. \\ \left. - 11920 C_i^3(\xi) + 4134 C_i^4(\xi) \right) 16,22 \frac{T^2}{r}. \quad (25)$$

За наявності рухомого парового ядра над поверхнею плівки має місце пригнічення температурної депресії, що враховується функцією (Петренко, Прядко, Рябчук, & Глоба, 2018):

$$H_d = \exp(-1,07 \cdot 10^{-2} \sqrt{We^3 Pe}), \quad (26)$$

де $We = \frac{\rho_2 u_2^2 d}{\sigma}$ число Вебера; u_2 — швидкість пари; ρ_2 — густина пари; σ — поверхневий натяг; d — діаметр труби.

Графіки наростання концентрації та фізико-хімічної температурної депресії для цукрового розчину в межах одного міжхвильового циклу наведено на рис. 4.

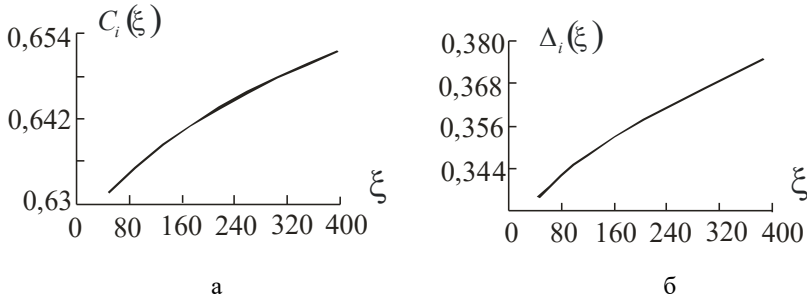


Рис. 4. Графіки наростання концентрації на міжфазній поверхні $C_i(\xi)$ (а) та фізико-хімічної температурної депресії $\Delta_i(\xi)$ (б) для цукрового розчину в межах одного міжхвильового циклу: початкова середня концентрація цукрового розчину 62%; температура стінки труби 107 °С; температура насичення 100 °С

Тоді розподілення густини теплового потоку на стінці теплообмінного каналу на ділянці між двома рідинними напливами (великими хвилями) виразиться співвідношеннями:

$$q_1(\xi)_{\eta=0} = \lambda \frac{t_{cm} - t_{sat} - \Delta_i(\xi) H_d}{2\delta\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{Pe}{\xi}}, \quad (27)$$

при $\xi \leq \xi_m$, та

$$q_2(\xi)_{\eta=0} = \lambda \frac{t_{cm} - t_{sat} - \Delta_i(\xi) H_d}{\delta} \left\{ \frac{Pe}{8} \left[\frac{R_1 - 1}{R} + \frac{1}{R} \exp\left(-\frac{\xi_m}{D}\right) \right] \exp\left(\frac{\xi_m - \xi}{R}\right) + 1 \right\} \quad (28)$$

при $\xi \geq \xi_m$.

Графіки зміни густини теплового потоку в межах одного між хвильового циклу, розраховані за співвідношеннями (23), (24), (27) і (28), наведені на рис. 5, а за декілька циклів — на рис. 6.

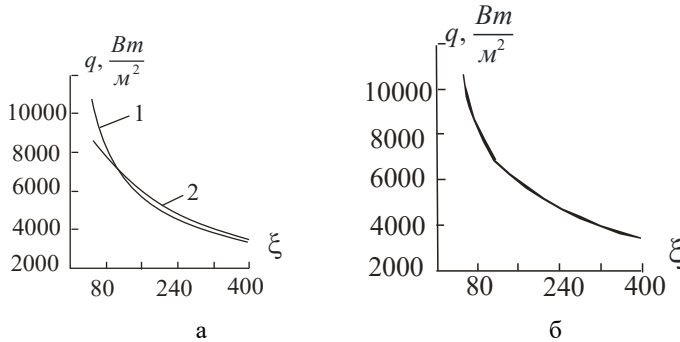


Рис. 5. Залежність зміни густини теплового потоку від довжини в межах міжхвильової паузи: температура насичення $t_{нас} = 100$ °С; температури стінки труби $t_{cm} = 107$ °С; об'ємна щільність зрошення $\Gamma_v = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$; середня концентрація розчину на вході 62%; $Pe = 10120$; $Re = 424$; $Pr = 24$. 1 — $q = f(\xi)$ за (27); 2 — $q = f(\xi)$ за (28)

Товщина плівки, яка входить в рівняння (27) і (28), розраховується з рівняння:

$$\Gamma_v = \frac{\tau_i \delta^2}{2\rho\nu} + \frac{g\delta^3}{3\nu} \quad (29)$$

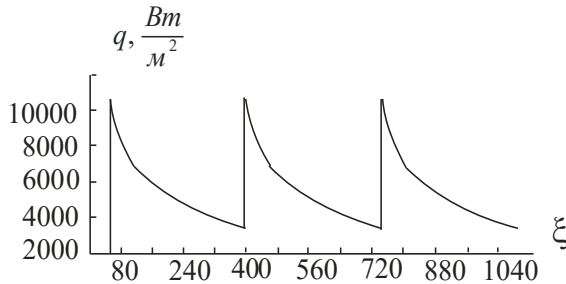


Рис. 6. Циклічність зміни густини теплового потоку за наявності рідинних напливів під час концентрування плівки розчину: розрахунок за співвідношеннями (23)—(28). Умови, аналогічні наведеним на рис. 5

Середня густина теплового потоку на ділянці між двома рідинними напливами (великими хвилями) виразиться як середньозважена зі співвідношення:

$$\bar{q} = \frac{\bar{q}_1(\xi_m - \xi_o) + \bar{q}_2(\xi - \xi_m)}{\xi - \xi_o} \quad (30)$$

де $\bar{q}_1 = \frac{1}{\xi_m - \xi_o} \int_{\xi_o}^{\xi_m} q_1(\xi) d\xi$; $\bar{q}_2 = \frac{1}{\xi - \xi_m} \int_{\xi_m}^{\xi} q_2(\xi) d\xi$ — середні значення густини теплового потоку між двома великими хвилями на ділянках відповідно $(\xi_o - \xi_m)$ та $(\xi_m - \xi)$. Загальну відстань, на якій розвивається температурний профіль, $(\xi - \xi_o)$ виразимо як $\xi = \frac{L_w}{\delta} + \xi_m$. Величина ξ_o ділить простір довжиною ξ на ділянки: $(\xi_o - \xi_m)$, де має місце неусталений профіль швидкості з максимальним температурним градієнтом на стінці, та $(\xi_m - \xi)$, де має місце усталений параболічний профіль швидкості з меншим температурним градієнтом. Тому координату ξ_o можна розглядати як параметр кореляції при обробці експериментальних даних з тепловіддачі до плівки розчину в режимі випаровування з міжфазної поверхні, періодично збуреною великими напливними хвилями. Відстань між напливними хвилями в області витратних параметрів, за яких має місце ламінарний режим руху плівки L_w знаходиться в межах 120 мм. Середньоінтегральні значення густин теплового потоку \bar{q}_1 та \bar{q}_2 з виразів (27) та (28) знаходяться чисельним інтегруванням в прикладному пакеті MathCad.

У процесі обробки експериментальних даних з теплообміну під час концентрування густих плівок з розвинутою системою великих хвиль (напливів) підбирались значення ξ_o , за яких розрахункові величини густини теплового потоку, розраховані за (30), збігалися з експериментальними. В результаті отримано кореляційні залежності для ξ_o коректних в діапазоні зміни чисел Прандтля та Пекле, відповідно, $Pr = 10 \dots 70$, $Pe = 3000 \dots 24000$ в умовах вільного стікання по вертикальній поверхні при відсутності поверхневого кипіння (31)—(33):

при $Pr \leq 25$:

$$\xi_o = 1,15 [f(Pr)(3 \cdot 10^{-4} Pe - 0,7)] \exp[-0,37(3 \cdot 10^{-4} Pe - 0,7)^{1,2}], \quad (31)$$

де

$$f(Pr) = -39,051 + 11,525 Pr - 0,51 Pr^2 + 8,111 \cdot 10^{-3} Pr^3; \quad (32)$$

при $25 \leq Pr \leq 70$:

$$\xi_o = [65,62(3 \cdot 10^{-4}Pe - 0,7)] \exp\{-(3 \cdot 10^{-4}Pe - 0,7)^{1,2}[0,37 - 0,07(1 - \exp(-0,03Pe))^5]\}. \quad (33)$$

Графічно залежності (31)—(33) наведено на рис. 7.

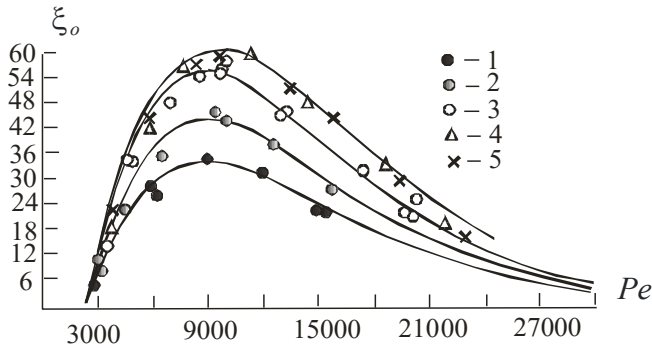


Рис. 7. Залежність $\xi_o = f(Pe)$ для вільностікаючих плівок цукрових розчинів під час випаровування з міжфазної поверхні при температурі насичення 100°C : 1 — $Pr = 10$; 2 — 14; 3 — 24; 4 — 43,5; 5 — 70. Лінії — розрахунок за (31)—(33)

Результати розрахунків середньої густини теплового потоку за співвідношеннями (23)—(33) та порівняння з експериментальними даними наведено на рис. 8.

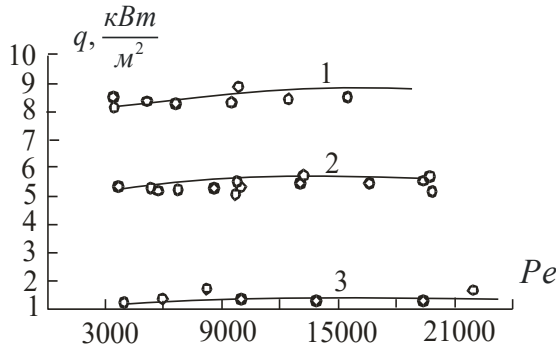


Рис. 8. Залежність $q = f(Pe)$ для вільностікаючих плівок цукрових розчинів під час випаровування з міжфазної поверхні при температурі насичення 100°C : концентрації розчинів: 1 — $CP = 55\%$, $Pr = 14$; 2 — 62% , $Pr = 24$; 3 — 72% , $Pr = 70$; $t_{cm} = 107^\circ\text{C}$

Запропонована модель теплоперенесення в плівці, циклічно збуреній напливними або великими хвилями, може бути використана і для аналізу процесів теплоперенесення в плівках, періодично збурених штучними інтенсифікаторами теплообміну.

Висновки

1. Основним фактором падіння інтенсивності теплообміну в густих ламінарних плівках розчинів у процесі їх концентрування є утворення на міжфазній поверхні прошарку розчину з високою концентрацією, яка спричиняє стрімке зростання фізико-хімічної температурної депресії і, як наслідок, зменшення корисного температурного напору.

2. Напливні великі хвилі на поверхні ламінарних густих плівок періодично переміщують плівку, циклічно порушуючи упорядковану структуру профілів швидкості, температури та концентрації, що є фактором, який інтенсифікує теплообмін для густих ламінарних плівок розчинів.

3. Отримані аналітичні вирази для теплового та концентраційного полів у плівці в результаті наближених розв'язків диференціальних рівнянь конвективної теплопровідності та дифузії для плівки на основі запропонованої математичної моделі теплоперенесення в ламінарних, збурених напливними хвилями плівок, як послідовність циклічних процесів порушення та відновлення температурного, швидкісного та концентраційного полів у період міжхвильової паузи.

4. Запропонована кореляція для узагальнення експериментальних даних з тепловіддачі до висококонцентрованих ламінарних плівок розчинів, циклічно збурених хвильовими напливами під час пароутворення.

Література

Петренко, В. П. (2009). Параметри ламінарних гравітаційно стікаючих плівок рідини на ділянці гідродинамічної стабілізації. *Наукові праці НУХТ*, 29, 66—70. <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/1667>.

Петренко, В. П., Рябчук, О. М., Бурлака, В. І. (2014). Режими погіршеної тепловіддачі в плівкових випарних апаратах. *Цукор України*, 9(105), 27—34. <http://dev.ukrsugar.com/uk/post/cukor-ukraini-no9-105>.

Прядко, М. О., Глоба, О. В., Форсюк, А. В., Глоба, В. З. (2015). Плівкові течії в трубах випарних апаратів для яблучного соку. *Наукові праці НУХТ*, 21(2), 168—175. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npukht_2015_21_2_23.

Петренко, В. П., Прядко, М. О., Рябчук, О. М., Глоба, О. В. (2018). Тепловіддача при випарувальному концентруванні розчинів у вертикальних низхідних кільцевих потоках. *Наукові праці НУХТ*, 24(1), 154—166. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npukht_2018_24_1_20.

Alhuseini, A. A., Chen, J. C. (2000). Transport phenomena in turbulent falling film. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 39(6), 2091—2100. <https://doi.org/10.1021/ie9906013>.

Chattopadhyaya, S., Mukhopadhyaya, A., Barua, A. K., and Gaonkar, A. K. (2021). Thermocapillary instability on a film falling down a non-uniformly heated slippery incline. *Int. J. Non-Linear Mech.*, 133, 103718. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2021.103718>.

Choudhury, A., Samanta, A. (2023). Thermocapillary instability for a shear-imposed falling film. *Physical Review Fluids*, 8(9), 94006. <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.8.094006>.

Denner, F., Charogiannis, A., Pradas, M., Christos, N., Berend G. M., van Wachem. (2018). Solitary waves on falling liquid films in the inertia-dominated regime. *Journal of Fluid Mechanics*, 837, 491—519. <https://doi.org/10.1017/jfm.2017.867>.

Kostoglou, M., Samaras, K., Karapantsios, T. D. (2010). Large wave characteristics and their downstream evolution at high reynolds number falling film. *AIChE Journal*, 56(1), 11—23. <https://doi.org/10.1002/aic.11992>.

Malamataris, N. A., Balakotaiah, V. (2008). Flow structure underneath the large amplitude waves of averidally falling film. *AIChE Journal*, 54(7), 1725—1740. <https://doi.org/10.1002/aic.11506>.

Mascarenhas, N., Mudawar, J. (2013). Study of influential waves on heat transfer in turbulent falling films. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 67, 1106—1121. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.08.100>.

Mascarenhas, N., Mudawar, I. (2013). Investigation of eddy diffusivity and heat transfer coefficient for free-falling turbulent liquid films subjected to sensible heating. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 64, 647—660. <https://engineering.purdue.edu/mudawar/files/articles-all/2013/2013-06.pdf>.

Mukhopadhyay, A., Chattopadhyay, S. (2018). Long wave instability of thin film flowing down an inclined plane with linear variation of thermophysical properties for very small Biot number. *Int. J. Non-Linear Mech.*, 100, 20. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2018.01.005>.

Nguyen, L., Balakotaiah, V. (2000). Modelling and experimental studies of wave evolution on free falling viscous films. *Phys. Fluids*, 12, 2236. <https://doi.org/10.1063/1.1287612>.

Malamataris, N. A., Balakotaiah, V. (2008). Flow structure underneath the large amplitude waves of a vertically falling film. *AIChE Journal*, 54, 7, <https://doi.org/10.1002/aic.11506>.

Petrenko, V., Pryadko, M., Ryabchuk, O. (2020). Modeling heat transfer in down flowing annular weakly turbulent vapor-liquid flows during evaporation. *Ukrainian Food Journal*, 9(4), 901—916. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2020-9-4-14>.

Petrenko, V., Pryadko, M., Zasyadko, Y., Ryabchuk, O. (2016). Heat transfer to down flowing films with Evaporation from the interface. *International Journal of Science Invention*, 5(6), 36—43.

Samanta, A. (2019). Optimal disturbance growth in shear-imposed falling film. *AIChE Journal*, 66, 5. <https://doi.org/10.1002/aic.16906>.

Samanta, A. (2020). Optimal disturbance growth in shear-imposed falling film. *AIChE Journal*, 66, e16906. <https://doi.org/10.1002/aic.16906>.

Zhou, G., Prosperetti, A. (2020). Capillary waves on a falling film. *Phys. Rev. Fluids*, 5, 114005. <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.5.114005>.

Usha, R., Chattopadhyay, G., Tiwari, N. (2020). Evolution of a thin film down an incline: A new perspective. *Phys. Fluids*, 32, 013603. <https://doi.org/10.1002/aic.16906>.

EFFECT OF TABLET DENSITY ON ITS STRENGTH AND COMPRESSION FORCE

O. Zomenko, O. Gubenia

National University of Food Technologies

Key words:

Tablet
Press
Strength
Quality
Force

Article history:

Received 17.07.2025
Received in revised form
31.07.2025
Accepted 18.08.2025

Corresponding author:

O. Gubenia
E-mail:
gubena@meta.ua

Citation: Зьоменко О. С., Губеня О. О. (2025). Вплив густини таблетки на її міцність і зусилля пресування. *Наукові праці НУХТ*, 31(4), 172—181.
DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-4-14

ABSTRACT

The aim of research was to determine the effect of tablet density on its strength and compression force.

For strength analysis, samples of cylindrical tablets based on microcrystalline cellulose and lactose monohydrate were used, the diameter of the tablets was 10 mm, the height was 3 mm. The tablets were prepared on a Korsch XL 100 rotary type tablet press at a rotor Rotational frequency of 40 rpm. The strength of the tablet was determined by the destructive stress during compression in the diametrical direction.

The strength of the tablet had a complex dependence on its density. Three zones were distinguished, where the change in strength was described by different laws:

I — the strength of the tablet increased proportionally to its density;

II — with an increase in the density of the tablet, its strength increased faster, the type of dependence was parabolic. The conditional transition from zone I to zone II occurred at a tablet density of 2 g/cm³. For some materials, zone I was slightly distinguished, and the entire dependence can be considered parabolic, with a higher density increasing the tablet strength more intensively.

III — the increase in strength slowed down, and after reaching a certain tablet density, the strength decreased. The maximum strength of the studied tablets was 4.6 MPa, and the recommended working strength was 1.5—3 MPa.

At a density value of more than 4 g/cm³, the tablet strength decreased, and such a type of defect as delamination occurred.

At a density of up to 1.6 g/cm³, the tablet had low strength, crumbles in the hands or collapsed during the abrasion test. Such a tablet will not withstand subsequent coating, packaging and transportation operations.

Data on the strength and pressing force of the tablet are important when choosing pressing modes, as well as calculating and designing pressing units and the press drive. During design, it is necessary to take into account that significant fluctuations in the pressing force cause uneven machine operation.

ВПЛИВ ГУСТИНИ ТАБЛЕТКИ НА ЇЇ МІЦНІСТЬ І ЗУСИЛЛЯ ПРЕСУВАННЯ

О. С. Зьоменко, О. О. Губеня

Національний університет харчових технологій

Мета досліджень — визначити вплив густини таблетки на її міцність та зусилля пресування. Для аналізу міцності використовували зразки таблеток циліндричної форми на основі мікрокристалічної целюлози та моногідрату лактози, діаметр таблеток 10 мм, висота — 3 мм. Таблетки виготовлялися на промислово-му пресі роторного типу Korsch XL 100 при частоті обертання ротора 40 об/хв. Міцність таблетки визначалася за величиною руйнівного напруження під час стискання в діаметральному напрямку.

Міцність таблетки має складну залежність від її густини. Виділяються три зони, де зміна міцності описується різними законами: I — міцність таблетки зростає пропорційно до її густини; II — зі збільшенням густини таблетки її міцність зростає швидше, тип залежності – параболічний. Умовний перехід від зони I до зони II відбувається при густині таблетки 2 г/см³. Для деяких матеріалів зона I виділяється незначно, і всю залежність можна вважати параболічною, причому при більшій густині міцність таблетки зростає інтенсивніше; III — зростання міцності сповільнюється, і після досягнення певної густини таблетки міцність знижується. Максимальна міцність досліджуваних таблеток складала 4,6 МПа, а рекомендована робоча міцність — 1,5–3 МПа.

При значенні густини понад 4 г/см³ міцність таблетки знижується, і виникає такий вид браку, як розшиарування. При густині до 1,6 г/см³ таблетка має низьку міцність, розсипається у руках або руйнується під час тесту на стираність. Така таблетка не витримає операцій нанесення покриття, пакування і транспортування.

Дані про міцність і зусилля пресування таблетки важливі при виборі режимів пресування, а також розрахунку і проектуванні вузлів пресування і приводу преса. Під час проектування необхідно врахувати, що значне коливання зусилля пресування викликає нерівномірність ходу машини.

Ключові слова: таблетка, прес, міцність, якість, зусилля.

Постановка проблеми. Міцність таблетки (або межа міцності, англ. — tensile strength) як один із якісних показників таблетки — це напруження, при якому руйнується таблетка, стиснута в діаметральному напрямку (Augsburger et al., 2008; European pharmacopoeia, 2024). Значення міцності визначається на приладі зі стандартизованими розмірами робочих елементів (рис. 1): таблетка стискається в діаметральному напрямі, фіксується зусилля, при якому таблетка зруйнувалася, і розраховується руйнівне напруження:

$$\sigma_p = \frac{P}{d \cdot h}, \text{ Па}, \quad (1)$$

де P — руйнівне зусилля, Н; d — діаметр таблетки, м; h — висота таблетки, м.

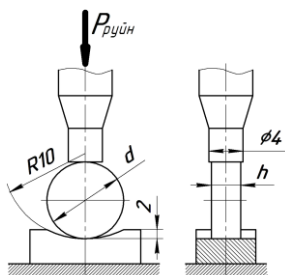


Рис. 1. Схема прикладання навантажень під час визначення міцності таблетки

Величина міцності таблетки є важливою з точки зору:

- забезпечення показників технологічності (цілісності) після пресування у таких технологічних операціях, як транспортування, нанесення покриття, пакування у блістерну та іншу упаковку, а також під час транспортування, зберігання і реалізації (Natoli et al., 2017; 2023; Siiriä et al., 2011);

- зручності, функціональності, біодоступності та безпечності під час вживання (Gordiienko et al., 2015). Показник міцності визначає зусилля, з яким таблетка розкошується, швидкість вивільнення АФІ тощо.

Дані про зусилля пресування таблетки необхідні для розрахунку і проектування деталей і вузлів обладнання, зокрема найбільш навантажених елементів роторного пресу — пуансонів і матриць, пресувального ролика і його підшипникових опор, елементів приводу і з'єднань. Враховуючи те, що за один оберт роторного стола пресується від 20 до 120 таблеток, зміна напруження є високоциклічною, що потрібно враховувати під час проектування й удосконалення конструкцій пресів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Значення міцності таблетки не регулюється нормативними документами та Фармакопеями (Pharmaeducation, 2024), і встановлюється розробником (CDER, 2015). Може регулюватися діапазон відхилення міцності від заданої, зазвичай це $\pm 5\%$. У різних джерелах вказується, що бокове (діаметральне) зусилля, при якому таблетка руйнується, складає від 40 до 100 Н, а міцність, як похідна від нього, залежить від розміру таблетки (Pharmaeducation, 2024). Наприклад, міцність може коливатися у робочому діапазоні від 1,5 до 2,5 МПА.

На міцність таблетки впливає її рецептура, вид гранулювання, форма і розмір гранул (Adeleye et al., 2019; Augsburg et al., 2008; Vymet et al., 2015; Gordiienko et al., 2015). Проте виробник, маючи гранулят певної рецептури, форми та способу виготовлення, досягає заданої міцності таблетки на стадії пресування, регулюючи ступінь пресування.

Зазвичай, ступінь пресування (відношення початкової до кінцевої висоти таблетки) складає від 1,4 до 3 (Podczeczek et al., 2007; Swarbrick et al., 2007), хоча окремі джерела вказують значення 4—6 (Çelik et al., 2019).

Для досягнення потрібного ступеня пресування таблетки в матриці необхідно прикласти зусилля. Виробники пресів вказують граничне зусилля пресування для певного типу обладнання. В інноваційних пресах передбачена зупинка при перевищенні максимального зусилля для уникнення аварій. Наприклад, максимальне

зусилля основного пресування у пресі роторного типу Korsch XL100 складає 60 кН (Korsch, 2025).

Для вказаного вище діапазону ступеня пресування зусилля, зазвичай, складає 1—3 кН. Для зручності порівняння частіше використовують поняття «Тиск пресування» (англ. «Compaction pressures») (Manufacturingchemist, 2020). Тиск пресування від 100 до 200 МПа є типовим для фармацевтичних таблеток, оскільки вони містять менше 10% АФІ та високий відсоток зв'язувальних речовин. Тиск понад 200 МПа використовують для таблеток харчових добавок з високим відсотком активних інгредієнтів. Міцність таблетки 1—2 МПа, зазвичай, є достатньою, щоб таблетка залишалася цілою після пресування в операціях нанесення покриття, транспортування і пакування (Грудько та ін., 2024).

У літературних джерелах залежність міцності таблеток часто наводиться в окремих діапазонах зусилля (тиску) пресування або густини таблетки (Adeleye, 2019; Manufacturingchemist, 2020; Sinka et al., 2007). На початковому етапі пресування міцність таблетки зростає за лінійною залежністю, а далі зростання міцності прискорюється. При високому тиску пресування міцність таблетки перестає зростати або знижується (Giannis et al., 2021; Sinka et al., 2007). При високих тисках пресування можуть погіршуватися інші якісні показники таблетки, зокрема підвищується стиранність і виникає розшарування таблетки (Augsburger et al., 2008).

Потребують додаткових досліджень питання визначення міцності таблетки в широкому діапазоні тиску пресування, зважаючи на фактори, що знижують якість таблетки під час пресування на пресах роторного типу.

Мета досліджень: визначити вплив густини таблетки на її міцність і зусилля пресування.

Матеріали і методи. Для аналізу міцності використовували два зразки таблеток циліндричної форми:

- зразок 1 — на основі мікрокристалічної целюлози;
- зразок 2 — на основі моногідрату лактози.

Діаметр таблеток 10 мм, висота — $3 \pm 0,1$ мм.

Густина грануляту:

- зразок 1 — $0,8 \text{ г/см}^3$;
- зразок 2 — $0,76 \text{ г/см}^3$.

Зразки таблеток виготовлялися у промислових умовах на пресі роторного типу Korsch XL 100. Тип пресінструменту — В (Korsch, 2025).

Умови експерименту:

- частота обертання ротора — 40 об/хв;
- густина таблетки — $1,06\text{—}4,25 \text{ г/см}^3$.

Відбирання таблеток відбувалося після налаштування дози грануляту в матриці, відповідної густини таблетки та виходу обладнання у стабільний режим роботи (після п'яти обертів роторного стола).

Для проведення випробування на міцність відбиралися партії по 10 таблеток.

Налаштування густини таблеток: оскільки висота таблетки була постійною (3 мм), то маса таблетки налаштовувалася положенням нижнього копіру на ділянці дозування, що, відповідно, визначає масу грануляту в матриці.

Ступінь пресування, який є пропорційним густині i , відповідно, висоті грануляту і матриці, визначали як відношення густини грануляту до густини кінцевої таблетки.

Зусилля пресування таблеток у таблетпресі Korsch XL 100 вимірюється системою тензодатчиків, які встановлені в опорах пресувального ролика. Максимальне зусилля під час пресування таблетки реєструється автоматично і відображається на дисплеї пульта керування.

Максимальне зусилля фіксувалося один раз під час виготовлення однієї партії таблеток при досягненні ними постійної маси.

Міцність таблеток визначали на приладі ТВТ фірми «Ервека» (Pharmaeducation, 2024). Таблетку стискали в діаметральному напрямку до моменту руйнування та вимірювали руйнівне зусилля P_p (рис. 1). За руйнівним зусиллям розраховували руйнівне напруження σ_p , яке є показником міцності:

$$\sigma_p = \frac{P}{d \cdot h}, \text{ Па,}$$

де P — руйнівне зусилля, Н; d — діаметр таблетки, мм; h — висота таблетки, мм.

Точність вимірювань становила 1 Н. Кожне випробування повторювалося 10 разів.

Викладення основних результатів дослідження. Вплив густини на зовнішні якісні показники таблетки. Таблетки густиною до $1,1 \text{ г/см}^3$ руйнувалися в руках при незначному навантаженні або у ємкості під час її незначних коливань (табл. 1). Вони непридатні для транспортування, оброблення в подальших технологічних операціях і для споживання.

Таблиця 1. Примітки щодо якості таблетки, зроблені під час тестування на міцність

Маса, мг	Густина, г/см^3	Примітка
100	1,06	Таблетка руйнується в руках
150	1,59	Таблетка зруйнувалась після тесту на стиранність
400	4,25	Під час таблетування спостерігається розшарування (відколювання верхньої частини таблетки)

Таблетки густиною орієнтовно від $1,1$ до 2 г/см^3 руйнуються у приладі для визначення стиранності. Відповідно, вони не відповідають фармакопейним показникам якості та тим, які рекомендуються дослідниками. Таблетки більшої густини вже мають достатню міцність і відповідають показникам стиранності.

Проте зі збільшенням густини таблетки понад 4 г/см^3 виникає такий вид браку, як розшарування — верхня частина таблетки відколюється у вигляді тонкого шару на етапі пресування, подальших технологічних операцій, а також випробуванні на стиранність.

Отже, густина таблеток, для яких раціонально проводити випробування міцності, лежить у діапазоні від 2 до 4 г/см^3 .

Вплив густини на міцність таблеток. Графічна залежність міцності таблеток від її густини показана на рис. 2.

Загалом, можна виділити три зони, де ця залежність описується різними законами:

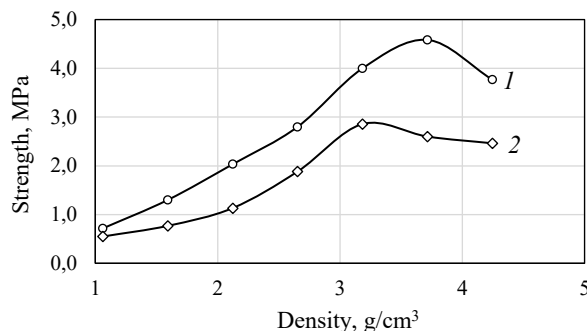


Рис. 2. Вплив густини таблетки на її міцність: 1 — зразок 1; 2 — зразок 2

- зона I — міцність таблетки зростає майже пропорційно до її густини;
 - зона II — міцність зі збільшенням густини таблетки зростає більш інтенсивно, тип залежності – параболічний. Умовний перехід від зони I до зони II відбувається при густині таблетки 2 г/см^3 . Для зразка 2 зона I виділяється незначно, і всю залежність можна вважати параболічною, причому зі збільшенням густини міцність таблетки зростає інтенсивніше;

- зона III — зростання міцності сповільнюється, і після досягнення певної густини таблетки міцність знижується. Для зразка 1 максимальна міцність таблетки складала $4,6 \text{ МПа}$ при густині таблетки $3,7 \text{ г/см}^3$, а для зразка 2 — $4,6 \text{ МПа}$ при $3,7 \text{ г/см}^3$. Варто зауважити, що в цій зоні якість таблетки стає незадовільною — виникає її розшарування і відколювання частинок.

Збільшувати під час експерименту ступінь пресування і, відповідно, густину таблеток понад $4\text{—}5 \text{ г/см}^3$ недоцільно, тому що тиск пресування досягає значних значень, і, відповідно, велике зусилля пресування призводить до руйнування прес-інструменту, деталей і вузлів роторного таблеткового пресу — роликів, підшипників та підшипникових вузлів, кулачків (копірів), елементів приводу. Зауважимо, сучасні преси мають система захисту від перевантажень (Korsch, 2025).

Схожі результати отримані іншими дослідниками (Manufacturingchemist, 2020; Sinka et al., 2007), проте діапазон значень густини таблетки або ступеня пресування у них, зазвичай, обмежений і стосується лише зони II, а міцність таблеток під час експериментів досягала робочих значень — $0,5\text{—}2,5 \text{ МПа}$. Зробивши припущення, що густина має залежність, близьку до лінійної, у межах тиску пресування від 50 до 200 МПа (рис. 3, 4), констатуємо подібність результатів для міцності таблеток на основі лактози, проте залежність міцності таблеток на основі мікрокристалічної целюлози є майже лінійною (Manufacturingchemist, 2020).

У (Yadav et al., 2007) наведено руйнівне зусилля в більшому діапазоні тиску пресування: руйнівне зусилля зростає за параболічною залежністю, а зі збільшенням тиску понад 200 МПа залишається незмінним. У цьому дослідженні міцність таблетки характеризується руйнівним зусиллям і не перераховується у напруження. Оскільки напруження пропорційне руйнівному зусиллю і залежить від розмірів таблетки, наведені дані корелюють з отриманими в нашому дослідженні.

Дослідники не завжди розділяють області I і II, іноді розглядаючи їх як єдину зону зростання міцності зі збільшенням густини, ступеня або тиску пресування.

Зважаючи на те, що збільшення міцності таблетки часто пояснюється дефрагментуванням часточок грануляту (Yadav et al., 2018) і збільшенням кількості зв'язків між окремими гранулами (Siirä et al., 2011), такі зони варто виділити — з перевищенням певного тиску кількість зв'язків інтенсивно зростає.

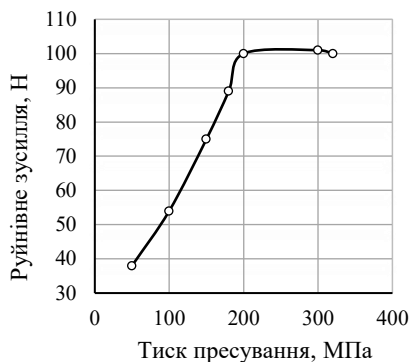


Рис. 3. Порівняння результатів впливу тиску пресування на міцність таблеток, адаптовано з (Yadav et al., 2018)

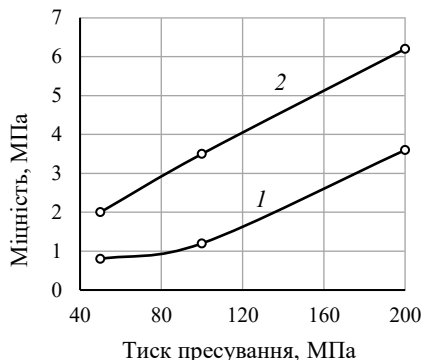


Рис. 4. Вплив тиску пресування на міцність таблеток на основі лактози (1) і мікрористалічної целюлози (2), адаптовано з (Manufacturing Chemist, 2020)

Зі збільшенням сили і, відповідно, тиску пресування деформовані на першому етапі частинки починають розпадатися на менші фрагменти, що призводить до утворення нових зон зв'язку між ними (Garekani et al., 2001). Маса грануляту ущільнюється з проникненням дрібніших фрагментів у порожнини між крупнішими.

Можна зробити припущення, що з перевищенням певного тиску утворилася максимальна кількість зв'язків, матеріал вже не представлений у вигляді окремих гранул і є суцільним, а його пористість прямує до мінімальних значень (Manufacturingchemist, 2020).

Отже, дані щодо міцності таблеток, отримані в цьому дослідженні, узгоджуються з даними, які отримали інші дослідники для таблеток різної рецептури.

Вплив густини таблеток на зусилля пресування. Вплив густини таблеток на зусилля пресування (або тиск пресування) (рис. 5) описується параболічною залежністю, яка незначно відрізняється від лінійної. Зусилля пресування зростає швидше при більшій густині таблеток.

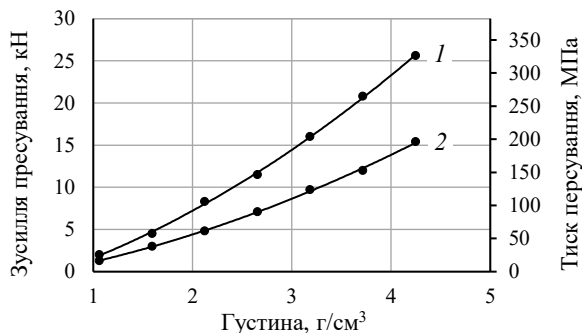


Рис. 5. Вплив густини таблетки на зусилля пресування: 1 — зразок 1; 2 — зразок 2

Криві зусилля основного пресування (рис. 5) добре описуються відомими функціями — рівнянням прямої або параболи.

Розраховані коефіцієнти лінійної і параболічної функцій для кривих 1 і 2 (таблиця 2).

Таблиця 2. Математичне опрацювання результатів для основного зусилля пресування

	Лінійне рівняння	R ²	Рівняння 2-го ступеня (парабола)	R ²
Крива 1	$y = 7,47x - 7,16$	0,990	$y = 0,80x^2 + 3,19x - 2,39$	0,999
Крива 2	$y = 4,38x - 4,03$	0,989	$y = 0,49x^2 + 1,78x - 1,2$	0,999

Обидва види рівнянь достатньо точно описують закономірності, проте квадратне рівняння є більш точним, тому що величина достовірності апроксимації R² для нього є більшою.

Інші дослідники повідомляють про схожі, близькі до прямої залежності зусилля (тиску) пресування від густини таблетки (Manufacturingchemist, 2020; Sinka et al., 2007).

Не підтверджені очікування щодо різкого зростання зусилля пресування при досягненні таблеткою певної густини. Ймовірно, в умовах експерименту для густини до 5 г/см³ все ще відбувається фрагментування грануляту і проникнення дрібних часточок у простір між крупними, таблетка має певну пористість, а її розмір зменшується не лише за рахунок пружної та пластичної деформації, а також за рахунок розподілу дрібних частинок грануляту між крупними (Yadav et al., 2018). Зауважимо, що після досягнення густини 3—4 г/см³ міцність таблетки перестає зростати або навіть знижується (Siiriä et al., 2011).

На основі отриманих залежностей покажемо, як змінюється зусилля пресування таблетки на таблетпресі роторного типу. Прийmemo орієнтовні дані:

- частота обертання роторного стола — 40 об/хв;
- густина грануляту (зразок 1) — 0,8 г/см³;
- товщина готової таблетки — 3 мм;
- густина готової таблетки — 2,4 г/см³;
- необхідна міцність таблетки — 2,5 МПа.

Згідно з результатами експериментальних досліджень (рис. 2), ступінь пресування таблетки має складати 3. За таких умов початкова висота шару грануляту в матриці складатиме 9 мм, а хід верхнього і нижнього пуансонів — 4,5 мм.

За результатами експериментальних досліджень (рис. 5), максимальне зусилля пресування для зразка 1 складатиме 0,95 кН, а зусилля пресування зростає за параболічною залежністю (табл. 3).

При частоті обертання роторного стола 40 об/хв і кількості матриць 60 цикл пресування складає 0,67 с, а час пресування — 0,2 с.

Схема процесу пресування (Sinka et al., 2007) із застосуванням пресінструменту класу В і пресувального ролика діаметром 300 мм, а також зміна зусилля пресування у часі зображені на рис. 6.

Пресування таблетки в матриці починається в момент контакту криволінійної частини головки пуансона з пресувальним роликом (точка А), і збільшується за параболічною залежністю до досягнення верхнім пуансоном крайнього нижнього положення (точка В). Максимальне значення зусилля — 0,95 кН.

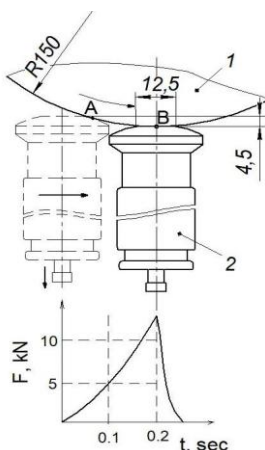


Рис. 6. Зміна зусилля пресування під час переміщення головки пуансона по пресувальному ролику

Протягом контакту плоскої частини головки пуансону з пресувальним роликом відбувається витримування таблетки. Зробимо припущення, що зусилля, яке діє на пуансон, швидко зменшується до нуля.

Отримана залежність може бути використана для розрахунку та проектування деталей і вузлів пресувального механізму і приводу пресу. Слід звернути увагу на нерівномірність навантаження на привід пресу та необхідність регулювання рівномірності ходу машини (Uicker et al., 2016).

Висновки

1. Міцність таблетки має складну залежність від її густини. Виділяються три зони, де зміна міцності описується різними законами:

- зона I — міцність таблетки зростає пропорційно до її густини;

- зона II — зі збільшенням густини таблетки її міцність зростає швидше, тип залежності — параболічний. Умовний перехід від зони I до зони II відбувається при густині таблетки 2 г/см^3 . Для деяких матеріалів зона I виділяється незначно, і всю залежність можна вважати параболічною, причому при більшій густині міцність таблетки зростає інтенсивніше;

- зона III — зростання міцності сповільнюється, і після досягнення певної густини таблетки міцність знижується. Максимальна міцність досліджуваних таблеток складала $4,6 \text{ МПа}$, а рекомендована робоча міцність — $1,5\text{—}3 \text{ МПа}$.

2. При значенні густини понад 4 г/см^3 міцність таблетки знижується, і виникає такий вид браку, як розшарування.

3. При густині до $1,6 \text{ г/см}^3$ таблетка має низьку міцність, розсипається у руках або руйнується під час тесту на стиранність. Така таблетка не витримає операцій нанесення покриття, пакування і транспортування.

4. Дані про міцність і зусилля пресування таблетки важливі при виборі режимів пресування, а також розрахунку і проектуванні вузлів пресування і приводу преса. Під час проектування необхідно врахувати, що значне коливання зусилля пресування викликає нерівномірність ходу машини.

Література

- Тригубчак, О. (2018). Дослідження оптимальних умов виготовлення таблеток кислоти ацетилсаліцилової з аторвастатином. *Ліки України*, 2, 7—10. http://www.health-medix.com/articles/liki_ukr_plus/2018-06-13/2.pdf.
- Трудько, С. С., Губеня, О. О., Десик, М. Г., Гавва, О. М. (2024). Пакування ліків у блистерну упаковку. *Упаковка*, 3, 28—31. <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/45234>.
- Adeleye, O. (2019). Relationship between compression pressure, mechanical strength and release properties of tablets. *Polymers in medicine*, 49(1), 27—33, <https://doi.org/10.17219/pim/111888>.
- Augsburger, L. L., Hoag, S. W. (2008). *Pharmaceutical dosage forms-tablets, third edition*. Taylor & Francis Grou.
- Bym, S., Futran, M., Hayden, T., Jayjock, E., Maron, N., Meyer, R., Myerson, A., Thien, M., Trout, B. (2015). Achieving Continuous Manufacturing for Final Dosage Formation: Challenges and How to Meet Them. May 20—21, 2014, Continuous Symposium, *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 104(3), 792—802, <https://doi.org/10.1002/jps.24247>.
- CDER (2015). Guidance for industry: size, shape, and other physical attributes of generic tablets and capsules, Center for Drug Evaluation and Research, United States Food and Drug Administration.
- Çelik, M. (2013). *Pharmaceutical Powder Compaction Technology*, CRC Press.
- Commission BP (2021). British pharmacopoeia 2021, Stationery Office.
- European pharmacopoeia (2025). Available at: <https://www.edqm.eu/en/web/edqm/european-pharmacopoeia>.
- Giannis, K., Schilde, C., Finke, J. H., Kwade, A. (2021). Modeling of high-density compaction of pharmaceutical tablets using multi-contact discrete element method. *Pharmaceutics*, 13(12), 2194. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13122194>.
- Gordiienko, O. I., Vronska, L., Melnyk, O. A., Groshovyi, T. A. (2015). Current state of creation, production and research of tablet medicinal products. *Pharmaceutical Review*, 1. <https://doi.org/10.11603/2312-0967.2015.1.3780>.
- Korsch (2025). XL100. All features of a large one. Режим доступу: <https://www.korsch.com/product-detail/pharma-nutraceuticals/xl100>.
- Manufacturingchemist (2020). Tabletability, compactability and compressibility: What's the difference? Режим доступу: <https://www.manufacturingchemist.com/tabletability-compactability-and-compressibility-what-s-the-difference--170761>.
- Natoli, D., Levin, M., Tsygan, L., Liu, L. (2017). Development, Optimization, and Scale-Up of Process Parameters, In: Developing Solid Oral Dosage Forms, Ed.: Yihong Qiu, Yisheng Chen, Geoff G. Z. Zhang, Lawrence Yu., Rao V. Mantri, 917—951, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802447-8.00033-9>.
- Pharmaeducation (2024). *Quality control tests of tablets or Evaluation of tablets*. Available at: <https://pharmaeducation.net/quality-control-tests-of-tablets-or-evaluation-of-tablets/>.
- Podczeck, F. (2007). Methods for the practical determination of the mechanical strength of tablets — from empiricism to science. *International Journal of Pharmaceutics*, 436, 214—232, <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2012.06.059>.
- Siirä, S. M., Antikainen, O., Heinämäki, J., Yliruusi, J. (2011). 3D simulation of internal tablet strength during tableting. *AAPS PharmSciTech*, 12(2), 593—603. <https://doi.org/10.1208/s12249-011-9623-0>.
- Sinka, I. C., Pitt, K. G., Cocks, A. C. F. (2007). Chapter 22. The strength of pharmaceutical tablets. *Handbook of Powder Technology*, 12, 941—970. [https://doi.org/10.1016/s0167-3785\(07\)12025-x](https://doi.org/10.1016/s0167-3785(07)12025-x).
- Swarbrick, J. (2007). *Encyclopedia of pharmaceutical technology: Volume 6*. Taylor & Francis Group.
- Uicker, J. J., Pennock, G. R., Shigley, I. (2016). *Theory of machines and mechanisms*. Oxford University Press, New York. Режим доступу: <https://archive.org/details/theoryofmachines0000uick>.
- Yadav, P., Sahdev, A. K. (2018). Physics of tablet with compaction and compression process for novel drug dosage form. *Journal of Advanced Research in Science. Engineering and Technology*, 3(4), 28—34. <https://www.allsciencejournal.com/assets/archives/2018/vol3issue4/3-4-24-889.pdf>.

УДК 637.5.03

THE EFFECT OF BIOACTIVE COMPONENTS OF BLACK-GRAIN FLOUR AND CORN MILK ON MARKERS OF HEALTHY AGING

O. Belinskyi, O. Galenko

National University of Food Technologies

Key words:

Black wheat
Corn milk
Aging
Marker
Anthocyanins

Article history:

Received 07.07.2025
Received in revised form
28.07.2025
Accepted 15.08.2025

Corresponding author:

O. Galenko

E-mail:

galen@i.ua

Citation: Белінський О. В., Галенко О. О. (2025). Вплив біоактивних компонентів чорнозерного борошна і кукурудзяного молока на маркери здорового старіння. *Наукові праці НУХТ*, 31(4), 182—193. DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-4-15

ABSTRACT

The world is witnessing the process of aging of nations, which has a significant impact on the socio-economic development of countries. To ensure a longer period of working capacity of the population, nutrition is important, which affects physiological functions and can extend the period of active longevity. In modern scientific practice, there is a growing interest in the use of natural food components as a tool for maintaining health and slowing down the aging process.

In particular, researchers are interested in bioactive compounds of cereals, such as black grain flour and corn milk. Black grain flour from wheat with a high content of anthocyanins contains a significant amount of dietary fiber (over 11 g/100 g) and minerals, black wheat can contain up to 140 mg of anthocyanins per 100 g. These components show the ability to improve the state of the intestinal microbiota — factors that are directly related to the mechanisms of biological aging, and therefore have anti-aging effects, antioxidant, anti-inflammatory, antidiabetic and hypolipidemic properties. Corn is a source of B vitamins, vegetable protein, dietary fiber and phytochemicals, including anthocyanins in purple corn varieties, is a natural source of anthocyanins, in particular cyanidin-3-glucoside. These compounds exhibit strong antioxidant and anti-inflammatory properties, and are also able to modulate signaling pathways associated with aging. Overall, both ingredients demonstrated clinically significant effects and may be effective components of diets for the elderly. Black seed flour and corn milk, due to their composition, can modulate both inflammatory and metabolic, antioxidant and even epigenetic markers, which makes them promising ingredients in anti-aging nutrition.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-4-15

ВПЛИВ БІОАКТИВНИХ КОМПОНЕНТІВ ЧОРНОЗЕРНОГО БОРОШНА І КУКУРУДЗЯНОГО МОЛОКА НА МАРКЕРИ ЗДОРОВОГО СТАРІННЯ

О. В. Белінський, О. О. Галенко

Національний університет харчових технологій

У світі спостерігається процес старіння націй, що має значний вплив на соціально-економічний розвиток країн. Для забезпечення тривалішого періоду працездатності населення важливим є харчування, яке впливає на фізіологічні функції та може подовжити період активного довголіття. У сучасній науковій практиці зростає інтерес до використання природних харчових компонентів як інструменту підтримки здоров'я та уповільнення процесів старіння.

Особливу увагу дослідників привертають біоактивні сполуки зернових культур, зокрема чорнозерного борошна та кукурудзяного молока. Чорнозерне борошно з пшениці з високим вмістом антоціанів містить значну кількість харчових волокон (понад 11 г/100 г) і мінералів, чорна пшениця може містити до 140 мг антоціанів на 100 г. Ці компоненти мають антиоксидантні, протизапальні, антидіабетичні та гіполіпідемічні властивості, покращують стан мікробіоти кишківника, що безпосередньо пов'язано з механізмами біологічного старіння, а отже, проявляють антивікову дію. Кукурудза є джерелом вітамінів групи В, рослинного білка, харчових волокон і фітохімікатів, включаючи антоціани в пурпурних сортах кукурудзи, є природним джерелом антоціанів, зокрема ціанідин-3-глюкозиду. Ці сполуки проявляють сильні антиоксидантні та протизапальні властивості, а також здатні модулювати сигнальні шляхи, пов'язані зі старінням. Загалом, обидва інгредієнти демонструють клінічно значущі ефекти і можуть бути ефективними складовими дієт для осіб літнього віку. Чорнозерне борошно та кукурудзяне молоко, завдяки своєму унікальному складу, можуть модулювати як запальні, так і метаболічні, антиоксидантні й навіть епігенетичні маркери, що робить їх перспективними інгредієнтами в антивіковому харчуванні.

Ключові слова: *чорнозерна пшениця, кукурудзяне молоко, старіння, маркер, антоціани.*

Постановка проблеми. У світі спостерігається процес старіння націй, що має значний вплив на соціально-економічний розвиток країн. Для забезпечення тривалішого періоду працездатності населення важливим є харчування, яке впливає на фізіологічні функції та може подовжити період активного довголіття (Ivanov та ін., 2021).

У сучасній науковій практиці зростає інтерес до використання природних харчових компонентів як інструменту підтримки здоров'я та уповільнення процесів старіння. Зокрема, особливу увагу дослідників привертають біоактивні сполуки зернових культур, зокрема чорнозерного борошна та кукурудзяного молока, які демонструють антиоксидантні, протизапальні, метаболічно-захисні властивості. Їх систематичне споживання асоціюється зі зниженням ризику хронічних захво-

рювань та покращенням функціональних маркерів здоров'я у літньому віці (Tomé-Sánchez, Peñas, Hernández-Ledesma, & Martínez-Villaluenga, 2022a). Однак дослідження їхнього впливу на процеси старіння є недостатніми та потребують детального аналізу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Чорнозерна пшениця — це генетично вдосконалений сорт зерна з підвищеним вмістом антоціанів, поліфенолів, харчових волокон і мінералів. Її перевага не лише в нутрієнтному складі, а й у синергічному ефекті компонентів, які беруть участь у регуляції клітинних процесів, пов'язаних із старінням (Beta, Li, & Areea-Bah, 2019).

Чорнозерне борошно, зокрема з пшениці з високим вмістом антоціанів, містить значну кількість харчових волокон (понад 11 г/100 г) і мінералів. Харчові волокна забезпечують повільніше підвищення глюкози в крові, покращення метаболізму ліпідів, а також мають пребіотичну дію, стимулюючи зростання корисної мікрофлори. Ці компоненти проявляють здатність покращувати стан мікробіоти кишківника — фактори, що прямо пов'язані з механізмами біологічного старіння (Kobayashi, Suzauddula, Bender, Li, Li, Sun, & Wang, 2023), а отже, проявляти антивікову дію.

Також ці компоненти мають антиоксидантні, протизапальні, антидіабетичні та гіполіпідемічні властивості, що підтверджено лабораторними дослідженнями (Vio del Río, & Valladares, 2023).

Чорна пшениця може містити до 140 мг антоціанів на 100 г, що більше, ніж у звичайних сортах. Ці сполуки здатні нейтралізувати вільні радикали, запобігаючи окисному пошкодженню білків, ліпідів і ДНК — процесам, які безпосередньо лежать в основі біологічного старіння (Dhua Kumar, Kumar, Singh, & Sharanagat, 2021).

Загальновідомо, що антоціани чутливі до стресових факторів навколишнього середовища, включаючи вплив тепла, ультрафіолетового випромінювання, зміни рН і високий рівень кисню, серед інших факторів, тому обробка забарвлених злаків може призвести до різкого зниження кількості антоціанів (Damodoran, Parkin, & Fennema, 2009).

Окрім антоціанів, у складі борошна виявлено значну кількість фенольних кислот (ферулова, кумарова, ванілінова), флавоноїдів (особливо кверцетин), вітамінів групи В, Е, а також мінералів (залізо, магній, цинк, селен). Ці компоненти проявляють здатність модулювати окислювальний стрес, впливати на активність запальних цитокінів.

Вживання цільнозернових продуктів, зокрема чорнозерного борошна, позитивно впливає на клінічно значущі біомаркери старіння. Клінічне дослідження показало, що 6-тижнева дієта з високим вмістом цільного зерна (близько 85—100 г/день) спричиняє зниження рівня CRP, IL-6 і TNF- α , що вказує на зменшення системного запалення — одного з головних «рушій» вікових змін (Lennon, McKeown, Rogers, & Brown, 2024).

Результати 31 клінічного дослідження, показали, що регулярне споживання цільнозернових продуктів зменшує рівні прозапальних маркерів на 11—34% у середньому. Встановлено зменшення окислювального стресу, поліпшення функції ендотелію та обміну глюкози у дорослих осіб з надмірною вагою (Vissers, Feskens,

& de Groot, 2019), зниження рівня С-реактивного білка (CRP), IL-6 та TNF- α — ключових маркерів запалення (Rahmani, Kord-Varkaneh, Clark, & Zarezadeh, 2020).

Було проведено 23 дослідження у яких встановлено зв'язок між споживанням цільного зерна і ризиком розвитку діабету 2 типу та колоректального раку. Встановлено також зниження ризику раку товстої кишки та смертності від серцево-судинних хвороб при збільшенні споживання продуктів із цільного зерна (Liu, 2011; Tieri та ін., 2020).

Дослідження щодо харчування продуктами з цільним зерном повідомляють про покращення біомаркерів, таких як втрата ваги, покращення рівня ліпідів у крові та антиоксидантний захист (Slavin, 2004).

Підвищений рівень запалення, глікемічна нестабільність, окислювальний стрес і мікробіотичний дисбаланс є основними патофізіологічними маркерами старіння. Такі дані свідчать про високий потенціал чорнозерного борошна як компонента протистаріючого харчування.

З технологічної точки зору використання чорнозерної пшениці не вимагає докорінних змін у виробництві. Для максимального збереження біоактивних сполук необхідно дотримуватись температурного контролю при подрібненні й уникати надмірної механічної деструкції оболонок зерна.

Переважно для виробництва борошна із зернових культур, в тому числі чорнозерної пшениці, використовується ендосперм, тоді як найважливіші поживні речовини знаходяться в оболонках і зародку зерна. При помелі отримують великі шматки висівок та велику варіацію розміру частинок продуктів подрібнення, цей метод є енергоємним. Існує метод повітряного подрібнення у струминних млинах, при якому подрібнюється як ендосперм, так і оболонки зерна на борошно з однаковим розміром частинок. При цьому вихід підвищується на 30%, а витрата енергії не збільшиться (Changgao та ін., 2022).

Доведено перспективу попередньої ферментації зерна (наприклад, молочнокислими бактеріями) як способу підвищення біодоступності поліфенолів (Пасічний, Страшинський, Фурсік, Віхоть, & Анісімова, 2015).

Отже, чорнозерне борошно є багатофункціональним харчовим інгредієнтом, який діє на ключові механізми старіння: окислення, запалення, метаболічний дисбаланс, дисбіоз.

Іншим перспективним продуктом є кукурудзяне молоко. Кукурудзяне молоко — це рідкий харчовий продукт, отриманий шляхом подрібнення зерен кукурудзи з подальшою фільтрацією та, за потреби, ферментацією або стабілізацією. Хоча цей напій не є традиційним у промислових масштабах у Європі, його харчовий і функціональний потенціал активно вивчається, особливо в контексті рослинних альтернатив молока (Reyes-Jurado та ін., 2021).

Кукурудза є джерелом вітамінів групи В, рослинного білка, харчових волокон і фітохімікатів, включаючи антоціани в пурпурних сортах кукурудзи (Cai, Ge-Zhang, & Song, 2023). Пурпурні сорти кукурудзи мають особливу цінність, оскільки є природним джерелом антоціанів, зокрема ціанідин-3-глюкозиду. Ці сполуки проявляють сильні антиоксидантні та протизапальні властивості, а також здатні модулювати сигнальні шляхи, пов'язані зі старінням (Kim та ін., 2023). У пурпурних зернах кукурудзи антоціани знаходяться в перикарпії, тоді як у синіх сортах антоціани знаходяться в алейроновому шарі (Salinas Moreno, Sanchez, Hernandez,

& Lobato, 2005). Загальний вміст фенолів знаходиться в межах 7 мг галової кислоти на СР (Narakotr, Suriharn, Tangwongchai, Scott, & Lertrat, 2014).

Встановлено, що вживання пурпурного кукурудзяного напою протягом 4 тижнів призвело до подвійного підвищення антиоксидантного статусу плазми у людей. Зростання рівня супероксиддисмутази та зниження малонового діальдегіду свідчить про зменшення оксидативного стресу — одного з центральних механізмів клітинного старіння (Martínez, & López-Rubio, 2023).

Наукові огляди свідчать, що більшість рослинних видів молока (соєве, мигдальне, вівсяне) мають схожий або дещо вищий вміст білка (Francavilla, & Joye, 2020), однак пурпурне кукурудзяне молоко перевершує їх за вмістом антиоксидантів (Tomé-Sánchez et al., 2022b).

Крім того, білок кукурудзи (зеїн) проявляє здатність до стимуляції синтезу м'язового білка, як і тваринні білки (Pinckaers, Res, & van Loon, 2024), що потенційно корисно для профілактики саркопенії у людей похилого віку. Білок кукурудзи має достатній амінокислотний профіль для підтримки м'язової маси у літніх людей, що підтверджено дослідженнями на людях та *in vitro*.

На відміну від соєвого чи мигдального молока, кукурудзяне молоко має більш виражений вуглеводний профіль, але також показує антиоксидантну активність, яка зростає при використанні темнозернових сортів (Jusoh, Yusof, Ibrahim, & Ali, 2019). Кукурудзяний напій з додаванням солодкої картоплі отримав високу бальну оцінку споживачів, добре засвоювався.

Напої на основі кукурудзи можуть впливати на антиоксидантний статус, покращувати ліпідний профіль і підтримувати здорову мікрофлору (Kapila, Sharma, & Kapila, 2017).

Метою дослідження є аналіз наукових публікацій щодо біоактивних компонентів чорнозерного борошна та кукурудзяного молока, їх технологічної характеристики та впливу на маркери здорового старіння людини.

Матеріали і методи. Аналіз сучасних літературних джерел, що стосуються біоактивних компонентів чорнозерного борошна та кукурудзяного молока, їх технологічної характеристики та впливу на маркери здорового старіння людини з використанням статей з відкритих джерел і наукометричних баз даних.

Викладення основних результатів дослідження. Біоактивні компоненти зернових — це нутрієнти, які є фізіологічно активними у людському організмі. Вони сприяють збереженню здоров'я та уповільненню вікових процесів (Vio del Río, & Valladares, 2023).

У складі чорнозерної пшениці і кукурудзяного молока виокремлюють такі основні класи біоактивних сполук:

- антоціани — потужні антиоксиданти, захищають клітинні мембрани та ДНК від окисного ушкодження;
- фенольні кислоти (ферулова, кавова, кумарова) — проявляють протизапальну активність;
- флавоноїди (кверцетин, апігенін) — модулятори клітинних сигнальних шляхів (NF-κB, Nrf2);
- фітостероли — знижують рівень холестерину;
- вітамін Е (токофероли) — стабілізують клітинні мембрани;

- харчові волокна (целюлоза, β -глюкани) — підтримують мікробіоту й знижують системне запалення;
- протеїни та пептиди (зокрема з кукурудзи) — можуть стимулювати синтез м'язової маси.

Біоактивні речовини впливають на основні патофізіологічні механізми старіння, які часто описують як «hallmarks of aging». Найбільш значущими є:

- оксидативний стрес. Антоціани та фенольні кислоти нейтралізують вільні радикали (ROS), запобігаючи ушкодженню білків, ліпідів, ДНК. У метааналізі 23 клінічних досліджень показано, що вживання антоціанів призводить до зниження рівня MDA та підвищення активності SOD і GPx у плазмі крові (Fallah, Sarmast, & Bagheri, 2019);

- хронічне запалення. Фенольні сполуки пригнічують активацію ядерного фактора NF- κ B, знижуючи продукцію прозапальних цитокінів (IL-6, TNF- α). Це сприяє профілактиці «запального старіння» (inflammaging), особливо в осіб з метаболічним синдромом (Rahmani, Kord-Varkaneh, Clark, & Zarezadeh, 2020);

- порушення мікробіоти. Харчові волокна зернових продуктів є джерелом пребіотиків, стимулюють зростання *Bifidobacterium* і *Lactobacillus*, які, у свою чергу, синтезують коротколанцюгові жирні кислоти (SCFA) з протизапальними властивостями (Brouwer-Brolsma, van de Wiel, & Feskens, 2022);

- метаболічна дисфункція. Антоціани та флавоноїди поліпшують чутливість до інсуліну, знижують глікемічні коливання та зменшують відкладення жиру в печінці (Dhua Kumar, Kumar, Singh, & Sharanagat, 2021).

Встановлено, що поліфеноли зернових впливають на експресію генів, пов'язаних зі старінням. Останніми роками дедалі більше уваги приділяють епігенетичним маркерам, наприклад, експресії генів-запальних медіаторів або метилюванню певних ділянок ДНК. Зокрема, флавоноїди активують транскрипційний фактор Nrf2, який відповідає за антиоксидантну відповідь клітин (Tomé-Sánchez, Peñas, Hernández-Ledesma, & Martínez-Villaluenga, 2022a). Регулярне споживання біоактивних компонентів може сприяти модуляції експресії генів, що регулюють запалення, проліферацію клітин, автофагію та захист теломерів. Це створює перспективу для включення зернових продуктів до нутрігеномічних стратегій активного довголіття.

Оцінка ефективності біоактивних компонентів, зокрема зернових, ґрунтується на спостереженні за низкою біомаркерів, які дають змогу кількісно відстежувати фізіологічні зміни, пов'язані зі старінням. У науковій літературі поняття «здорове старіння» дедалі частіше асоціюється не лише з тривалістю життя, а й з якістю функціонування ключових систем організму — судинної, імунної, метаболічної, когнітивної.

Одним із найкраще вивчених напрямів є системне низькоградусне запалення, відоме як inflammaging. Його оцінюють за рівнем С-реактивного білка (CRP), інтерлейкінів IL-6, IL-1 β , фактора некрозу пухлин α (TNF- α). У низці клінічних досліджень виявлено, що вживання чорнозерного борошна супроводжується статистично значущим зниженням концентрацій цих маркерів (Rahmani, Kord-Varkaneh, Clark, & Zarezadeh, 2020). Це свідчить про потенціал зернових у профілактиці вікових імунозалежних порушень.

Другим важливим критерієм є окислювальний стрес, тобто дисбаланс між продукцією активних форм кисню та здатністю організму їх нейтралізувати. Його визначають за показниками загальної антиоксидантної здатності плазми (ТАС), рівнем малонового діальдегіду (MDA), активністю ферментів супероксиддисмутази (SOD), глутатіонпероксидази (GPx). Зернові продукти, збагачені антоціанами, поліфенолами і токоферолами, впливають на ці показники (Colombo, Ferron, & Papetti, 2021).

Третя група маркерів стосується метаболічного статусу, зокрема глікемічного контролю та ліпідного профілю. Біоактивні компоненти пшениці здатні знижувати постпрандіальну глюкозу, інсулінову резистентність, а також концентрацію тригліцеридів і LDL-холестерину. Такі ефекти особливо цінні для профілактики вікових захворювань, асоційованих з метаболічним синдромом.

У дослідженнях з дотриманням рослинних дієт із зерновими у складі спостерігались позитивні зрушення в функціональних маркерах: показники когнітивної функції (швидкість обробки інформації, пам'ять), фізичної витривалості (м'язова сила, швидкість ходьби), а також довжині теломер — визнаний показник клітинного віку (Tian та ін., 2022).

Антоціани та їх метаболіти позитивно впливають на захист судинного ендотелію, що може обмежувати довгострокові наслідки інсульту та значно знижувати кров'яний тиск (Blesso, 2019; Wallace, Slavin, & Frankenfeld, 2016).

Дослідження на людях і моделі на тваринах продемонстрували значне покращення окислення ліпопротеїнів низької щільності, ліпопротеїнів дуже низької щільності, С-реактивного білка, загальних тригліцеридів та інших біомаркерів серцево-судинних захворювань у крові, а також зменшення супутніх захворювань (Reis та ін., 2016).

Було виявлено, що антоціани чорнозерної пшениці запобігають змінам, викликаним дієтою з високим вмістом жирів, у тваринних моделях. У мишей, яких годували дієтою з високим вмістом жирів, доповненою чорною цільнозерною пшеницею протягом 12 тижнів, значно зменшився приріст маси тіла та жирові відкладення, знизився загальний рівень холестерину, тригліцеридів у сироватці крові та рівень вільних жирних кислот у сироватці крові, одночасно відновився нормальний рівень глюкози в крові та інсулінорезистентності (Sharma та ін., 2020).

Продукти, багаті на антоціани, можуть не тільки покращити перфузію мозку та активацію в ділянках мозку, пов'язаних з когнітивною функцією, у здорових людей похилого віку (Bowtell, Aboo-Bakkar, Conway ME, Adlam AR, Fulford), але й посилити нейронну активацію у пацієнтів з легкими когнітивними порушеннями та зміцнити нейронні реакції під час проблем з робочою пам'яттю у людей похилого віку з когнітивним зниженням (Voespflug та ін., 2018; Ma, Jin, Rao, & Zheng, 2025). Дослідження на тваринах також показали, що покращується довготривала пам'ять розпізнавання та нормалізується рівень тривожності у мишей (Shimada, Maeda, Nanashima, Yamada, & Nakajima, 2022).

Більшість доступних клінічних робіт фокусуються на ефектах цільнозернової пшениці в цілому, однак останні роки з'явилися і дослідження специфічно чорнозерних сортів. Найбільш переконливі результати зафіксовано у контексті запальних і антиоксидантних маркерів (табл. 1).

Таблиця 1. Результати досліджень ефектів чорнозерної пшениці на фізіологічні процеси в організмі

Учасники	Інтервенція	Основні ефекти	Джерело
98 дорослих з надмірною вагою	Цільнозерновий хліб (85—100 г/день, 6 тижнів)	↓ CRP, IL-6, TNF-α; покращення ліпідного профілю	Lennon, McKeown, Rogers, & Brown, 2024
50 дорослих	12 тижнів споживання чорнозерної пшениці	↓ Постпрандіальне запалення, глікемічна відповідь	Vissers, Feskens, & de Groot, 2019
—	Екстракти з висівок	↑ TAC, ↓ AGE, анти-колагеназа ефекти	Kobayashi, Suzauddula, Bender, Li, Li, Sun, & Wang, 2023
—	Чорна пшениця	Позитивний вплив на обмін глюкози, окислювальний стрес	Dhua Kumar, Kumar, Singh, & Sharanagat, 2021

Випікали хліб з використанням фіолетових і синіх зерен пшениці за двох різних комбінацій часу й температури та визначали вплив на збереження антоціанів. Низькотемпературний профіль випікання з тривалим часом (180 °C, 31 хв) мав більш негативний вплив на вміст антоціанів, ніж високотемпературний профіль випікання з коротким часом (240 °C, 21 хв). Також були виявлені значні відмінності в загальному вмісті ацетоніну між цільнозерновим вихідним матеріалом і випеченим хлібом, на 7,1 та 72,8% для блакитної та пурпурової пшениці відповідно (Bartl та ін., 2015).

Незважаючи на те, що клінічних досліджень щодо кукурудзяного молока як окремого продукту значно менше, наявні дані дають змогу виділити певні тенденції. Найчастіше досліджуються пурпурні сорти кукурудзи, багаті на антоціани (табл. 2).

Таблиця 2. Результати досліджень ефектів кукурудзяного молока на фізіологічні процеси в організмі

Учасники	Інтервенція	Основні ефекти	Джерело
30 осіб, 4 тижні	Пурпурне кукурудзяне молоко	↑ TAC, SOD; ↓ MDA – антиоксидантний ефект	Martínez, & López-Rubio, 2023
Споживачі в Малайзії	Напій із кукурудзи, батату, мальтодекстрину	Хороша прийнятність, нутритивна цінність	Jusoh, Yusof, Ibrahim, & Ali, 2019
23 клінічні дослідження	Антоціани з харчових джерел	↓ Оксидативні маркери (MDA), ↑ GPx, SOD	Fallah, Sarmast, & Bagheri, 2019

Окрім того, у технолого-біохімічних дослідженнях (Paraevgeniou, Panagiotidou, Filipporoulou, & Chondrogianni, 2019) доведено, що правильна обробка кукурудзяного молока зберігає активність поліфенолів і забезпечує потенційний захисний ефект у літньому віці.

Для виробництва печива використовували пурпурну кукурудзу. Було досліджено вплив доданих підкислювачів та залежності часу приготування від температури на загальний вміст ацетоніну. У результаті виявлено, що додавання лимонної кислоти призвело до збільшення збереження антоціанів у печиві. Додавання підкислювачів для підтримки низького рН підвищило стабільність антоціанів, зберігаючи рожевий колір і зменшуючи втрату кольору (Li, Walker, & Faubion, 2011).

Також досліджено вплив екструзії на загальний вміст ацетоніну екструдованих снєків з цілнозернової пурпурної кукурудзи. Було виявлено, що хоча з антоціанами відбувається кілька хімічних модифікацій (включаючи деградацію), для екструдованих снєків характерні відносно високі значення збереження антоціанів (Escalante-Aburto та ін., 2016).

Усі дослідження демонструють потенціал зернових з високим вмістом поліфенолів у контексті покращення системних показників, пов'язаних з процесом старіння.

Загалом, обидва інгредієнти демонструють клінічно значущі ефекти і можуть бути ефективними складовими дієт для осіб літнього віку. Чорнозерне борошно та кукурудзяне молоко, завдяки своєму унікальному складу, можуть модулювати як запальні, так і метаболічні, антиоксидантні й навіть епігенетичні маркери, що робить їх перспективними інгредієнтами в антивіковому харчуванні.

Незважаючи на переконливі дані щодо користі біоактивних компонентів чорнозерного борошна та кукурудзяного молока, більшість наявних досліджень зосереджені на короткострокових ефектах, тому одним із ключових напрямів подальших досліджень є проведення довготривалих клінічних інтервенцій, орієнтованих на вивчення впливу цих продуктів на динаміку вікових змін у різних системах організму.

Окремої уваги потребує дослідження теломерної динаміки, епігенетичних модифікацій, нейрокогнітивних показників у контексті споживання зернових інгредієнтів.

У технологіях харчових продуктів найперспективнішими напрямками є:

- біофортифікація зернових продуктів, зокрема, збагачення антоціанами, поліфенолами, пробіотичними культурами. Це дає змогу підсилити протизапальний ефект продуктів і зробити їх більш цілеспрямованими у профілактиці старіння;
- комбіновані функціональні формули, які поєднують чорнозерне борошно з іншими антивіковими інгредієнтами (ягідні екстракти, омега-3, пребіотики), можуть мати синергічну дію. Такі продукти варто вивчати як комплексні рішення в рамках превентивної медицини;
- мікрокапсулювання біоактивних речовин — одна з технологій, яка дає змогу стабілізувати нестійкі сполуки (антоціани, ферулова кислота) і забезпечити контрольоване вивільнення в шлунково-кишковому тракті;
- створення порошкових концентратів кукурудзяного молока із тривалим терміном зберігання, адаптованих для людей похилого віку або пацієнтів із хронічними захворюваннями.

У контексті харчової безпеки важливо розробляти стандартизовані методи якісного й кількісного контролю вмісту біоактивних сполук у готових продуктах, що особливо актуально для масового виробництва.

Висновки

Проведений огляд наукових джерел підтверджує, що чорнозерне борошно та кукурудзяне молоко є перспективними компонентами функціонального харчування, здатними впливати на ключові біомаркери здорового старіння.

У складі обох продуктів міститься широкий спектр біоактивних речовин: антоціани, фенольні кислоти, флавоноїди, вітаміни, мікроелементи, харчові волокна. Ці сполуки впливають на системні процеси організму — зокрема знижують оксидативний стрес, регулюють запальні реакції, покращують глікемічний і ліпідний профілі, підтримують мікробіоту та сприяють збереженню м'язової маси.

Аналіз клінічних досліджень засвідчує позитивний вплив вживання зернових інгредієнтів на рівні CRP, IL-6, TNF- α , TAC, MDA, а також на метаболічні параметри. Пурпурна кукурудза і антоціанова пшениця особливо ефективні в контексті антиоксидантного та протизапального захисту.

З технологічної точки зору, ці продукти можуть бути адаптовані до широкого спектра харчових форм: від порошкових концентратів до ферментованих напоїв і збагаченого хліба. Особливої уваги заслуговують інноваційні підходи, як-от біофортифікація, мікрокапсулювання, комбіновані рецептури.

Отже, використання чорнозерного борошна і кукурудзяного молока має наукове підґрунтя як стратегія підтримки здоров'я у процесі старіння. Подальші дослідження мають поглибити розуміння механізмів дії цих компонентів, а харчові технології — забезпечити їх ефективне впровадження в раціон сучасної людини.

Література

- Пасічний, В. М., Страшинський, І. М., Фурсік, О. П., Віхоть, К. О., Анісімова, А. В. (2015). Властивості гідратованих функціональних харчових композицій для м'ясних фаршевих систем. *Науковий вісник ЛНУВМБ імені С. З. Гжицького. Технічні науки. Серія: Харчові технології*. 17(1(61)), 88—92.
- Beta, T., Li, W., Apea-Bah, F. B. (2019). *Flour and Bread From Black, Purple, and Blue-Colored Wheats*. In V. R. Preedy, R. R. Watson (Eds.), *Flour and Breads and their Fortification in Health and Disease Prevention*, Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814639-2.00006-X>.
- Bartl, P., Albrecht, A., Skrt, M., Tremlova, B., Ostadlova, M., Smejkal, K., Vovk, I., Ulrih, N. P. (2015). Anthocyanins in purple and blue wheat grains and in resulting bread: Quantity, composition, and thermal stability. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 66, 514—519. <https://doi.org/10.3109/09637486.2015.1056108>.
- Blesso, C. N. (2019). Dietary Anthocyanins and Human Health. *Nutrients*, 11, 2107. <https://doi.org/10.3390/nu11092107>.
- Boespflug, E. L., Eliassen, J. C., Dudley, J. A., Shidler, M. D., Kalt, W., Summer, S. S., Stein, A. L., Stover, A. N., Krikorian, R. (2018). Enhanced neural activation with blueberry supplementation in mild cognitive impairment. *Nutritional Neuroscience*, 21, 297—305. <https://doi.org/10.1080/1028415x.2017.1287833>.
- Bowtell, J. L., Aboo-Bakkar, Z., Conway, M. E., Adlam, A. R., Fulford, J. (2017). Enhanced task-related brain activation and resting perfusion in healthy older adults after chronic blueberry supplementation. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 42, 773. <https://doi.org/10.1139/apnm-2016-0550>.
- Brouwer-Brolsma, E. M., van de Wiel, A. M., Feskens, E. J. M. (2022). Substituting whole grains for refined grains improves inflammation and gut microbiota: A randomized trial. *The American Journal of Clinical Nutrition*. <https://doi.org/10.1093/ajcn/nqac005>.

- Changgao, S., Olkhovikov, O., Xiaojin, G., Marynin, A., Sichen, Z., Shevchenko, A., Botong, S., Yue, Z. (2022). Research and comparative analysis of the qualitative parameters of food powders produced from grain raw materials using an improved jet mill. *Technology Audit and Production Reserves*, 6(3(68)), 36—43. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.271557>.
- Cai, T., Ge-Zhang, S., Song, M. (2023). Anthocyanins in metabolites of purple corn. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1—10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1154535>.
- Colombo, R., Ferron, L., Papetti, A. (2021). Colored Corn: An Up-Date on Metabolites Extraction, Health Implication, and Potential Use. *Molecules*, 26, 199.
- Damodoran, S., Parkin, K., Fennema, O. R. (2009). *Fennema's Food Chemistry*. In Srinivasan, D., Parkin, K. L. (Eds). CRC Press: Boca Raton, FL, USA.
- Dhua, S., Kumar, K., Kumar, Y., Singh, L., Sharanagat, V. S. (2021). Composition, characteristics and health promising prospects of black wheat: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 112, 780—794. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.04.037>.
- Escalante-Aburto, A., Ponce-García, N., Ramírez-Wong, B., Torres-Chávez, P. I., Figueroa-Cárdenas, J. D. D., Gutiérrez-Dorado, R. (2016). Specific Anthocyanin Contents of Whole Blue Maize Second-Generation Snacks: An Evaluation Using Response Surface Methodology and Lime Cooking Extrusion. *Journal of Chemistry*. <https://doi.org/10.1155/2016/5491693>.
- Fallah, A. A., Sarmast, E., Bagheri, N. (2019). Effect of dietary anthocyanins on biomarkers of oxidative stress: A meta-analysis of randomized controlled trials. *Journal of Functional Foods*, 54, 315—327. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.01.036>.
- Francavilla, A., Joye, I. J. (2020). Anthocyanins in Whole Grain Cereals and Their Potential Effect on Health. *Nutrients*, 12, 2922. <https://doi.org/10.3390/nu12102922>.
- Harakotr, B., Suriham, B., Tangwongchai, R., Scott, M. P., Lertrat, K. (2014). Anthocyanins and antioxidant activity in coloured waxy corn at different maturation stages. *Journal of Functional Foods*, 9, 109—118. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2014.04.012>.
- Ivanov, V., Shevchenko, O., Marynin, A., Stabnikov, V., Gubenia, O., Stabnikova, O., Shevchenko, A., Gavva, O., Saliuk, A. (2021). Trends and expected benefits of the breaking edge food technologies in 2021—2030. *Ukrainian Food Journal*, 10(1), 7—36. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2021-10-1-3>.
- Jusoh, W. N. H. W., Yusof, N., Ibrahim, M. N., Ali, M. E. (2019). Nutritional values and consumer acceptance of sweet corn juice. *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 15(1), 504—507. <https://doi.org/10.11113/mjfas.v15n1.1225>.
- Kapila, R., Sharma, R., Kapila, S. (2017). *Milk and fermented milk products in alleviation of aging pathophysiology*. In *Yogurt in Health and Disease Prevention*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809868-4.00022-4>.
- Kim, H. Y., Lee, K. Y., Kim, M., Hong, M., Deepa, P., Kim, S. A. (2023). Review of the Biological Properties of Purple Corn (*Zea mays* L.). *Scientia Pharmaceutica*, 91, 6. <https://doi.org/10.3390/scipharm91010006>.
- Kobayashi, K., Suzauddula, M., Bender, R., Li, C., Li, Y., Sun, X. S., Wang, W. (2023). Functional properties and potential applications of wheat bran extracts in food and cosmetics: A review of antioxidant, enzyme-inhibitory, and anti-aging benefits. *Foods*, 14(3), 515. <https://doi.org/10.3390/foods14030515>.
- Lennon, S. L., McKeown, N. M., Rogers, G., & Brown, L. (2024). Whole grain-rich diet reduces systemic inflammation in overweight adults. *Gut*, 73(2), 83—95. <https://doi.org/10.1136/gutjnl-2023-328149>.
- Li, J., Walker, C. E., Faubion, J. M. (2011). Acidulant and oven type affect total anthocyanin content of blue corn cookies. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91, 38—43. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4173>.
- Liu, R. H. (2011). Health benefits of whole grains: Phytochemicals and antioxidant activity. *Cereal Foods World*, 56(3), 80—86. <https://doi.org/10.1094/CFW-56-3-0080>.
- Ma, X., Jin, Z., Rao, Z., Zheng, L. (2025). Health benefits of anthocyanins against age-related diseases. *Frontiers in Nutrition*, 12, 1618072. <https://doi.org/10.3389/fnut.2025.1618072>.

Martínez, M. M., López-Rubio, A. (2023). Effect of anthocyanin-rich black wheat on oxidative stress and glucose metabolism in humans. *International Journal of Food Science & Technology*, 58(6), 2051—2060. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13934>.

Papaevgeniou, N., Panagiotidou, E., Filippopoulou, K., Chondrogianni, N. (2019). Quest for Bioactive Compounds in Our Diet with Anti-Ageing and Anti-Aggregation Properties. *Proceedings*, 11, 34. <https://doi.org/10.3390/proceedings2019011034>.

Pinckaers, P. J. M., Res, P. T., van Loon, L. J. C. (2024). Muscle protein synthetic response following corn protein ingestion comparable to milk protein in young males. *Amino Acids*, 56(2), 1—14. <https://doi.org/10.1007/s00726-024-03296-5>.

Rahmani, J., Kord-Varkaneh, H., Clark, C. C. T., Zarezadeh, M. (2020). Whole grain consumption and inflammation: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Advances in Nutrition*, 11(1), 52—65. <https://doi.org/10.1093/advances/nmz065>.

Reyes-Jurado, F., Soto-Reyes, N., Dávila-Rodríguez, M., Leal, A. C. L., Jiménez, T., Mani-López, E., López-Malo, A. (2021). Plant-Based Milk Alternatives: Types, Processes, Benefits, and Characteristics. *Food Reviews International*, 39(6). <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1952421>.

Reis, J. F., Monteiro, V. V. S., de Souza Gomes, R. et al. Action mechanism and cardiovascular effect of anthocyanins: a systematic review of animal and human studies. *Journal of Translational Medicine*, 14, 315. <https://doi.org/10.1186/s12967-016-1076-5>.

Salinas Moreno, Y., Sanchez, G. S., Hernandez, D. R., Lobato, N. R. (2005). Characterization of Anthocyanin Extracts from Maize Kernels. *Journal of Chromatographic Science*, 43, 483—487. <https://doi.org/10.1093/chromsci/43.9.483>.

Sharma, S., Khare, P., Kumar, A., Chunduri, V., Kumar, A., Kapoor, P., Mangal, P., Kondepudi, K. K., Bishnoi, M., Garg, M. (2020). Anthocyanin-Biofortified Colored Wheat Prevents High Fat Diet-Induced Alterations in Mice: Nutrigenomics Studies. *Molecular Nutrition & Food Research*, 64, 1—12.

Shimada, M., Maeda, H., Nanashima, N., Yamada, K., Nakajima, A. (2022). Anthocyanin-rich black-currant extract improves long-term memory impairment and emotional abnormality in senescence-accelerated mice. *Journal of Food Biochemistry*, 46:e14295. <https://doi.org/10.1111/jfbc.14295>.

Slavin, J. (2004). Whole grains and human health. *Nutrition Research Reviews*, 17(1), 99—110. <https://doi.org/10.1079/NRR200374>.

Tieri, M., Ghelfi, F., Vitale, M., Vetrani, C., Marventano, S., Lafranconi, A., Godos, J., Titta, L., Gambera, A., Alonzo, E., Sciacca, S., Riccardi, G., Buscemi, S., Del Rio, D., Ray, S., Galvano, F., Beck, E., Grosso, G. (2020). Whole grain consumption and human health: an umbrella review of observational studies. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 71(6), 668—677. <https://doi.org/10.1080/09637486.2020.1715354>.

Tian, X., Li, J., Lou, Q., Wang, X., Wang, T., Zhou, D., Xie, L., Ban, C., Lu, Q. (2022). Effects of Purple Corn Anthocyanin on Growth Performance, Meat Quality, Muscle Antioxidant Status, and Fatty Acid Profiles in Goats. *Foods*, 11, 1255.

Tomé-Sánchez, I., Peñas, E., Hernández-Ledesma, B., Martínez-Villaluenga, C. (2022a). *Nutritional and technological aspects of cereals in aging prevention*. In Functional Foods and Nutraceuticals for Human Health. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003307938-5>.

Tomé-Sánchez, I., Peñas, E., Hernández-Ledesma, B., & Martínez-Villaluenga, C. (2022b). *Role of cereal bioactive compounds in the prevention of age-related diseases*. In Cereal-Based Functional Foods. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-823482-2.00028-5>.

Vissers, L. E. T., Feskens, E. J. M., de Groot, L. C. P. G. M. (2019). Whole-grain wheat intake and biomarker resilience in middle-aged adults. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 110(5), 1116—1128. <https://doi.org/10.1093/ajcn/nqz166>.

Vío del Río, F., Valladares, L. (2023). Bioactive components of whole grain and their effect on health. *Nutrición Hospitalaria*. <https://doi.org/10.20960/nh.04986>.

Wallace, T. C., Slavin, M., Frankenfeld, C. L. (2016). Systematic review of anthocyanins and markers of cardiovascular disease. *Nutrients*, 8, 32. <https://doi.org/10.3390/nu8010032>.

УДК 663/664.0:355.653

IMPROVING THE SYSTEM AND STRUCTURE OF AFU PERSONNEL NUTRITION: THEORETICAL AND PRACTICAL ASPECTS

G. Simakhina, O. Kochubey-Lytvynenko

National University of Food Technologies

O. Masliychuk

Ivan Franko Lviv National University

Key words:

*Military personnel
Traditional nutrition
Vegetarian nutrition
Ecological environment
Bioantioxidant
New foodstuffs*

Article history:

Received 10.07.2025
Received in revised form
29.07.2025
Accepted 11.08.2025

Corresponding author:

G. Simakhina

E-mail:

lyutik.0101@gmail.com

Citation: Сімахіна Г. О., Кочубей-Литвиненко О. В., Маслійчук О. Б. (2025). Удосконалення системи і структури харчування військовослужбовців ЗСУ: теоретичні і практичні аспекти. *Наукові праці НУХТ*, 31(4), 194—209. DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-4-16

ABSTRACT

Combat readiness displayed by Ukrainian military personnel directly depends on the level of physical and psycho-emotional endurance, high concentration, functional reserves on the body; the majority of these factors are determined by high-quality healthy nutrition adequate to human needs in extreme life conditions. Owing to the recent legislative and organizational measures, the military rations get replenished with wide array of foods, taking into account the vegetarian (vegan) ones, which fact is the practical realization of providing the combatants with necessary foodstuffs, especially in the active warfare regions. The problem of forming the vegetarian ration is still under discussion. This situation is likely to be improved by valuable nutrition with increased protein component mostly of animal origin. Therefore, the implementation of vegetarian foodstuffs into the rations for specific combatant categories in Armed Forces of Ukraine requires the serious scientific research, including the clinical tests.

In general, the topic of improvement and optimization of rations for military personnel always remains relevant, from 2015 — especially for Ukraine. This fact conditioned the purpose of this work, which is hereinafter realized in multi-faceted theoretical studies. Particularly, we analyzed the changes in Ukrainian legislation, concerning the improvement of system and organization of supplying the AFU military personnel with food; accentuated the novelties connected with implementation of vegetarian foodstuffs into rations; estimated the composition of foods regarding the factors "utility" and "risks"; proved the necessity to design the new food products fortified with bioantioxidants that impact the human body in different ways.

To conclude, the studies and selection of new plant sources among the agricultural plants appears to be the perspective trend for the further research, otherwise the high bioantioxidant amount should be the main criterion for plant selection.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-4-16

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ І СТРУКТУРИ ХАРЧУВАННЯ ВІЙСЬКОВОСЛУЖБОВЦІВ ЗСУ: ТЕОРЕТИЧНІ І ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ

Г. О. Сімахіна, О. В. Кочубей-Литвиненко

Національний університет харчових технологій

О. Б. Маслійчук

Львівський національний університет імені Івана Франка

Боездатність українських військових безпосередньо залежить від рівня фізичної та психоемоційної витривалості, високої концентрації уваги, функціональних резервів організму, і більшість цих чинників визначається якісним здоровим харчуванням, адекватним потребам людини в екстремальних умовах життєдіяльності. Завдяки новим законодавчим та організаційним заходам держави військові пайки поповнилися широким асортиментом продуктів, урахувавши вегетаріанські (веганські), що є практичною реалізацією забезпечення бійців необхідним харчуванням, у тому числі в районах проведення бойових дій. Питання формування вегетаріанських раціонів вбачається дискусійним. На тлі негативних, шкідливих параметрів довілля посилюються процеси катаболізму білків, вітамінів, інших нутрієнтів, порушується нормальний перебіг фізіологічних процесів. Їх можливо відновити лише повноцінним харчуванням з підвищеною білковою компонентою, переважно тваринного походження, тому введення вегетаріанських продуктів до раціонів певної категорії бійців ЗСУ потребує серйозних наукових досліджень, у тому числі клінічних.

Загалом, тема вдосконалення та оптимізації раціонів харчування військово-службовців завжди залишається актуальною, для України — з 2015 року. Це визначило мету пропонованого дослідження, яку реалізовано у різноаспектних теоретичних аспектах. Зокрема, проаналізовано зміни в законодавстві щодо вдосконалення системи й організації продовольчого забезпечення військовиків ЗСУ; зроблено акцент на нововведеннях, пов'язаних із імплементацією вегетаріанських продуктів до раціонів харчування; проведено оцінку їхнього компонентного складу за показниками «користь», «ризик»; обґрунтовано необхідність розроблення нових продуктів, збагачених біоантиоксидантами, які забезпечують різнобічні впливи на організм.

У висновках зазначено, що вивчення та підбір нових рослинних джерел серед сільськогосподарських культур є перспективним напрямом подальших досліджень, а основним критерієм добору рослин є підвищений вміст біоантиоксидантів.

Ключові слова: *військовослужбовці, традиційне харчування, вегетаріанське харчування, екологічне довкілля, біоантиоксиданти, нові продукти.*

Постановка проблеми. *Забезпечення високого рівня фізичного, психоемоційного, боездатного стану військовослужбовців в умовах бойових дій безпосередньо залежить, поряд з іншими важливими чинниками, від якості і структури харчування, адекватного потребам організму в надзвичайно складних умовах життєдіяльності, пов'язаних з виконанням службових обов'язків. Тому цілком зрозуміло, що*

науковці у сфері медицини, гігієни, харчових технологій приділяють цьому питанню велику увагу, аналізуючи відповідність складу традиційних продуктів потребам військових у нинішніх умовах, перехід на нову систему харчування, яка дає змогу організувати його з можливістю індивідуального корегування й урахуванням умов перебування військового підрозділу (Гуліч, & Депутат, 2020), розроблення нових продуктів для військових на зерновій, борошняній, молочній, м'ясній, оліє-жирових основах (Українець та ін., 2017). Важливими для розуміння особливостей харчування для військових є дослідження, в яких пропонуються принципово нові підходи до раціонів. Наприклад, введення продуктів цільового призначення в сухій концентрованій і дражеподібній формах, а також ентеральне харчування для нутритивної підтримки поранених і травмованих осіб на етапах медичної евакуації (Притульська та ін., 2017). Міністерство оборони вдосконалило харчовий раціон для військових, які перебувають на лікуванні у медзакладах. Завдяки ухваленій урядом Постанові № 172 від 16.02.2024 р. українські воїни забезпечуватимуться харчуванням за стандартами військово-медичних закладів країн НАТО, навіть у цивільних лікарнях.

Це відомство також встановило вимоги до калорійності основних продуктів, які постачаються для потреб Збройних Сил України. На ухвалення такого рішення вплинули аудиторські перевірки у військових частинах, коли було з'ясовано випадки постачання продуктів зі зниженою калорійністю. На це звертають увагу і науковці, предметом досліджень яких є розроблення нових продуктів для військових, адекватних їх потребам.

Аналізуючи структуру і якість харчування військових у різних країнах світу, автори (Гойко, & Стеценко, 2024) звернули увагу на той факт, що в армії США заведено враховувати потреби військових залежно від їхнього віросповідання, а раціон повинен містити вегетаріанську, кошерну (для юдеїв) або халяльну (для мусульман) їжу, якщо кількість людей, що потребують таких страв, перевищує 10% особового складу (Lutz et al., 2019). Згідно з цими ж даними, індивідуальний польовий раціон військових США складається з 24 страв, одна з яких — обов'язково вегетаріанська у різних варіантах виконання: енергетичні батончики, горіхово-фруктові суміші, десерти. Вегетаріанський раціон солдат Ізраїлю — це голубці в листі винограду, оливки, арахіс, рис, горох, кукурудза.

Часткове введення до раціонів військовослужбовців ЗСУ веганських або вегетаріанських продуктів — це факт, який уже стався. І Міноборони України впроваджує досвід харчування військових у США, Ізраїлі, Великій Британії. Підтвердженням роботи щодо вдосконалення харчування військових є Наказ «Про норми заміни нових видів харчових продуктів в системі Міноборони» від 20.02.2025 р. № 129, що ставить за мету забезпечити організацію харчування військовослужбовців, які, за своїми переконаннями, не вживають їжі тваринного походження. Відповідно до норм, затверджених постановою Кабінету Міністрів України від 29.03.2002 р. № 426, та з урахуванням норм заміни частини продуктів, розроблено проекти типового вегетаріанського та веганського меню за нормою №15 — добовий польовий набір продуктів і варіанти його можливого урізноманітнення першими та другими стравами.

В історії харчування українських військовослужбовців таке нововведення зроблено вперше, тому, поряд з аналізом вдосконалення традиційної структури харчування військових в останні роки, значний інтерес для науковців представляє вивчення теоретичних і практичних питань включення до харчових раціонів вегетаріанських (веганських) страв, а також з'ясування особливостей компонентного складу харчових продуктів в екстремальних умовах бойових дій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Надзвичайно інформативною, обґрунтованою, важливою з теоретичної та практичної точок зору є дисертаційна робота Ю. М. Депутата (Депутат, 2025), яку присвячено науковому обґрунтуванню шляхів корегування фактичного добового раціону військових строкової служби ЗСУ з метою оптимального нутрієнтного забезпечення їх організму. Запропоновано спосіб корегування раціону додаванням вітчизняного білково-вітамінного продукту спеціального споживання, а також інші ефективні заходи, що забезпечили покращення фізичної працездатності військових та оптимізацію процесів їх адаптації до умов військової служби.

Роль білкового складника детально з'ясовано і в праці (Маслійчук, Сімахіна, & Науменко, 2023), де увага акцентується на тому, що в умовах бойових дій військовослужбовець стає активним учасником системи «людина — навколишнє екстремальне середовище», в якому надмірна нервово-емоційна та фізична напруга перевищує межі фізіологічних можливостей організму, тому білковий складник набирає пріоритетного значення. Показано перспективи використання нетрадиційних білкових джерел — білкових збагачувачів із вторинної сировини м'ясо-молочної промисловості, рослинних білків, гідролізатів тваринного й рослинного походження тощо.

Як надзвичайно позитивний факт розглядається розроблення мобільної системи харчування військ, яку було реалізовано з перших днів повномасштабного російського вторгнення в Україну (Лотоцька-Дудик, Крупка, & Чорна, 2023). В цій системі важливе місце займає нормування харчування на основі створення раціонів, здатних забезпечити військових їжею, максимально підготовленою до вживання.

Ряд науковців у своїх дослідженнях (Лотоцька-Дудик, Крупка, & Чорна, 2023; Гойко, & Стеценко, 2024) посилаються на проєкт «Реформа харчового забезпечення Збройних Сил України» та Наказ Міністерства оборони України від 29.04.2020 р. № 140 «Про затвердження Порядку застосування Каталогу продуктів харчування», які стали основою запровадження нової системи організації харчування особового складу у військових частинах з використанням Каталогу харчових продуктів (Наказ Міністерства оборони України № 140 від 29.04.2020 р. «Про затвердження Порядку застосування Каталогу продуктів харчування»). За цим Каталогом асортимент продуктів було збільшено від 30 до 400 найменувань, що надає можливість швидко корегувати раціон і, можливо, навіть забезпечувати індивідуалізоване харчування.

Результати аналізу системи харчування ЗСУ із застосуванням Каталогу продуктів показали її переваги перед традиційними підходами (Саган, Каплун, & Фролов, 2022), а саме: формування добового харчування здійснюється з урахуванням енерговитрат військових; розширено асортимент (понад 400) запропонованих продуктів; калорійність раціону може становити від 3500 до 6000 кілокалорій;

військові мають можливість вибору страв із базового меню, а також додаткові страви, які містять молочні продукти, овочеву нарізку, фрукти, фруктові салати, ягоди, горіхи, солодоші, десерти (додаток 4 до Порядку застосування Каталогу продуктів харчування).

Констатуючи відомі факти про те, що якість харчування суттєво впливає на ефективність виконання бойових завдань, боєздатність військових, їхню фізичну витривалість, можливість оцінювати обстановку і приймати рішення, автори (Говма та ін., 2023) звертають увагу на те, що асортимент продуктів має бути досить широким, і в раціонах необхідно враховувати індивідуальні харчові потреби деяких військовослужбовців у вегетаріанському та веганському харчуванні. Важливим у цій статті є і той факт, що автори наголошують на доцільності долучення до комплектування харчових раціонів продуктів, що мають високу біологічну цінність і функціональну спрямованість: хлібці, цукати, сухофрукти, порошкоподібні суміші сублімаційного сушіння плодово-ягідної сировини для напоїв.

Таким чином, завдяки сучасним дослідженням і потребам певної категорії людей вегетаріанство в раціонах харчування військових з екзотики поступово переходить у буденну складову, і разом з тим потребує осмислення багатьох питань, зокрема специфіки вегетаріанського харчування, його користі та ризиків.

Потребує також виокремлення спільних ознак у традиційному та вегетаріанському харчуванні, що дасть змогу вдосконалити процес виробництва нових продуктів, а також надати їм необхідного функціонального спрямування відносно до потреб військових.

Такі питання дуже епізодично розглядали в галузі нутриціології, гігієни харчування, дієтології. Водночас вони є актуальними, багатофункціональними та важливими у стратегії підтримання належного стану здоров'я і боєздатності воїнів ЗСУ, тому стали предметом дослідження у пропонованій статті.

Мета дослідження: здійснити теоретичні дослідження та окреслити практичні результати з удосконалення структури харчування військовослужбовців в останні роки, оцінити доцільність введення до харчових раціонів вегетаріанських продуктів з точки зору співвідношення користь/ризик, а також обґрунтувати пріоритетну роль рослинних антиоксидантів у будь-яких типах харчування для військових в екстремальних умовах життєдіяльності.

Матеріали і методи. Для досягнення поставленої мети обрано метод огляду і аналізу праць науковців, присвячених питанням оцінки харчування військових ЗСУ, нових підходів до врахування потреб організму в кризових ситуаціях, введення до структури харчування вегетаріанських страв і з'ясування ролі природних антиоксидантів у захисті організму від шкідливих умов довкілля. Сформульовано абстрактно-логічні умовиводи на основі результатів власних досліджень та осмислення ролі фізіологічних ефектів нутрієнтів у нормалізації функціонування організму людини. Пошук публікацій здійснено із застосуванням світових наукометричних баз PubMed та Google Scholar.

Викладення основних результатів дослідження. Невеликий екскурс в історію харчової науки зобов'язує згадати Миколу Івановича Пирогова. Його справедливо вважають засновником лікувального харчування. Микола Іванович розумів значення правильного підбору продуктів при лікуванні будь-яких хвороб і використовував практику неповноцінного харчування поранених і хворих, розробивши

власні практичні рекомендації. Вони і сьогодні вражають своєю актуальністю, оскільки ґрунтуються на принципі індивідуального підходу до кожного пацієнта з урахуванням фази ранового процесу, умов виникнення поранень і можливостей госпіталю, а також національних смаків і харчових звичок солдат (Голобородько, 2012). І сьогодні ця мрія засновника лікувального та профілактичного харчування починає збуватися, а проблема збереження стану здоров'я військовослужбовців перестала бути сферою уваги лише медицини, а й посіла істотне місце у розвитку новітніх харчових технологій, визначаючи їх напрям, пріоритети, розширення спектру продуктів оздоровчого призначення.

Такий прогрес у розумінні ролі харчування у життєздатності живого організму цілком зрозумілий. Фахівці розглядають сьогодні харчові продукти у новій якості — як носії біологічно активних речовин (БАР), що беруть участь у всіх процесах фізіологічної та гормональної регуляції організму людини. Вони є певною мірою (залежно від кількісного та якісного складу БАР) лікувальними, профілактичними, спеціальними тощо.

Призначення лікувально-профілактичних та оздоровчих продуктів із підвищеним вмістом БАР полягає у запобіганні чи відновленні метаболічних порушень в організмі під впливом на нього шкідливих чинників довкілля. Це свідчить про можливість нормалізації метаболічних процесів в організмі за допомогою спеціально підібраної структури харчування (Українець та ін., 2017), в тому числі оздоровчого, отриманого шляхом збагачення традиційних харчових продуктів дефіцитними есенціальними біокомпонентами.

А яким чином вегетаріанське харчування здатне відповідати цим вимогам? Питання дискусійне.

Сьогодні вегетаріанство — це не просто дієта, а стиль життя і специфічна ідеологія, яка стала популярною у світі. Це харчування рослинною і молочною їжею, а деякі варіанти виключають і молоко. Люди стають вегетаріанцями з різних причин: етичних, екологічних, медичних, релігійних.

Веганство передбачає лише рослинну їжу, його прихильники виходять, передусім, з етичних міркувань.

Різновидом вегетаріанства є лактовегетаріанство (Lacto-Vegetarianism, 2023), при якому вживають молоко, молочні продукти і мед. Серед прихильників цього типу харчування багато послідовників східних релігій і філософій.

Ововегетаріанство (Hill, 2023) забороняє вживати молоко і молокопродукти, але дозволяє у раціоні наявність яєць. Цей вид вегетаріанства базується найчастіше на особистій непереносимості лактози і молокопродуктів.

Лактоово вегетаріанство (Richards, 2021) — найпопулярніший різновид, в мею якого присутні яйця, молоко і мед. Навіть дієтологи сприймають цей вид харчування, вважають його не лише корисним для здоров'я, а й здатним запобігти появі низки хвороб.

Якщо розглядати доцільність введення вегетаріанських страв до раціонів військовослужбовців, слід розглянути користь від їх уживання:

- значний вміст харчових волокон надає відчуття ситості, видалення з організму шкідливих сполук, запобігання атеросклерозу і раку (Соломон, 2024);

- значний вміст вітамінів — антиоксидантів (С, А, Е, каротиноїди, біофлавоноїди), які захищають організм від шкідливих чинників довкілля (Матасар, Петрищенко, & Луценко, 2019);

- значний вміст калію та інших лужних елементів, важливих для нормалізації функціонування серцево-судинної системи (Погорелов та ін., 2010);

- сприятливе для функціонування всіх клітин організму співвідношення насичених і ненасичених жирних кислот (Кушнір, 2023);

- антибактеріальна та антимікробна дія корисних бактерій (Куновський, Лаба, & Куновська, 2024).

Надалі варто скористатись практичним підходом медиків до визначення придатності до вживання нових лікарських препаратів, дієтичних добавок, нових харчових продуктів. Цей метод ґрунтується на оцінюванні співвідношення користь/ризик і залежно від того, яка складова цього співвідношення переважає, приймається рішення — рекомендувати досліджуваний продукт до вживання чи заборонити.

Отож, до ризиків строгого вегетаріанства належать (Безшейко, 2017):

- недостатнє забезпечення організму вітаміном D₃, відсутність у рослинній їжі вітаміну B₁₂, необхідного для кровотворення і нормального функціонування нервової системи;

- нестача ряду амінокислот, передусім незамінних, що створює загрозу білкового дефіциту;

- дефіцит вітаміну B₂ через відмову від молочних продуктів;

- брак вітаміну С при вживанні переважно продукції зернових культур, що ставить під загрозу діяльність усієї окислювально-відновлювальної системи організму.

Тому серед прихильників строгого вегетаріанства необхідно проводити роз'яснювальну роботу з характеристикою наведених вище користі і ризиків; спробувати переконати їх, що прийнятними серед різновидів вегетаріанства є лактовегетаріанство та лактоово вегетаріанство (за тим винятком, коли вегетаріанство, навіть його строга форма, викликані станом здоров'я військового і є об'єктивною необхідністю).

І звичайно, при всіх видах вегетаріанства необхідно доповнювати раціон дієтичними добавками, тим більше що і вітчизняна, і зарубіжна фармація зараз випускають широкий їх асортимент, на пакуванні яких обов'язково зазначено «веганські капсули», «веганські таблетки», «мультивітаміни для веганів», «веганський рослинний протеїн» тощо.

Така інформація підтверджує, що дієтичні добавки не містять желатину (білка, який виробляють із тваринного колагену), лактози, бджолиного воску (ним покривають капсули вітамінів), вітаміну D₃ (який часто виробляють із ланоліну), риб'ячого жиру (як джерела ПНЖК омега-3). Разом з тим в аптечній мережі можна знайти веганський вітамін D₃ та ПНЖК омега-3, отримані з водоростей.

У проведенні роз'яснювальної роботи істотну допомогу військовим можуть надати психологи, які зараз є в кожній військовій частині, адже готовність особистості до змін у харчовій поведінці, у харчових звичках має глибоку психологічну основу (Абсаямова, 2018), а сама дефініція поняття «харчова поведінка» формулюється як складна взаємодія фізіологічних, психологічних, соціальних і генетичних чинників, які впливають на час прийому їжі, її кількість, харчові переваги та

вибір. Деякі дослідження зосереджуються на труднощах, з якими люди стикаються при спробах змінити свій харчовий раціон. Це переживання при відмові від улюблених чи уподобаних продуктів, брак особистої сили волі, відсутність належної обізнаності щодо користі чи шкоди тих чи тих дієт (Шебанова, 2017). Разом з тим психологи засвідчують ефективність психокорекційної допомоги, якщо вона збігається з бажанням індивіда змінити свої харчові уподобання.

Вітчизняний досвід у введенні вегетаріанських блюд до раціонів харчування військових уже напрацьовано. Національна гвардія України ще в кінці 2022 р. розробила 10 перших і 18 других страв у вигляді готових сухпайків для веганів і вегетаріанців, в основному це різноманітні каші з овочами. Таке нововведення стало реакцією на звернення деяких службовців ЗСУ з проханням створити окреме меню для вегетаріанців і веганів, зокрема в умовах відсутності кухні в районах виконання бойових завдань, а наявні сухпайки містять м'ясо та продукти тваринного походження. Вже наприкінці 2023 р. ТМ «Маркел» запропонувало до реалізації ряд перших і других страв для веганів і вегетаріанців: «Борщ український з рослинним фаршем», «Суп гороховий з рослинним фаршем», «Каша гречана з рослинним фаршем та овочами» і багато інших. Проте ця вся продукція створена емпіричним шляхом, без належної наукової та нормативної бази.

Конструювання, виробництво та споживання харчових продуктів (традиційних і вегетаріанських) необхідно здійснювати на підставі науково обґрунтованих і перевірених практикою медико-біологічних принципів, використання нових технологічних процесів перероблення сільськогосподарської, лікарської, пряно-ароматичної сировини на традиційні та веганські продукти з гарантією їх повної безпеки для споживачів.

Зараз йдеться не про ті продукти, які потрібні будуть у майбутньому, а про харчові продукти, які сьогодні необхідні нашим воїнам в умовах бойових дій, на тлі нестійких параметрів довкілля, що призводять до посилення катаболізму білків, вітамінів та інших життєво важливих нутрієнтів, фізичного і психологічного виснаження бійців.

Наведена інформація свідчить про те, що чимало військових намагаються дотримуватись етичного веганства навіть в умовах війни, а хтось перейшов на цей тип харчування за станом здоров'я. І кожен з них має право на такі продукти.

Забезпечення раціонів харчування веганськими та вегетаріанськими сухпайками є результатом турботи про цю категорію особового складу ЗСУ. Тим більше, що це практика, яку успішно використовують передові армії світу — США, Великої Британії, Ізраїлю. А продукти, на основі яких можна створити такі пайки, недорогі і поживні (крупни, овочі, бобові, рослинні протеїни тощо), цілком вписуються в раціони тих, хто дотримується традиційного харчування.

Наприклад, Інститут технічної теплофізики НАН України розробив та апробував сучасні якісні сухпайки (Снежкін, Петрова, Самойленко, & Слободянюк, 2022). Як і в американських продуктах, перевага надається рослинним композиціям, які позитивно впливають на стан здоров'я бійців і запобігають багатьом захворюванням: онкологічним, атеросклерозу, остеопорозу.

Отже робота зі створення нових продуктів велика, складна, відповідальна, адже в системі Міноборони таке урізноманітнення меню робиться вперше і тому очевидним є залучення до виконання цього завдання фахівців харчових галузей із

з'ясуванням теоретичних і практичних питань. Вегетаріанські раціони, як і традиційне харчування, повинні бути збалансованими за основними нутрієнтами, мати необхідну енергетичну та біологічну цінність, належні органолептичні показники і відповідати всім вимогам безпеки. Для подолання дефіциту незамінних амінокислот, які є лише в продуктах тваринного походження, певних мінеральних елементів (наприклад, заліза), деяких вітамінів (передусім вітаміну В₁₂ та D₃) вегетаріанські раціони мають бути доповнені відповідними дієтичними добавками. Для реалізації цього завдання необхідна також участь медиків, нутриціологів, дієтологів, тобто всіх фахівців, які відповідають за здоров'я громадян країни.

Отож виклики сьогодення диктують необхідність розроблення спеціальних підходів до нутрієнтного підтримання військових, які можуть бути реалізовані застосуванням спеціальних харчових продуктів з підвищеним вмістом есенціальних біокомпонентів, що доцільно використовувати також у стаціонарних і польових лікувальних закладах (Військова, 2022).

Накопичений науковцями досвід показує, що основним напрямом при створенні якісно нового харчового продукту незалежно від типу харчування — традиційного чи вегетаріанського — із заздалегідь прогнозованими змінами їх хімічного складу (згідно з медико-біологічними вимогами) є повна збалансованість продуктів у раціоні за основними поживними речовинами, збагачення цих продуктів необхідними біологічно активними сполуками синергічної дії. Лише в такому разі можна говорити про оптимальний комбінований раціон, адекватний потребам військовослужбовців у екстремальних умовах (Сімахіна, Науменко, Михайлова, & Маслійчук, 2024).

У праці (Товма, 2017) виокремлено ряд проблем, які в нинішніх умовах обмежують подальший поступ у вдосконаленні структури і якості харчування для військових. Серед них: недооцінка рівня, місця і значення новітніх технологій у лікувальному харчуванні, відсутність співпраці Міністерства оборони з Міністерством охорони здоров'я в питаннях організації та удосконалення харчування, відсутність у структурі Міністерства оборони кваліфікованих фахівців, науково-дослідних лабораторій з питань санітарії та гігієни харчування.

Остання позиція відкриває реальні можливості співпраці Національного університету харчових технологій з Міністерством оборони у напрямі підготовки фахівців відповідної кваліфікації, а також проведення актуальних теоретичних та експериментальних досліджень, спрямованих на вдосконалення існуючих і розроблення принципово нових технологічних процесів отримання харчових продуктів, у тому числі вегетаріанських та веганських, які в перспективі стануть базовими і для формування індивідуальних харчових раціонів.

Отож, розроблена на сьогодні законодавча і нормативно-правова база вдосконалення системи і структури харчування військовиків ЗСУ відповідає сучасним вимогам. Наступний етап вирішення цієї важливої проблеми переходить у площину технологічних процесів розроблення і виробництва широкого асортименту харчових продуктів, у тому числі вегетаріанських (веганських), компонентний склад яких повністю задовольняв би потреби людини, яка тривалий час перебуває на межі, а то й за межею фізіологічних можливостей (Чабан, Хлустова, & Омелянович, 2022).

У таких умовах паралельно з виникненням і поглибленням оксидантного стресу порушуються практично всі процеси метаболізму (енергетичний, білковий, ліпідний, електролітний та інші види обміну), також страждає ендокринна, серцево-судинна, імунна системи тощо. Такі збої в роботі систем організму викликаються вільними радикалами кисню, що утворюються під час підвищення рівня радіаційного забруднення, вибухів, викидів токсичних сполук і навіть при палінні цигарок. Вільні радикали руйнують мембрани клітин, ферменти, ДНК, ведуть до виникнення таких хвороб, як рак, атеросклероз, коронавірусна інфекція, нейродегенеративні захворювання. Цей процес викликає порушення балансу між вільними радикалами та антиоксидантами, і для його зміщення в позитивний для організму бік необхідні антиоксиданти (Поготова, & Чекман, 2014), найбільш ефективними з яких є поліфенольні сполуки, біофлавоноїди, про що свідчить проведений аналіз літературних джерел, і невпинний інтерес науковців до цієї групи сполук (Горчакова та ін., 2024), зокрема шляхом їх уведення до раціону харчування.

Антиоксиданти є не лише скавенджерами (поглиначами) вільних радикалів, а й відповідальні за код клітин. Тому цілком очевидно, що збільшення в раціонах харчування продуктів з достатньою концентрацією антиоксидантів істотно пригнічує оксидативний стрес, що важливо для населення України в умовах воєнного стану, а для військовослужбовців — особливо.

Антиоксидантну дію природних сполук часто асоціюють із їхнім антистресовим впливом (Smith et al., 2021), що значно підвищує цінність натуральних антиоксидантів для нинішніх екстремальних ситуацій.

Останнім часом встановлено важливість застосування антиоксидантів при лікуванні COVID-19 (Khan et al., 2021). З'явилися також публікації (Москоні, 2019), які пов'язують розлади розумової діяльності з накопиченням вільних радикалів кисню, і це є додатковим аргументом щодо застосування антиоксидантів. Більш того (Alotaibi et al., 2021), рослинні антиоксиданти ефективно захищають і серцево-судинну систему.

З викладеного матеріалу видно, що для отримання поліфункціональних антиоксидантів використовують передусім рослинну сировину (Будняк, 2023; Шостак, Калинюк, & Вронська, 2017). І це зрозуміло. Адже за своєю хімічною природою більшість рослинних матеріалів споріднені з організмом людини. В ході тривалої еволюції людина пристосувалась до засвоєння рослинних компонентів, тому вони легко включаються до біохімічних процесів у живому організмі. Цьому сприяє і висока ступінь їх засвоєння, і відсутність негативних побічних ефектів навіть при тривалому вживанні.

Сучасні можливості науки і техніки дають змогу розпізнавати, вилучати з рослин і вивчати різні біологічно активні речовини, їхні цілющі властивості і позитивний вплив на організм людини. Наприклад, у траві звіробою активними фармацевтичними інгредієнтами визнано флавоноїди (рутин, кверцетин, гіперозид і дубильні речовини), також виявлено кореляцію між вмістом цих сполук і мікроелементним складом трави (Деркач, Страшний, 2018).

Для запобігання стресу та поліпшення адаптації організму в умовах воєнного стану компліментарною медициною запропоновано ряд фітопрепаратів, які можна застосовувати як антистресові засоби або стрес-протектори завдяки захисному

впливу на нервову, серцево-судинну, ендокринну та імунну системи (Буршинський, 2023). Цілком очевидно, що введенням до складу харчових продуктів компонентів цих препаратів можна досягти таких же цілей. Більш того, значна кількість фітопрепаратів знижує підвищений вміст «шкідливого» холестерину, нормалізує співвідношення жирних кислот. Найбільш популярні з таких фітопрепаратів містять екстракти пасифлори, квіток ромашки, суцвіття хмелю, зерна вівса, коріння женьшеню тощо (Смалюх, Сур, 2018).

Загалом на сьогодні існує достатня кількість комплексних вітчизняних рослинних засобів, які ефективно впливають на ті чи ті ланки метаболізму (Архипова, 2023). Навіть така популярна в народній медицині лікарська трава, як перцева м'ята, досі викликає інтерес дослідників (Добровольний, & Давтян, 2024), які виявляють її нові фармакологічні ефекти — антиоксидантний, протівірусний, проти-запальний тощо.

До найпотужніших антиоксидантів, причому тих, які в певних концентраціях синтезуються практично в усіх рослинних матеріалах і які є предметом інтенсивних досліджень науковців у різних країнах світу, належать вітамін С, біофлавоноїди (Simakhina, & Naumenko, 2021), каротиноїди (Дуюн, & Марчишин, 2022), основна функція яких і в рослинній клітині, і в організмі людини полягає в захисті її структур від ушкоджуючої дії вільних радикалів.

Важливими сировинними ресурсами з антиоксидантними властивостями є також вторинні продукти харчових виробництв — сироватка, шроти плодово-ягідних і овочевих культур, надземна маса сільськогосподарських культур; популярністю користуються також дикорослі і культивовані гриби, різноманітні гідробіоти, лікарська та пряно-ароматична сировина, продукти бджільництва тощо.

Залежно від способів перероблення сировини, якісних і кількісних показників її біокомпонентів, відповідно до Закону України 771/97-ВР «Про основні принципи та вимоги до безпеки та якості харчових продуктів» (редакція від 16.01.2020 р.) кожне із джерел отримання збагачувачів має низку своїх специфічних маркерів, які в подальшому зумовлюють створення на їхній основі продукції певного функціонального призначення (загальнозміцнюючого, адаптогенного, імуномодуючого, дезінтоксикаційного тощо) високої ефективності та повністю безпечної для споживачів.

Рослинні композиції антиоксидантів можна використовувати для збагачення будь-яких традиційних харчових основ і напоїв, для виробництва дієтичних добавок; вони можуть слугувати базисом для отримання продуктів спеціального призначення, в тому числі вегетаріанських, для раціонів певних категорій воїнів ЗСУ.

Отже, на основі виконаних теоретичних досліджень можна зробити однозначний висновок щодо актуальності, доцільності і необхідності в нинішніх складних екологічних умовах розробляти для раціонів військовослужбовців продукти, збагачені комплексними або комбінованими рослинними композиціями з підвищеними концентраціями біоантиоксидантів. Головна перевага таких композицій у тому, що при їх створенні враховується ефект дії кожного інгредієнта зокрема та ефекти спільної синергічної дії. Завдяки цьому досягається висока доступність нутрієнтів і їх засвоюваність організмом, повна безпека і очікувана ефективність.

Практична рекомендація від авторів. При виборі рослинних джерел для отримання збагачуючих композицій з максимальним вмістом антиоксидантів слід мати на увазі, що ступінь їх накопичення певною мірою залежить від стадії росту рослини. Наприклад, за нашими даними, отриманими протягом 2023—2024 рр., у листі смородини максимальна концентрація біофлавоноїдів (3,25% на абсолютно суху речовину) становила в першій половині жовтня, а в кінці серпня була майже вдвічі меншою. Для квітів ромашки виявилась така закономірність: максимальний вміст біофлавоноїдів на стадії переходу від бутонізації до цвітіння — 2,34%; за масового цвітіння цей показник дещо менший — 2,18%; а після цвітіння — 1,96%. Тому необхідно знати особливості синтезу тих чи тих сполук і збирати сировину у період їх максимального накопичення.

Повертаючись до дискусійного питання щодо особливостей забезпечення певних категорій військовиків ЗСУ вегетаріанським (веганським) харчуванням, можна констатувати, що всі наведені міркування і наукове обґрунтування компонентного складу харчових продуктів, адекватних потребам організму в умовах бойових дій, однаковою мірою стосуються і традиційних, і вегетаріанських раціонів. Потужна антиоксидантна компонента, яка є основою рецептур нових оздоровчих продуктів, має лише рослинне походження і тому придатна для будь-яких типів харчування.

Пропонуємо наступний алгоритм розроблення харчових продуктів антиоксидантної, імуномодулюючої, радіопротекторної, загальнозміцнюючої дії для раціонів військовослужбовців із застосуванням рослинних антиоксидантів, які і надають продуктам зазначених властивостей.

Етап 1. Вибір харчових основ для виробництва оздоровчих продуктів:

- традиційного типу харчування (борошняні, зернові, плодоовочеві, молочні, м'ясні, олієжирові);

- вегетаріанського типу харчування (борошняні, зернові, плодоовочеві).

Етап 2. Вибір рослинних джерел із підвищеним вмістом вітаміну С, біофлавоноїдів, каротиноїдів (плодово-ягідні культури; пряно-ароматична лікарська сировина; шроти плодів, ягід, овочів; дикорослі лікарські рослини).

Етап 3. Дослідження сумісності за фізико-хімічними та біологічними властивостями компонентів харчових основ і композицій антиоксидантів.

Етап 4. Обґрунтування вибору фізико-хімічної форми та агрегатного стану антиоксидантних композицій (екстракти, концентрати, суспензії, сухі дисперговані суміші, пореподібні напівфабрикати тощо) для введення в харчове середовище.

Етап 5. Розроблення технологій і визначення оптимальних значень параметрів перероблення рослинної сировини на збагачуючі антиоксидантні композиції цільової фізико-хімічної форми та агрегатного стану.

Етап 6. Формування рецептури нового продукту традиційного або вегетаріанського типу харчування з регламентацією гарантованого вмісту антиоксидантів, концентрація яких для екстремальних умов життєдіяльності повинна перевищувати добові норми потреб (Наказ МОЗ України № 1073 від 03.09.2017 р. «Про затвердження Норм фізіологічних потреб населення України в основних харчових речовинах і енергії» (zareestrovano в Міністерстві юстиції України 02.10.2017 р. за № 1206/31074)) у 2—3 рази.

Етап 7. Вибір стадії технологічного процесу перероблення харчової сировини для внесення антиоксидантної композиції, враховуючи нестабільність її складників під дією підвищених температур і можливих втрат.

Етап 8. Оцінка органолептичних показників готового продукту, його якісних і споживчих характеристик, безпеки та відповідності потребам організму в умовах бойових дій.

Етап 9. Оцінка соціальної ефективності нових продуктів, яка опосередковано визначається за позитивним впливом на стан здоров'я військових, а також при включенні до складу комплексної терапії хворих або поранених та скороченням термінів реабілітації.

Етап 10. Розроблення нормативної документації (технічні умови, технологічні інструкції, технологічні регламенти) на виробництво нових продуктів антиоксидантного спрямування.

Етап 11. Розроблення дієтологами, нутриціологами, гігієністами практичних рекомендацій щодо введення нових продуктів до раціонів харчування військово-службовців.

Етап 12. Зворотній зв'язок зі споживачами: індивідуальна оцінка військовими вдосконаленого асортименту продуктів за їхніми смаковими характеристиками, позитивним впливом на фізичний та емоційний стан, ступенем насичення, відчуттям задоволення.

Загалом, науково обґрунтований склад нових харчових продуктів як для традиційного типу харчування, так і вегетаріанського, використання сучасних технологій їх виробництва з дотриманням основних принципів та вимог до безпеки і якості гарантує наступні позитивні ефекти при постійному вживанні сформованих раціонів:

- усунення недостатності харчування та компенсацію дефіциту певних сполук, що виникає під впливом екстремальних чинників довкілля;
- ослаблення впливів токсичних елементів довкілля;
- поліпшення функціонального стану органів та систем організму;
- підвищення захисних функцій імунної системи організму;
- підвищення фізичної витривалості, адаптаційних резервів організму і психологічної стійкості в екстремальних ситуаціях;
- прискорення процесів відновлення метаболічних реакцій після підвищених фізичних і нервово-емоційних навантажень, у тому числі після реабілітації;
- поліпшення самопочуття.

Висновки

В умовах війни фізичні та психологічні навантаження на військовослужбовців є надзвичайно високими, тому особливо важливо, щоб харчові продукти повністю задовольняли потреби наших захисників за поживністю, біологічною та енергетичною цінністю, наявністю усіх необхідних біокомпонентів, здатних захищати організм від несприятливих зовнішніх і внутрішніх чинників.

При виборі натуральних складових для виробництва харчових продуктів (традиційних та вегетаріанських) необхідно враховувати їхню сумісність між собою та синергізм дії як у складі продукту, так і на рівні шлунково-кишкового тракту.

Ця рекомендація є особливо ваговою для комплексів біологічно активних речовин, дія яких спрямована на різні функції в організмі людини, забезпечуючи насамперед антиоксидантні та інші протекторні ефекти.

Реформа харчування у Збройних Силах України триває і поступово наближається до стандартів країн НАТО, відповідаючи разом з тим вимогам продовольчої безпеки України; розроблення широкого асортименту нових харчових продуктів за сучасними науково обґрунтованими медико-біологічними принципами є найбільш ефективними способами постійного вдосконалення харчування військово-службовців. Введення до складу раціонів вегетаріанських продуктів потребує ретельного вивчення причинно-наслідкового зв'язку між цим типом харчування і станом здоров'я військових за співвідношенням користь/ризиків.

Матеріали цієї статті, результати досліджень інших науковців створюють реальні передумови своєчасного корегування компонентного складу харчових продуктів для військовиків відповідно до їхніх потреб, а також здійснення нутриціологічної профілактики та лікування аліментарних захворювань.

Перспективами подальших досліджень є пошук нових сировинних джерел з високим вмістом біоантиоксидантів, удосконалення технологій їх перероблення, вивчення нових фізіологічних ефектів БАР рослин, що має привести з часом до повного витіснення зі сфери харчових технологій синтетичних добавок, більшість яких небезпечні для здоров'я людини, і їх заміни натуральними збагачувачами. Усе це становить належну основу для постійного вдосконалення харчових раціонів військовослужбовців.

Подяка

Роботу виконано в рамках держбюджетної науково-дослідної роботи «Наукове обґрунтування та розроблення ресурсоефективних технологій харчової продукції цільового призначення як імператив продовольчої безпеки» № 0123U02060.

Література

Абсаямова, Л. М. (2018). Психологічні основи готовності до змін у харчовій поведінці. *Psychological Journal*, 7(17), 108—117. http://nbuv.gov.ua/UJRN/psch_2018_7_9.

Архипова, М. О. (2023). Фармакотерапевтичний дизайн комплексного рослинного препарату з поліфункціональною дією. *Фітотерапія: часопис*, 3, 83—94. DOI: <https://doi.org/10.32782/2522-9680-2023-3-83>.

Безшейко, В. (2017). Вплив вегетаріанства та веганства на стан здоров'я та тривалість життя. *Психосоматична медицина та загальна практика*, 26. URL: <https://uk.e-medjournal.com/index.php/psp/article/view/40>.

Будняк, Л. (2023). Дослідження вмісту біофлавоноїдів у фітосубстанціях з трави айстри новобельгійської. *Фітотерапія: часопис*, 4, 32—37. DOI: <https://doi.org/10/32782/2522-9680-2023-4-84>.

Бурчинський, С. Г. (2023). Нові підходи до лікування синдрому тривоги. *Ukrainian Medical Journal*, 156(4), 48—56. <https://doi.org/10.32471/unj.1680-3051.156.245548>.

Гойко, І. Ю., Стеценко, Н. О. (2024). Аналіз та тенденції організації харчування військовослужбовців у різних країнах світу. *Технологія виробництва та переробки продукції тваринництва*, 1, 127—133. <https://doi.org/10.33245/2310-9289-2024-186-1-127-135>.

Голобородько, В. М. (2012). *Микола Пирогов в Україні*: монографія. Умань: ПП Жовтий О. О.

Горчакова, Н., Беленічев, І., Гарник, Т., Зайченко, Г., Клименко, О., Горова, Е., Шумейко, О., Маслова, І. (2024). Стреспротекторні властивості фітопрепаратів. *Фітотерапія: часопис*, 3, 5—14. <https://doi.org/10.32782/2522-9680-2024-3-5>.

Гуліч, М. П., Депутат, Ю. М. (2020). Дослідження добових енерговитрат військовослужбовців Сил спеціальних операцій Збройних Сил України. *Здоров'я та довкілля*, 3(96), 32—39. <https://doi.org/10.32402/dovkil2020.03.032>.

Депутат, Ю. М. (2025). Концептуальні засади забезпечення енергетичних потреб військовослужбовців Збройних Сил України за рахунок адекватного харчування: дис. ... д-ра мед. наук (14.02.01 — гігієна та професійна патологія). Київ, ДУ «Інститут громадського здоров'я імені О. М. Марзєєва НАМН України».

Деркач, Т. М., Страшний, В. В. (2018). Вміст біологічно активних речовин та елементний склад трави звіробою. *Фармацевтичний часопис*, 4, 4—11. <https://doi.org/10.11603/2312-0967.2018.4.9576>.

Добровольний, О. Н., Давтян, Л. (2024). Вивчення поліфенольного складу екстрактів м'яти перцевої. *Фітотерапія: часопис*, 3, 175—181. <https://doi.org/10.32782/2522-9680-2024-3-175>.

Дуюн, І. Ф., Марчишин, С. М. (2022). Визначення вмісту каротиноїдів у деревію пагорбового та деревію подового суцвіттях. *Медична та клінічна хімія*, 4(1), 58—62. <https://doi.org/10.11603/mcsh.2410-681X.2022.i1.13038>.

Куновський, В. В., Лаба, О. В., Куновська, Л. О. (2024). Роль пробіотичних культур у формуванні мікробіоти кишки. Вісь мікробіота — кишечник — мозок. *Інфекційні хвороби*, 4, 43—47. <https://doi.org/10.11603/1681-2727.2024.4.15006>.

Кушнір, О. В. (2023). Омега-3 жирні кислоти як складові здорового харчування. <https://www.bsmu.edu.ua/blog/omega-3-zhymy-kysloty-yak-skladovi-zdorovogo-harchuvannya/> (дата звернення 14.05.2025).

Лотоцька-Дудик, У. Б., Крупка, Н. О., Чорна, В. В. (2023). Сучасний стан та організація харчування військовослужбовців ЗСУ в умовах російської агресії проти України. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія: Медицина*, 1(67), 89—94. <https://doi.org/10.32782/2415-8127.2023.67.16>.

Маслійчук, О. Б., Сімахіна, Г. О., Науменко, Н. В. (2023). Наукові засади розроблення продуктів з підвищеним вмістом білка в раціоні харчування військовослужбовців. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. Херсон: Видавничий дім «Гельветика», 6, 120—131. <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2023.6.14>.

Матасар, І. Т., Петрищенко, Л. М., Луценко, О. Г. (2019). Жиророзчинні вітаміни: фізіологічне значення та роль у житті населення екологічно небезпечних регіонів України. *Єдине здоров'я та проблеми харчування України*, 2, 60—77. <https://doi.org/10.33273/2663-9726-2019-51-2-60-77>.

Москоні, Л. (2019) *Їжа для мозку. Наука розумного харчування / пер. з англ.* Київ: Наш формат.

Погорєлов, М. В., Бумейстер, В. І. та ін. (2010). *Макро- та мікроелементи (обмін, патологія та методи визначення): монографія*. Суми: Вид-во СумДУ.

Поготова, Г. А., Чекман, І. С. (2014). Квантово-фармакологічні дослідження властивостей антиоксидантів як лікарських засобів. *Український медичний часопис*, 6, 94—100.

Пригульська, Н. В., Карпенко, П. О., Кравченко, М. Ф., Гнізевич, В. А., Федорова, Д. В., Юдіна, Т. І. (2017). Науково-практичні аспекти розроблення харчових продуктів для військовослужбовців. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*, 23(2), 169—185. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npnuhkt_2017_23_5%282%29_23.

Саган, В., Каплун, С., Фролов, О. (2022). Досвід застосування Каталогів продуктів у системі харчування Збройних Сил України. *Зб. наук. праць Нац. Академії Державної прикордонної служби України*, 3(88), 150—165. http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpnarv_vtn_2022_3_10.

Сімахіна, Г. О., Науменко, Н. В., Михайлова, Р. В., Маслійчук, О. Б. (2024). Концептуальні засади формування комбінованого харчового раціону для екстремальних умов життєдіяльності. *Наукові праці НУХТ*, 30(3), 144—155. <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2024-30-3-13>.

Смалюх, О., Сур, С. (2018). Оцінка складу та вмісту БАР комплексних рослинних екстрактів, отриманих за різними технологіями. *Фармацевтичний часопис*, 4, 13—19. <https://doi.org/10.11603/2312-0967.2010.4.2857>.

Снежкін, Ю. Ф., Петрова, Ж. О., Самоїленко, К. М., Слободянюк, К. С. (2022). *Тепломасообмінні процеси отримання комбінованих функціональних порошків*: монографія. Київ: Наукова думка.

Соломон, А. М. (2024). Роль харчових волокон у функціональному харчуванні. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій*, 26(101), 77—83. <https://doi.org/10.32718/nvlvet-f10112>.

Товма, Л. Ф. (2017). Удосконалення якості лікувального харчування військовослужбовців у стаціонарних і польових умовах. *Science Rise*, 2, 12—15.

Товма, Л. Ф., Морозов, І. Є. та ін. (2023). Обґрунтування необхідності формування бойових сухих пайків і раціонів харчування для забезпечення сил сектору безпеки і оборони України. *Збірник наукових праць Національної Академії Національної Гвардії України*, 2(42), 113—118. <https://doi.org/10.33405/2409-7470/2023/2/42/293391>.

Українець, А. І., Сімахіна, Г. О., Стеценко, Н. О., Науменко, Н. В., Кочубей-Литвиненко, О. В. (2017). *Нові продукти для раціонів військовослужбовців*: монографія. Київ: Видавництво «Сталь».

Чабан, О. С., Хлустова, О. В., Омелянович, В. А. (2022). *Психічні розлади воєнного часу*. Київ: Медицина.

Шебанова, В. І. (2017). *Психологія харчової поведінки*: автореф. дис. ... д-ра психол. наук. Київ.

Шостак, Т. А., Калинюк, Т. Г., Вронська, Л. В. (2017). Ідентифікація та кількісне визначення флавоноїдів комплексного густого екстракту трави звіробою та квіток нагідок. *Фармацевтичний журнал*, 3—4, 71—78.

Щербань, М. Г., Хорошун, Е. М., Капустник, В. А., М'ясоєдов, В. В. та ін. (2022). *Військова гігієна*. Харків: ХНМУ. <https://repo.knmu.edu.ua/handle/123456789/31203>.

Alotaibi, B. S., Ijaz, M., Buabeid, M., Kharaba, Z. J., Yaseen, H. S., & Murtaza, G. (2021). Therapeutic effects and safe uses of plant-derived polyphenolic compounds in cardiovascular diseases: A review. *Drug Design, Development and Therapy*, 1, 4713—4732. <https://doi.org/10.2147/ddt.s327238>.

Hill, A. (2023). *Ovo-Vegetarian Dies: A Complete Guide and Meal Plan*. <https://www.healthline.com/nutrition/ovo-vegetarian-diet> (access date 14.05.2025).

Khan, J., Deb, P. K., Priya, S., Medina, K. D., Devi, R., Walode, S. G., & Rudrapal, M. (2021). Dietary flavonoids: Cardioprotective potential with antioxidant effects and their pharmacokinetic, toxicological and therapeutic concerns. *Molecules*, 26(13), 4021. <https://doi.org/10.3390/molecules26134021>.

Lacto-Vegetarianism (2023). *What Is Lacto-Vegetarianism? Diet, Benefits & Meal Plans*. <https://www.cookunity.com/blog/what-is-lacto-vegetarian> (access date 14.05.2025).

Lutz, L. J. et al. (2019). Dietary intake in relation to military dietary reference values during army basic combat training; a multi-center, cross-sectional study. *Military Medicine*, 184(3—4), 223—230. <https://doi.org/10.1093/milmed/usy153>.

Richards, L. (2021). *What to know about lacto-ovo-vegetarian diets*. <https://www.medicalnews.com/articles/lacto-ovo-vegetarian> (access date 14.05.2025).

Sumakhina, G. O., Naumenko, N. V. (2021). Antioxidant effectiveness of plant cultures. *Ukrainian Food Journal*, 10(1), 62—76. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2021-10-1-6>.

Smith, A. G., Miles, V. N., Holmes, D. T., Chen, X., & Lei, W. (2021). Clinical trials, potential mechanisms, and adverse effects of arnica as an adjunct medication for pain management. *Medicines*, 8(10), 58. <https://doi.org/10.3390/medicines8100058>.

УДК 537.522; 637.024

RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF A COMPOSITE BASED ON PUMPKIN PUREE AND MALTODEXTRIN

L. Avdieieva, A. Makarenko

*Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Kyiv*

Key words:

*Rheology
Dynamic viscosity
Pumpkin puree
Maltodextrin
Dispersed system
Bioactive compounds*

Article history:

Received 08.07.2025
Received in revised form
28.07.2025
Accepted 12.08.2025

Corresponding author:

A. Makarenko

E-mail:

tbds_itf@ukr.net

Citation: Авдеєва Л. Ю.,
Макаренко А. А. (2025).
Реологічні властивості
комплексу гарбузового
пюре з мальтодекстри-
ном. *Наукові праці НУХТ*,
31(4), 210—220.
DOI: 10.24263/2225-2924-
2025-31-4-17

ABSTRACT

All parts of pumpkin are valuable raw materials for the food industry due to the presence of a complex of biologically active compounds, particularly high levels of vitamins and minerals, pectic substances, dietary fibers, and others. The use of pumpkin pulp puree in the development of functional food products, including sports nutrition, allows for the creation of compositions with enhanced nutritional value. A rational combination of pumpkin puree with high-molecular-weight polysaccharides contributes to the formation of stable dispersed systems with controllable structural and mechanical properties, while also protecting thermosensitive components. One such ingredient is maltodextrin, which, due to its ability to form stable structures, is used to modify the texture and rheological behavior of complex food systems.

The effect of maltodextrin on the rheological characteristics of compositions based on pumpkin puree was examined. The samples were obtained by combining pumpkin puree and maltodextrin in a 1:1 ratio by dry matter content, using mechanical mixing and hydrodynamic dispersion via the discrete-impulse energy input method.

The resulting compositions exhibited rheological behavior typical of non-Newtonian pseudoplastic systems. The most intensive decrease in apparent viscosity was observed as the shear rate increased up to 0.63 s^{-1} , after which the rate of change slowed down. In the zone of fully disrupted structure, the apparent viscosity values decreased by 32.6% at 40 °C and by 42% at 60 °C compared to the baseline at 20 °C. Comparative analysis with samples without maltodextrin addition showed a reduction in viscosity in the experimental samples by 8.4—14.3%, depending on the temperature. This decrease was attributed to the uniform distribution of spherical maltodextrin molecules among the dietary fibers of the pumpkin puree, which increased the system's dispersity and weakened the strength of its structural framework. Samples containing maltodextrin were characterized by a more homogeneous structure, smooth consistency, and resistance to phase separation.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-4-17

РЕОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КОМПЛЕКСУ ГАРБУЗОВОГО ПЮРЕ З МАЛЬТОДЕКСТРИНОМ

Л. Ю. Авдєєва, А. А. Макаренко

Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України

Усі частини гарбуза є цінною сировиною для харчової промисловості через наявність комплексу біологічно активних речовин, зокрема високий вміст вітамінів і мінералів, пектинових речовин, харчових волокон тощо. Застосування пюре з м'якуша гарбуза в технологіях функціональних продуктів харчування, включно зі спортивним харчуванням, дає змогу створювати композиції з підвищеною харчовою цінністю. Раціональне поєднання гарбузового пюре з високомолекулярними полісахаридами сприяє формуванню стабільних дисперсних систем з керованими структурно-механічними властивостями, а також захищає термочутливі компоненти. Одним з таких інгредієнтів є мальтодекстрин, який завдяки своїй здатності до утворення стабільних структур використовується для модифікації текстури та реологічної поведінки складних харчових систем.

У ході дослідження було вивчено вплив мальтодекстину на реологічні характеристики композицій на основі гарбузового пюре. Зразки отримували шляхом поєднання гарбузового пюре та мальтодекстину у співвідношенні 1:1 за вмістом сухих речовин з використанням механічного перемішування та гідродинамічного диспергування методом дискретно-імпульсного введення енергії.

Отримані композиції проявляли реологічні властивості, характерні для неньютонівських псевдопластичних систем. Найінтенсивніше зниження ефективної в'язкості спостерігалось при збільшенні кутової швидкості до $0,63 \text{ c}^{-1}$, після чого темп змін сповільнювався. У зоні гранично зруйнованої структури значення ефективної в'язкості зменшувались на 32,6% при $40 \text{ }^\circ\text{C}$ і на 42% при $60 \text{ }^\circ\text{C}$ порівняно з базовим значенням при $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Порівняльний аналіз зі зразками без додавання мальтодекстину показав зменшення в'язкості в дослідних зразках на 8,4—14,3% залежно від температури. Це зниження пов'язане з рівномірним розподілом сферичних молекул мальтодекстину між харчовими волокнами гарбузового пюре, що підвищує дисперсність системи і знижує міцність її структурного каркасу. Зразки з додаванням мальтодекстину характеризувалися більшою однорідною структурою, гладкою консистенцією та стійкістю до розширення.

Ключові слова: *реологія, динамічна в'язкість, гарбузове пюре, мальтодекстрин, дисперсна система, біологічно активні речовини.*

Постановка проблеми. Раціоналізація сучасного харчування населення потребує включення функціональних компонентів, які не лише доповнюють поживну цінність, але і збагачують його склад цінними біологічно активними речовинами. Всі частини гарбуза є цінним джерелом поживних і біологічно активних речовин, таких як вітаміни, поліненасичені жирні кислоти, ефірні олії, мінеральні речовини, пептиди, полісахариди тощо. Встановлений їх антигіперліпідемічний, протівірусний, протизапальний, антигіперглікемічний, імуномодельючий, антигіпертензивний, антимікробний та антиоксидантний вплив (Hussain та ін., 2022).

Завдяки цьому використання всіх частин гарбуза є перспективним при формуванні полікомпонентних харчових систем з високою біологічною цінністю (Leichtweis та ін., 2022; Ji та ін., 2021).

Останнім часом для збереження термочутливих біологічно активних компонентів і збільшення терміну придатності готового продукту застосовуються різні інноваційні методи інкапсуляції. Одним з таких методів є розпилювальне сушіння. Цей метод сушіння використовуються для отримання порошкоподібних харчових продуктів при дегідратації водних розчинів, емульсій і суспензій з низькою в'язкістю (Mahalakshmi, & Murlidhar, 2022; Tontul, & Topuz, 2017).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Гарбуз є традиційною сільськогосподарською культурою в Україні. Частка посівних площ у 2018—2021 рр. при вирощуванні гарбуза становила 6,9% (30,7 тис. га). Гарбуз входить до I групи з валовим виробництвом понад 1000 тис. ц разом з культурами «борщового набору», а також огірком і кабачком. Частка цього сегменту в загальних валових зборах овочевих культур становить 97,2% (Щетина, 2023). Основні напрямки експорту українських гарбузів — Велика Британія, Румунія та Молдова. У харчових технологіях використовуються переважно мускатні сорти: Арабатський, Новинка, Вітамінний, Прикубанський, Перлина, Арахісовий. Водночас значна частина врожаю не використовується в харчовій промисловості через відсутність промислових технологій для перероблення та умов зберігання (Хареба, & Кокойко, 2022).

Хімічний склад гарбуза багатий на біологічно активні речовини, однак залежить від сорту, умов вирощування й терміну зберігання. Його їстівна частина містить до 75% ваги плода, з яких основну частку складають вуглеводи — як прості (глюкоза, фруктоза, сахароза), так і складні (крохмаль, пектини, клітковина) (Kim, Kim, Kim, Choi, & Lee, 2012). Пектинові речовини та харчові волокна не лише впливають на структуру продукту, а й мають функціональні властивості — знижують рівень холестерину, регулюють вуглеводний обмін, стимулюють кишкову мікрофлору та підсилюють дію вітамінів (Park, Cha, Park, Kang, & Seog, 1997). Споживання пектинів пов'язують зі зменшенням ризику серцево-судинних захворювань, ожиріння, діабету, тромбозів тощо (García-Carrizo, Galmés, Picó, Palou, & Rodríguez, 2022; Muñoz-Almagro, Montilla, & Villamiel, 2020).

Гарбуз також є джерелом важливих макро- і мікроелементів: калію, кальцію, магнію, фосфору, заліза, йоду, цинку, марганцю, міді та кобальту, які беруть участь у численних обмінних процесах (Dar, Sofi, & Rafiq, 2017; Leichtweis та ін., 2022). Тому його їстівну частину можна розглядати як перспективну сировину для створення функціональних продуктів харчування, зокрема для харчування людей із підвищеними фізичним навантаженням, в т. ч. військових і спортсменів.

Таким чином, гарбузове пюре дає змогу збагатити продукти харчування комплексом біологічно активних речовин. У харчовій промисловості його використовують як у вигляді пюре, соків, паст та соусів, так і у формі сухих порошоків (Хареба, & Кокойко, 2022; Aziz та ін., 2023). Однією з особливостей організації процесу тепловологообміну при розпилювальному сушінні для отримання сухих порошкових продуктів є низька в'язкість вихідної рідинної дисперсної системи, тому ефективне розроблення нових технологій виробництва порошкових продуктів вимагає аналізу структурно-механічних і функціонально-технологічних властиво-

стей початкових дисперсних систем, зокрема визначення реологічних характеристик композицій з гарбузовим пюре. Реологічні дослідження є ефективним інструментом для аналізу механізмів структурних змін у харчових системах під впливом зсувних навантажень і деформацій, характерних для технологічних процесів.

При дослідженні динамічної в'язкості було встановлено, що гарбузове пюре, отримане в результаті 1 циклу гомогенізації в роторно-пульсаційному апараті (РПА), характеризується досить високими значеннями ефективної в'язкості, що пов'язано зі значною жорсткістю харчових волокон сировини (Авдєєва, & Макаренко, 2024). Для зниження в'язкості можна застосовувати різні методи, такі як посилення гідромеханічного впливу або використання високомолекулярних полісахаридів або білків. Автори (Tan, & Kerr, 2015) вивчали вплив гомогенізації під високим тиском на мікроструктуру та в'язкість томатного пюре. Було доведено, що ступінь гідромеханічної обробки суттєво впливає на реологічну поведінку продукту, зокрема на показники зсувної в'язкості. Це підкреслює доцільність врахування таких параметрів і для гарбузових систем.

Раціональне поєднання гарбузового пюре з високомолекулярними полісахаридами сприяє формуванню стабільних дисперсних систем із керованими структурно-механічними властивостями. У праці (Zhou et al., 2017) було досліджено вплив олігосахаридів на реологічні властивості крохмалю батату. Автори встановили, що додавання полісахаридів суттєво змінює пастинг-профіль, термостійкість і в'язкісні характеристики дисперсій, що є важливим при розробці функціональних харчових систем. Подібні принципи можна екстраполювати й на композиції з гарбузовим пюре.

Одним з інгредієнтів, який широко використовується для модифікації текстури та зміни реологічної поведінки складних харчових систем, є мальтодекстрин. Мальтодекстрин має широкий спектр функцій: загущувач, стабілізатор, наповнювач, носій смаку і замітник жиру (Chronakis, 1998). Завдяки амфіфільній природі та гнучкій полімерній структурі він впливає на властивості продуктів: розчиняється у воді, знижує в'язкість, утворює гелі, стабілізує емульсії тощо. Крім того, він може поліпшувати властивості гетерогенної системи під час розпилювального сушіння, покращуючи умови тепловологопереносу і знижуючи адгезійні властивості сухих порошкових продуктів (Турчина, Жукотський, Авдєєва, & Макаренко, 2018; Vargas, Saldarriaga, Sánchez, Cuellar, & Paladines, 2024).

У (Juszczak et al., 2013) було вивчено вплив мальтодекстринів із різними значеннями декстрозного еквівалента (DE) на реологічні властивості паст та гелів картопляного крохмалю. Автори виявили, що додавання мальтодекстринів середнього DE (18,4) призводить до значного зниження в'язкості при пастеризації, зменшення видимої в'язкості під час течії та витримці. Ці результати свідчать про потенціал використання мальтодекстрину як модифікатора текстури в овочевих пюре, включаючи гарбузове, для покращення їх реологічних властивостей та стабільності.

Особливу увагу приділено дослідженню (Stępień, Witczak, & Witczak, 2020), в якому було побудовано діаграми стану порошоків гарбуза з різним вмістом мальтодекстрину. Автори встановили, що додавання мальтодекстрину значно впливає на температуру склування та вологопоглинальні властивості композицій, знижуючи вміст мономолекулярно зв'язаної води та підвищуючи критичну температуру

зберігання. Встановлено, що при додаванні 50% мальтодекстрину критична температура склування суміші зростає з $-31,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, що дає змогу зберігати продукт за менш екстремальних температурних умов без втрати якості. Отримані результати є важливими для прогнозування стабільності порошкових композицій на основі гарбуза та підтверджують доцільність застосування мальтодекстрину як функціонального компонента для стабілізації харчових композицій на основі пюре гарбуза.

Авторами статті було запропоновано використання мальтодекстрину у складі рецептури при розробленні технології нових видів сухих порошкових продуктів з природними біологічно активними речовинами. Залишається невивченим питання про реологічну поведінку композицій гарбузового пюре та мальтодекстрину в умовах змін температури й швидкостей зсуву, що є важливими характеристиками для створення якісних порошкових продуктів одержаних методом розпилювання. Наші дослідження зосереджені на вивченні цього питання.

Метою дослідження є встановлення закономірностей впливу мальтодекстрину на динамічну в'язкість композиції на основі гарбузового пюре за різних температур і швидкостей зсуву.

Матеріали і методи. Гарбуз мускатного сорту «Медова красуня», що відповідає ДСТУ 3190-95 Гарбузи продовольчі свіжі. Технічні умови.

Дослідні зразки гарбузового пюре були отримані шляхом миття, очищення, бланшування м'якоті гарбуза впродовж 20 хв та подальшої гомогенізації в роторно-пульсаційному апараті (РПА) циліндричного типу впродовж трьох циклів.

У дослідженні використовували харчовий мальтодекстрин «Maltodextrin DE 15-20» з такими характеристиками: декстрозний еквівалент 15—20, масова частка основної речовини $\geq 99\%$, рН 1% розчину 4,5—6,5, реакція з йодом — відсутня, країна походження Китай.

Дослідні зразки композицій отримували в результаті змішування гарбузового пюре і мальтодекстрину у співвідношенні 1:1 за сухими речовинами за допомогою механічного перемішування і диспергування методом дискретно-імпульсно-го введення енергії (ДІВЕ) в РПА впродовж трьох циклів.

Для характеристики реологічних властивостей гарбузового пюре використовували метод вимірювання динамічної в'язкості за допомогою ротаційного віскозиметра Brookfield LVDV-E. Для зменшення похибки при визначеннях був використаний дисковий шпindel 63 з діапазоном вимірювання від 2,0 мПа·с до 60 000 мПа·с. Дослідження проводили при умовах термостатування продукту при температурах $20\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $40\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $60\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ і кутовій швидкості від 0,21 рад/с до 10,5 рад/с. Температуру регулювали та автоматично підтримували за допомогою термостату. Інтервал температур обраний з урахуванням режимів роботи у виробничих умовах. Після підготовки зразків до вимірювань їх залишали на 5—10 хв для відновлення структурних міжмолекулярних зв'язків і вирівнювання температури проби.

Викладення основних результатів дослідження. На першому етапі дослідження було проведено визначення реологічних властивостей гарбузового пюре, отриманого шляхом гідромеханічної обробки м'якоті гарбуза без додаткових інгредієнтів. Це дало змогу охарактеризувати базову реологічну поведінку сировини та визначити потенційні труднощі її технологічного використання, зокрема у

процесах розпилювального сушіння. Отримані дані стали основою для порівняння з властивостями полікомпонентних композицій, у складі яких використано функціональні добавки.

Незважаючи на високу ефективність застосування РПА для гомогенізації фруктово-овочевої сировини (Kaur, Orsat, & Singh, 2021), дослідні зразки гарбузового пюре, отримані в результаті одного циклу оброблення, характеризувались недостатньою однорідністю структури з великим діапазоном розмірів утворених частинок (Szczepańska, Skąpska, & Marszałek, 2021; Авдєєва, & Макаренко, 2024). Тому для зменшення ступеня дисперсності частинок у гомогенізованому гарбузовому пюре було запропоновано посилення впливу гідромеханічної обробки на сировину за рахунок збільшення циклічності обробки дослідних зразків у РПА. Результати досліджень залежності ефективної в'язкості від кутової швидкості дослідного зразка гарбузового пюре, отриманого в результаті трьох циклів обробки в РПА при різних температурах, наведені на рис. 1.

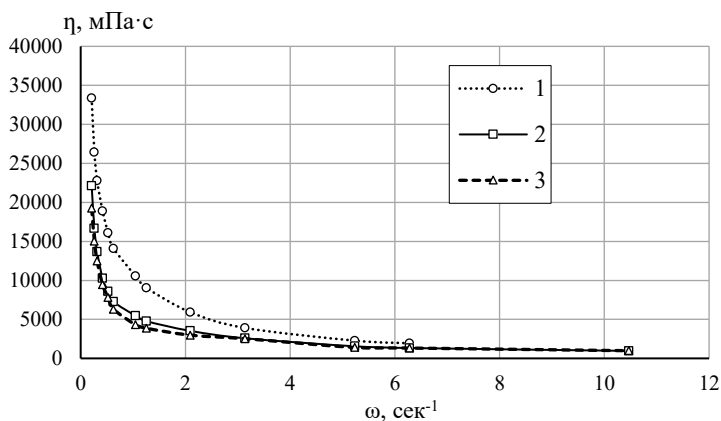


Рис. 1. Залежність ефективної в'язкості від кутової швидкості дослідних зразків гарбузового пюре, отриманого в результаті трьох циклів обробки в РПА:
1 — $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 — $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 — $T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Проведені дослідження (рис. 1) показали, що дослідні зразки гарбузового пюре за реологічною поведінкою відносяться до неньютонівських псевдопластичних матеріалів, в яких значення в'язкості непропорційно знижуються зі збільшенням швидкості зсуву. Під дією механізмів ДІВЕ при диспергуванні гарбузового пюре відбувається інтенсивний гідромеханічний вплив, лінійні волокна клітин клітковини та інших високомолекулярних полісахаридів подрібнюються, збільшується дисперсність частинок з утворенням нових формам зв'язку вологи. В результаті дослідні зразки дисперсії набувають високої однорідності і стійкості консистенції. В зоні низьких швидкостей, при значеннях кутової швидкості до $0,6\text{ c}^{-1}$ відбувається спочатку повільне, а потім лавиноподібне руйнування структури і значення динамічної в'язкості дослідної дисперсної системи інтенсивно зменшуються. Далі процес дещо сповільнюється і при кутовій швидкості $5,2\text{ c}^{-1}$ структура практично зруйнована, що відповідає найменшим значенням в'язкості. При низькій темпера-

турі дослідження 20 ± 2 °C в'язкість дослідного зразка є найбільшою через зростання питомої поверхневої енергії в результаті збільшення дисперсності частинок і посилення міжмолекулярних зв'язків, що призводить до повторного структуроутворення. Підвищення температури послаблює міжмолекулярну взаємодію між частинками. Найбільш ефективний вплив температури спостерігається в зоні інтенсивного руйнування структури дисперсної системи при кутовій швидкості від $0,63 \text{ с}^{-1}$ до 3 с^{-1} . Підвищення температури з 20 °C до 60 °C на цій ділянці знижує значення в'язкості в 1,64 раза або майже на 40%. У зоні практично зруйнованої структури підвищення температури досліджень майже не впливає на значення в'язкості для дослідних зразків і дорівнює $1300\text{—}1400$ мПа·с.

Таким чином, реологічна поведінка дисперсної системи залежить як від швидкості деформування, так і від температури, але в різних зонах вплив цих чинників відрізняється. При низьких кутових швидкостях до $0,3 \text{ с}^{-1}$, через велику жорсткість утвореного каркасу частинок дисперсної фази, на значення ефективної в'язкості більше впливають прикладені механічні зусилля зсуву ніж температура. При збільшенні кутових швидкостей від $0,63 \text{ с}^{-1}$ до 5 с^{-1} відбувається інтенсивне руйнування структури дисперсної системи, зменшуються залежність в'язкості від молекулярної маси, при цьому на в'язкість впливають як швидкість (напруження) деформування, так і температура. В останній зоні, зоні гранично зруйнованої структури, система набуває властивостей ньютонівських рідин.

Реологічні дослідження гомогенізованої м'якоти гарбуза виявили дуже високі значення динамічної в'язкості через наявність значної кількості харчових волокон, що утворюють міцний каркас. Такі властивості ускладнюють технологічну переробку і посилюють вимоги до технологічного обладнання лінії. Найпростішим підходом до покращення структурно-механічних властивостей складних харчових дисперсних систем є додавання до рецептури інгредієнтів, які регулюють структурно-механічні характеристики і функціональні властивості складних дисперсних частин. Різноманітність та кількість введених інгредієнтів мають сильний вплив на склад, стабільність і реологічні властивості складних дисперсних систем і є одним із чинників, які визначають якість кінцевого продукту. До таких речовин відносяться білки сухої молочної сироватки, казеїнату натрію, мальтодекстрину тощо (Turk-Gul, Urgan-Ozturk, & Koca, 2023).

Мальтодекстрини широко використовуються в харчовій промисловості для регулювання властивостей складних дисперсних систем. Крім того, мальтодекстрин (MD) є компонентом, який найчастіше використовується для інкапсуляції термолабільних речовин при розпилювальному сушінні (Vargas, Saldarriaga, Sánchez, Cuellar, & Paladines, 2024). Однак для розробки ефективних технологій необхідно мати науково обґрунтовану інформацію щодо реологічної поведінки кожного компонента системи та їх взаємодії між собою. Це дає змогу адаптувати властивості готового продукту до вимог функціонального та спортивного харчування, враховувати специфіку технологічних процесів, зокрема теплової обробки та сушіння, а також вибір технологічного обладнання.

Структура отриманих дослідних композицій гарбузового пюре з мальтодекстрином є однорідною, не схильною до розшарування. Порівняно зі зразками гарбузового пюре консистенція є більш гладкою і рівномірною. Колір дещо світлі-

ший. На рис. 2 представлені результати реологічних досліджень отриманого дослідного зразка композиції гарбузового пюре з мальтодекстрином. Дослідження динамічної в'язкості проводили при температурах термостатування продуктів: 40 ± 2 °C, 60 ± 2 °C. У зв'язку з питанням транспортування маси композиції, а також як контроль використовували температуру досліджень 20 ± 2 °C. При проведенні досліджень кутова швидкість змінювалась від 0,21 рад/с до 10,5 рад/с.

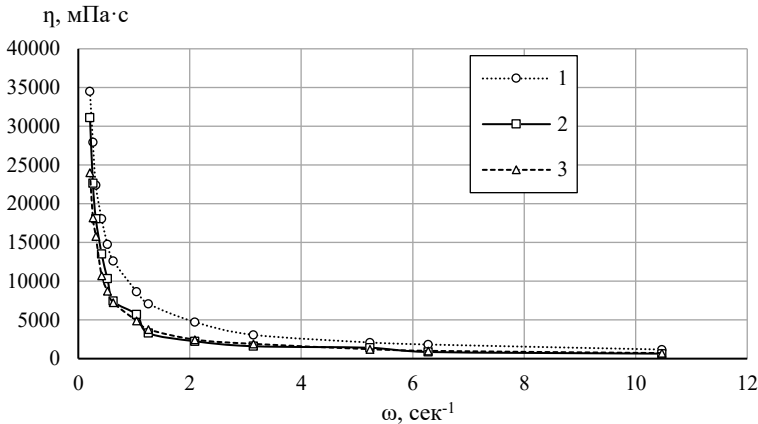


Рис. 2. Залежність ефективної в'язкості від кутової швидкості дослідного зразка композиції гарбузового пюре з мальтодекстрином, отриманого в результаті трьох циклів обробки в РПА: 1 — $T=20$ °C; 2 — $T=40$ °C; 3 — $T=60$ °C

Проведені дослідження (рис. 2) показали, що дослідні зразки композиції гарбузового пюре з мальтодекстрином за реологічною поведінкою відносяться до не-ньютонівських псевдопластичних матеріалів, в яких значення в'язкості непропорційно знижуються зі збільшенням швидкості зсуву не залежно від часу. При низьких кутових швидкостях (до $0,2$ с⁻¹), в зоні практично незруйнованої структури, зразки характеризуються дуже високими значеннями ефективної в'язкості від 24 000 мПа·с до 33 000 мПа·с. Ці значення відповідають значенням, отриманим для гарбузового пюре. Більш високі значення в'язкості характерні для більш низьких температур. При збільшенні кутової швидкості до $0,63$ с⁻¹ спостерігалось найбільш інтенсивне зниження значень ефективної в'язкості для всіх дослідних температур. У наступній зоні при кутовій швидкості до 5 с⁻¹ відбувалось уповільнення інтенсивності зміни значень в'язкості. Подальше збільшення швидкості не призводило до суттєвих змін значень в'язкості, що відповідає переходу системи в зону практично зруйнованої структури. Значення в'язкості в цій зоні є досить високими, але зменшуються з підвищенням температури до 40 ± 2 °C на 32,6% і до 60 ± 2 °C — на 42% від початкового. Отримані результати відповідають висновкам інших дослідників (Ribeiro et al., 2024).

Утворена структура характеризувалась високою дисперсністю, однорідністю, стабільністю і більшою гладкістю, порівняно зі зразком гарбузового пюре з відповідним гідромеханічним ступенем обробки. Порівняння реологічних властивостей цих зразків при кутовій швидкості $5,23$ с⁻¹ при температурі досліджень: 20 ± 2 °C, 40 ± 2 °C, 60 ± 2 °C наведено на рис. 3.

Аналіз властивостей дослідних зразків (рис. 3) показав, що додавання мальтодекстрину в композицію до гарбузового пюре зменшує показники в'язкості в зоні гранично зруйнованої структури для всіх температур.

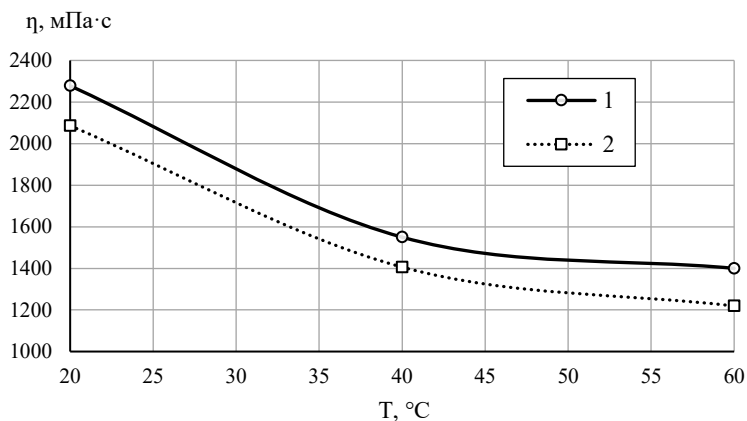


Рис. 3. Значення ефективної в'язкості при кутовій швидкості $5,23 \text{ c}^{-1}$ залежно від температури для дослідних зразків: 1 — гарбузового пюре; 2 — композиція з мальтодекстрином

Таку поведінку можна пояснити збільшенням загальної кількості розчинних твердих речовин у дисперсній системі і рівномірним розподіленням сферичних молекул мальтодекстрину між частково зруйнованими лінійними ланцюгами харчових волокон, присутніх у значній кількості в гарбузовому пюре. Це призводить до зростання ступеня дисперсності всієї системи і послаблення каркасу утвореної структури. Отримані результати підтверджуються результатами інших дослідників (Arilla, Igual, Martínez-Monzó, Codoñer-Franch, & García-Segovia, 2020).

Підвищення температури досліджень призводило до зниження значень в'язкості зразка з мальтодекстрином і збільшення різниці цього показника між двома зразками: для $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ — на 8,4%; для $40 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ — на 9,3%; для $60 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ — на 14,3%, що пов'язано з послабленням сили існуючих міжмолекулярних зв'язків під дією температури і деформації.

Отже, можна зробити висновок про позитивний вплив мальтодекстрину на зниження в'язкості композиції і можливість регулювання реологічних властивостей дисперсної системи відповідно до апаратних особливостей технологічного потоку, що відповідає результатам інших досліджень (Turk-Gul, Urgu-Ozturk, & Koca, 2023; Chronakis, Kasapis, & Richardson, 1996).

Висновки

Одним із важливих полісахаридів, що широко використовується у виробництві функціональних харчових продуктів, зокрема спортивного харчування, є мальтодекстрин. У ході дослідження було встановлено, що введення мальтодекстрину до складу композиції з гарбузовим пюре у співвідношенні 1:1 за сухими речовинами позитивно впливає на реологічні характеристики системи. Зокрема, спостерігалося зменшення показника ефективної в'язкості в зоні гранично зруйнованої структури на 8,4—14,3% залежно від температури досліджень ($20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, $40 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$,

60±2 °C). Така поведінка пояснюється підвищенням ступеня дисперсності композиції, збільшенням кількості розчинних твердих речовин та ослабленням просторового каркасу за рахунок рівномірного розподілу сферичних молекул мальтодекстрину між лінійними структурами харчових волокон. Отримана дисперсна система характеризується високою стабільністю, однорідністю, гладкістю текстури та відсутністю схильності до розшарування, що є важливим чинником при розробці харчових продуктів з прогнозованими технологічними властивостями. Отже, мальтодекстрин може розглядатися як ефективний структуроутворювач і модифікатор реологічних властивостей у технологіях створення інноваційних харчових композицій на основі гарбузового пюре.

Література

- Arilla, E., Igual, M., Martínez-Monzó, J., Codoñer-Franch, P., & García-Segovia, P. (2020). Impact of resistant maltodextrin addition on the physico-chemical properties in pasteurised orange juice. *Foods*, 9(12), 1832. <https://doi.org/10.3390/foods9121832>.
- Aziz, A., Noreen, S., Khalid, W., Ejaz, A., Rasool, I. M., Munir, A. F., Javed, M., Ercişli, S., Okcu, Z., Marc, R., Nayik, G., Ramniwas, S., & Uddin, J. (2023). Pumpkin and Pumpkin Byproducts: Phytochemical Constituents, Food Application and Health Benefits. *ACS Omega*, 8, 23346—23357. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c02176>.
- Chronakis, I. S. (1998). On the molecular characteristics, compositional properties, and structural-functional mechanisms of maltodextrins: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 38, 599—637.
- Chronakis, I. S., Kasapis, S., & Richardson, R. K. (1996). Small deformation rheological properties of maltodextrin-milk protein systems. *Carbohydrate Polymers*, 29(2), 137—148. [https://doi.org/10.1016/0144-8617\(96\)00014-8](https://doi.org/10.1016/0144-8617(96)00014-8).
- Cui, S., Xie, W., & Ge, S. (2020). Effect of cellulose nanocrystals on pasting and rheological properties of sweet potato starch. *Science and Technology of Food Industry*, 41(20), 54—57, 78. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.20.009>.
- Dar, H. A., Sofi, S. A., & Rafiq, S. (2017). Pumpkin, the functional and therapeutic ingredient: A review. *International Journal of Food Science and Nutrition*, 2(6), 165—170. <https://www.foodsciencejournal.com/assets/archives/2017/vol2issue6/2-5-50-591.pdf>.
- Dokic, P., Jakovljevic, J., & Dokic-Baucal, L. (1998). Molecular characteristics of maltodextrins and rheological behaviour of diluted and concentrated solutions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 141, 435—440. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(97\)00118-0](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(97)00118-0).
- García-Carrizo, F., Galmés, S., Picó, C., Palou, A., & Rodríguez, A. (2022). Supplementation with the Prebiotic High-Esterified Pectin Improves Blood Pressure and Cardiovascular Risk Biomarker Profile, Counteracting Metabolic Malprogramming. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70, 13200—13211. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c03143>.
- Hussain, A., Kausar, T., Sehar, S., Sarwar, A., Ashraf, A. H., Jamil, M. A., Noreen, S., Rafique, A., Iftikhar, K., Aslam, J., Quddoos, M. Y., Majeed, M. A., & Zerlasht, M. (2022). Utilization of pumpkin, pumpkin powders, extracts, isolates, purified bioactives and pumpkin based functional food products: A key strategy to improve health in current post COVID 19 period: An updated review. *Applied food research*, 2(2), 100241. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100241>.
- Ji, X., Peng, B., Ding, H., Cui, B., Nie, H., & Yan, Y. (2021). Purification, Structure and Biological Activity of Pumpkin Polysaccharides: A Review. *Food Reviews International*, 39, 307—319. <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1904973>.
- Juszczak, L., Gałkowska, D., Witczak, T., & Fortuna, T. (2013). Effect of maltodextrins on the rheological properties of potato starch pastes and gels. *International Journal of Food Science*, Article ID 869362. <https://doi.org/10.1155/2013/869362>.
- Kaur, G. J., Orsat, V., & Singh, A. (2021). An overview of different homogenizers, their working mechanisms and impact on processing of fruits and vegetables. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(14), 2004—2017. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1969890>.

Kim, M. Y., Kim, E. J., Kim, Y.-N., Choi, C., & Lee, H.-Y. (2012). Comparison of the chemical compositions and nutritive values of various pumpkin (Cucurbitaceae) species and parts. *Nutrition Research and Practice*, 6(1), 21—27. <http://dx.doi.org/10.4162/nrp.2012.6.1.21>.

Leichtweis, M., Molina, A., Pires, T., Dias, M., Calhelha, R., Bachari, K., Ziani, B., Oliveira, M., Pereira, C., & Barros, L. (2022). Biological Activity of Pumpkin Byproducts: Antimicrobial and Antioxidant Properties. *Molecules*, 27. <https://doi.org/10.3390/molecules27238366>.

Mahalakshmi, M., & Murlidhar, M. (2022). Microencapsulation of fruit juices: Techniques, properties, application of fruit powder. *Journal of Food Process Engineering*, 46. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14226>.

Muñoz-Almagro, N., Montilla, A., & Villamiel, M. (2020). Role of pectin in the current trends towards low-glycaemic food consumption. *Food research international*, 140, 109851. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109851>.

Park, Y. K., Cha, H. S., Park, M. W., Kang, Y. H., & Seog, H. M. (1997). Chemical components in different parts of pumpkin. *Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition*, 26, 639—646.

Ribeiro, S., Nascimento, A., Lima, J., Batista, L., Almeida, R. et al. (2024). Modulation of rheological and textural properties in avocado pulp: Impact of maltodextrin concentration and temperature. *Food Materials Research*, 4, e014. <https://doi.org/10.48130/fmr-0024-0005>.

Stępień, A., Witczak, M., & Witczak, T. (2020). Sorption properties, glass transition and state diagrams for pumpkin powders containing maltodextrins. *LWT — Food Science and Technology*, 134, 110192. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110192>.

Szczepańska, J., Skąpska, S., & Marszałek, K. (2021). Continuous high-pressure cooling-assisted homogenization process for stabilization of apple juice. *Food and Bioprocess Technology*, 14, 1101—1117. <https://doi.org/10.1007/s11947-021-02611-4>.

Tan, J., & Kerr, W. L. (2015). Rheological properties and microstructure of tomato puree subject to continuous high pressure homogenization. *Journal of Food Engineering*, 166, 45—54. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.05.025>.

Tontul, I., & Topuz, A. (2017). Spray-drying of fruit and vegetable juices: Effect of drying conditions on the product yield and physical properties. *Trends in Food Science & Technology*, 63, 91—102. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.03.009>.

Türk-Gül, A., Urgan-Oztürk, M., & Koca, N. (2023). The effects of different amounts of maltodextrin on the rheological behaviour and stability of white cheese emulsions, and the physical, microstructural, chemical and sensory properties of white cheese powders. *International Dairy Journal*, 138, Article 105552. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2022.105552>.

Vargas, V., Saldarriaga, S., Sánchez, F. S., Cuellar, L. N., & Paladines, G. M. (2024). Effects of the spray-drying process using maltodextrin on bioactive compounds and antioxidant activity of the pulp of the tropical fruit açai (*Euterpe oleracea* Mart.). *Heliyon*, 10(13), e33544. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33544>.

Zhou, D. N., Zhang, B., Chen, B., & Chen, H. Q. (2017). Effects of oligosaccharides on pasting, thermal and rheological properties of sweet potato starch. *Food Chemistry*, 230, 516—523. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.03.088>.

Авдєєва, Л. Ю., Макаренко, А. А. (2024). Дослідження динамічної в'язкості гарбузового пюре, зважаючи на вплив гідромеханічних і температурних факторів. *Наукові праці НУХТ*, 30(3), 189—198. <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2024-30-3-17>.

Турчина, Т. Я., Жукотський, Е. К., Авдєєва, Л. Ю., & Макаренко, А. А. (2018). Вплив мальтодекстрину як структуруючої добавки на процес сушіння крапель емульсій з фосфоліпідними наноструктурами. *Теплофізика та Теплоенергетика*, 40(4), 19—24. <https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.03>.

Хареба, В. В., & Кокойко, В. В. (2022). *Гарбуз: біологія, технологія вирощування та переробки*: монографія. Аграрна наука. <https://doi.org/10.31073/978-966-540-549-8>.

Щетина, С. В. (2023). Оцінка стану вирощування овочевих культур в умовах відкритого ґрунту в Україні. *Збалансоване природокористування*, 3, 144—152. <https://doi.org/10.33730/2310-4678.3.2023.287829>.

УДК 631

ORGANIC AND BIODYNAMIC AGRICULTURAL PRACTICES IN DENMARK**A. Shevchenko, Yu. Kambulova***National University of Food Technologies***Key words:**

*Organic agrotechnology
Biodynamics
Denmark
Sustainable development
Agriculture
Biodiversity
Crop rotation*

ABSTRACT

There is currently an increased demand worldwide for organic products made from raw materials grown with reduced use of pesticides and fertilizers, due to their positive effects on health, as well as the desire to green production, preserve soil and promote sustainable development. Organic and biodynamic agriculture are becoming increasingly popular within this concept. The most advanced country in terms of the implementation of organic and biodynamic agriculture is Denmark. Denmark was the first country in the world to introduce organic production rules, develop national organic product standards and introduce organic labeling. The Danish government has set a goal that 21% of Denmark's total agricultural land should be devoted to organic farming by 2030. Weed control is based on a balanced crop rotation, which often includes legumes and/or grass clover in combination with mechanical or other physical weed control. Diseases and insect pests in organic farming can also be controlled by crop rotation, resistant crop varieties and the promotion of beneficial insects (predators). It was found that after 40 years of fertilization with green manure and animal manure, the maximum soil compaction was 3% lower than with combined fertilization. This suggested that the addition of green manure or animal manure can reduce the tendency of soil to compaction in organically managed soils, increasing the concentration of organic carbon in the soil and promoting the elasticity and regenerative capacity of the soil. Organically managed soils had higher water infiltration rates. Biodynamic farming is also gaining popularity in Denmark. There are more than 40 companies certified according to the Demeter standard and registered with the Danish Biodynamic Association.

Article history:

Received 14.07.2025
Received in revised form
31.07.2025
Accepted 13.08.2025

Corresponding author:

A. Shevchenko

E-mail:

nastyusha8@ukr.net

Citation: Шевченко А. О., Камбулова Ю. В. (2025). Практики органічних агротехнологій і біодинаміки в Данії. *Наукові праці НУХТ*, 31(4), 221—231.
DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-4-18

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-4-18

ПРАКТИКИ ОРГАНІЧНИХ АГРОТЕХНОЛОГІЙ І БІОДИНАМІКИ В ДАНІЇ

А. О. Шевченко, Ю. В. Камбулова

Національний університет харчових технологій

Наразі у світі спостерігається підвищений попит на екологічні продукти, отримані із сировини, вирощеної зі зменшеним використанням пестицидів і добрив, завдяки їхньому позитивному впливу на здоров'я, а також прагнення до екологізації виробництва, збереження ґрунтів і сталого розвитку. В цій концепції дедалі популярнішими стають органічне та біодинамічне землеробство. Найрозвиненішою країною з точки зору впровадження органічного та біодинамічного землеробства є Данія. Данія була першою країною у світі, яка запровадила правила органічного виробництва, розробила національні стандарти органічної продукції та запровадила органічне маркування. Уряд Данії встановив мету, щоб до 2030 року 21% загальних сільськогосподарських угідь Данії було відведено під органічне землеробство.

Боротьба з бур'янами базується на збалансованій сівозміні, яка часто включає бобові та/або конюшину трав'яну в поєднанні з механічним або іншим фізичним контролем бур'янів. Хвороби та комах-шкідників в органічному землеробстві також можна контролювати за допомогою сівозміни, стійких сортів культур та сприяння поширенню корисних комах (хижаків). Встановлено, що після 40 років удобрення із сидератами та з гноєм тваринного походження максимальна ущільнюваність ґрунту була на 3% нижча, ніж при комбінованому удобренні. Це свідчить про те, що додавання сидератів або гною тваринного походження може зменшити схильність ґрунту до ущільнення в органічно оброблюваних ґрунтах, збільшуючи концентрацію органічного вуглецю в ґрунті та сприяючи еластичності та його відновлювальній здатності. Органічно оброблені ґрунти мають вищі показники інфільтрації води. У Данії розповсюдження набуває також біодинамічне господарювання. Є більше 40 компаній, сертифікованих за стандартом Demeter та зареєстрованих Данською біодинамічною асоціацією.

Ключові слова: органічні агротехнології, біодинаміка, Данія, сталий розвиток, землеробство, біорізноманіття, сівозміна.

Постановка проблеми. Наразі у світі спостерігається підвищений попит на екологічні продукти, отримані з сировини, вирощеної зі зменшеним використанням пестицидів і добрив, завдяки їхньому позитивному впливу на здоров'я. Також важливим є прагнення людства (суспільства) до екологізації виробництва, збереження ґрунтів та сталого розвитку. В цій концепції дедалі популярнішими стають органічне та біодинамічне землеробство. Однак у різних країнах через ряд факторів такі практики впроваджуються по-різному, охоплюючи різний відсоток сільськогосподарських угідь. Найбільш розвинутою країною з точки зору впровадження органічного та біодинамічного землеробства є Данія. У зв'язку з цим важливо розуміти успішні практики, а також виклики, з якими стикаються данські фермери при впровадженні органічного та біодинамічного землеробства.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Органічне сільське господарство широко практикується у світі. У Данії розвиток органічного сільського господарства почався в 1970-х роках. В 1980 році була створена Національна школа органічного землеробства, а в 1981 році — Національна організація фермерів-органіків. Нова організація забезпечила формування правил та схеми сертифікації як першочергові завдання. У середині 1980-х років негативний вплив сучасного сільського господарства на навколишнє середовище був поставлений на перше місце. Органічне землеробство було визнано екологічним та безпечним способом ведення сільського господарства, а отже, і рішенням проблеми негативних наслідків традиційного землеробства. Органічні методи розглядалися як засіб підвищення економічної ефективності ферм, результатом чого стала урядова схема сертифікації та субсидування, яка інституціоналізувала органічне землеробство як частину сільського господарства Данії та як засіб подолання негативного впливу традиційного сільського господарства на навколишнє середовище (Ingemann, 2006). У 1987 році парламент Данії ухвалив Закон про органічне землеробство та затвердив Раду з органічного сільського господарства (зараз Раду з органічних продуктів харчування) (Daugbjerg, & Schwartzman, 2022).

На перетині 90-х і 2000-х розвиток органічного сільського господарства Данії зазнав змін (Joergensen, 2007) і характеризувався збільшенням кількості земель під органічне господарство на більш потужних фермах. Як наслідок, такі ферми суттєво збільшили свої розміри (Levin, Langer, & Frederiksen, 2006).

У 2015 році на площах органічного рослинництва вирощували 57% грубих кормів, цільних культур та трав, 33% зернових, олійних культур та насінневих бобових. Решта, 10% органічного рослинництва, складалось з культур для виробництва насіння, овочів та картоплі, фруктів, а також необроблюваних земель, що знаходились під спеціальними екологічними програмами (Jensen, & Pedersen, 2015). Станом на 2019 рік найбільша частка загального світового обсягу продажів органічної продукції зафіксована в Данії — 11,8%, який забезпечували близько 10% данських ферм, що займались органічним землеробством (Clausen, & Patryeva, 2021). У 2021 році цей показник збільшився до 13,0% (EU CAP Network Thematic Group, 2023).

Зважаючи на збільшення потенціалу Данії щодо розширення площ сільськогосподарських угідь, на яких ведеться органічне господарювання, **метою досліджень** було встановлення особливостей впровадження органічного та біодинамічного методів господарювання в Данії.

Матеріали і методи. У статті було використано методи теоретичного аналізу питання впровадження органічного та біодинамічного сільського господарства в Данії, а також метод узагальнення отриманих при аналізі однакових параметрів.

Викладення основних результатів дослідження. У Європейському Союзі органічне сільське господарство наразі займає близько 5,7% сільськогосподарських площ (Willer, & Lernoud, 2016).

Данія є лідером, однак частка біодинамічного сільського господарства становить незначну частину сільськогосподарських угідь (рис. 1).

Данія була першою країною у світі, яка запровадила правила органічного виробництва, розробила національні стандарти органічної продукції та запровадила органічне маркування.

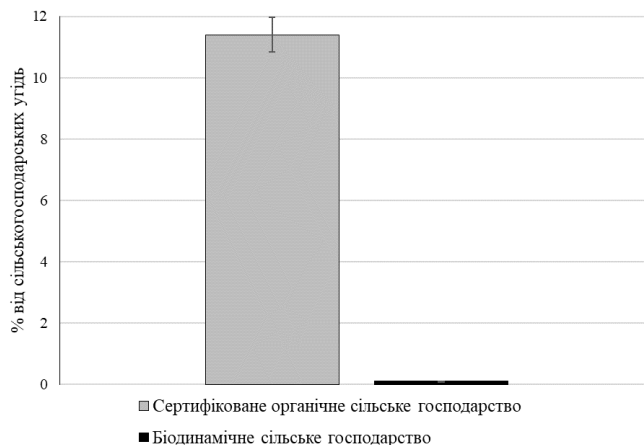


Рис. 1. Частка сертифікованого органічного та біодинамічного сільського господарства станом на 2024 рік (розроблено авторами на основі Paull, & Tuttunen, 2024)

В країні діє державне регулювання та контроль органічного землеробства: Регламент Ради (ЄС) № 834/2007 та Регламент Комісії (ЄС) № 889/2008 застосовуються разом із данськими рекомендаціями. Данським логотипом контролю є червона етикетка «Ø» (Janssen, & Hamm, 2011), що сприяє високій довірі данських споживачів до органічної продукції (Løes та ін., 2015).

В Данії створено ICROFS — Міжнародний центр досліджень органічних харчових систем, що координує наукові і практичні дослідження, підтримує розроблення нових рішень в органічному секторі. Політика Данії включає заходи, спрямовані на створення умов для фермерів при переході на органічне землеробство та на збільшення попиту на органічні продукти харчування. Така модель органічної політики отримала назву «активна політика розвитку ринку» (Daugbjerg, & Sønderkov, 2012). Стратегія прагне зменшити розрив між органічними та традиційними сільськогосподарськими практиками, тим самим зменшуючи розмежування органічного землеробства як альтернативної форми сільського господарства (Noe, 2006).

Як свідчать дані рис. 1, площа сертифікованих органічних сільськогосподарських угідь у Данії дещо зменшилася за останні кілька років. Щоб протидіяти цій тенденції Данське сільськогосподарське агентство збільшило виплати аграріям з органічним сільським господарством. Уряд Данії визначив як одну з пріоритетних політик розвитку до 2030 року збільшення площ органічного землеробства до 21% загальних сільськогосподарських угідь (Højte, Johansen, Fraas, & Flatz, 2024).

В Данії функціонує Данська органічна фермерська національна мережа (DKOOF), де розробляються, документуються та впроваджуються в реальних умовах інноваційні рішення для органічного землеробства. DKOOF зосереджується на інноваціях, розвитку та документуванні у сферах добробуту тварин, підвищення родючості ґрунту та стійких та ефективних систем вирощування сільськогосподарських культур. В розрізі підвищення родючості ґрунту DKOOF розробляють методи

створення міцних ґрунтів шляхом диверсифікації росту рослин та додавання органічної речовини, щоб забезпечити культури достатньою кількістю поживних речовин та діяти як буфер у сухих і вологих погодних умовах. Зусилля зосереджені на скороченому обробітку ґрунту, компостуванні, використанні ефективних покровних культур та заходах регенеративного сільського господарства. Флагманським проектом є CarbonFarm, який розробляє агрономічні, економічні, екологічні атрибути та документує наслідки впровадження стійких систем вирощування сільськогосподарських культур (DKOOF. The Danish organic on-farm living lab).

Значна увага приділяється контролю пестицидів. Данська програма контролю за залишками пестицидів у 2015 році виявила залишки у понад 50% органічних імпортованих фруктів та овочів. Тоді як лише один зразок органічних овочів, вирощених у Данії, містив залишки пестицидів, які були спричинені ненавмисним забрудненням із сусіднього неорганічного поля (Det Økologiske Spisemærke, 2017). У данському органічному виробництві дозволено до використання лише 22 активні речовини, оскільки з 1995 року діє загальна заборона на використання мідних фунгіцидів. Регулятори росту рослин та гербіциди також не дозволені в органічному сільському господарстві. Це має позитивний вплив на біорізноманіття (Merfield та ін., 2015). Боротьба з бур'янами базується на збалансованій сівозміні, яка часто включає бобові та/або конюшину трав'яну в поєднанні з механічним або іншим фізичним контролем бур'янів (Anderson, 2015). Хвороби та комах-шкідників в органічному землеробстві можна контролювати за допомогою сівозміни, стійких сортів культур та сприяння поширенню корисних комах (хижаків) за допомогою функціональних ініціатив щодо біорізноманіття (Jespersen та ін., 2017).

Доведено, що органічне землеробство збільшує біорізноманіття на полях на 30% порівняно з традиційним (Bengtsson, Ahnström, & Weibull, 2005). Матаналіз підтвердив, що 30% збільшення є надійним результатом, який є дійсним протягом 30 років (Tuck та ін., 2014). Механічний обробіток ґрунту, особливо оранка, негативно впливає на кількість та видове різноманіття дощових черв'яків та ґрунтових безхребетних, які беруть участь в процесі ґрунтоутворення (Crittenden, Huerta, de Goede, & Pulleman, 2015).

Було проведено оцінювання овочевих ферм за допомогою інструменту оцінки сталого розвитку RISE 2.0. (Response-Inducing Sustainability Evaluation) за різними критеріями (Häni та ін., 2003). Встановлено, що ерозія, засолення або будівельна діяльність спричинили втрати 0,3—1,4% площі фермерських господарств. Медіанна частка сільськогосподарських угідь з високим вмістом гумусу становила 19%. Підкислювальні добрива використовували 14% ферм, 80% з яких застосовують вапнування. Органічні добрива, які можуть містити важкі метали, використовували 11% фермерів; залишки (наприклад, компост) без аналізу забруднюючих речовин використовували 3% фермерів; а ризик забруднення від автомагістралей або промисловості визнали 8% фермерів. 60% фермерів використовували сільськогосподарський гній.

У данському дослідженні органічних овочевих сівозмін рослинний гній та компост з високим вмістом органічної речовини позитивно вплинули на здатність ґрунту мінералізувати азот. Це проводилося у порівнянні зі свинячим гноєм, який мав високий вміст мінерального азоту (Shanmugam та ін., 2022).

Шкідливе ущільнення ґрунту спостерігали 35% фермерів. Важкі машини з колесним навантаженням понад 2,5 т використовували 78% ферм. Заходи щодо збереження ґрунту (наприклад, подвійні шини, низький тиск у шинах або контрольований рух транспорту) під час використання важкої техніки були впроваджені 65% ферм, а 70% запровадили заходи для покращення стабільності ґрунту (наприклад, вапнування, проміжне озеленення або скорочений обробіток ґрунту). Також були вказані основні проблеми, які негативно вплинули на врожайність та дохід: хвороби, шкідники, бур'яни або грибки та маркетинг (De Olde та ін., 2016).

Було проведено дослідження впливу органічного землеробства на фізичні та фізико-механічні властивості ґрунту. Структурна стабільність ґрунту має вирішальне значення для стійкості та вразливості ґрунту до обробітку, зволоження-висихання, замерзання (Rabot, Wiesmeier, Schluter, & Vogel, 2018). Встановлено, що після 40 років удобрення з сидератами та з гноєм тваринного походження максимальна ущільнюваність ґрунту була на 3% нижча, ніж при комбінованому удобренні. Це свідчить про те, що додавання сидератів або гною тваринного походження може зменшити схильність ґрунту до ущільнення в органічно оброблюваних ґрунтах, збільшуючи концентрацію органічного вуглецю в ґрунті та сприяючи еластичності та відновлювальній здатності ґрунту. Органічне господарювання сприяло збільшенню стабільності вологого агрегату у верхніх 30 см ґрунтового профілю на 12—191% порівняно з конвекційним за рахунок більшої концентрації органічної речовини в ґрунтах (Blanco-Canqui, Ruis, & Francis, 2023).

У природних біотопах Данії, поверхня ґрунту майже завжди покрита рослинами або рослинними залишками, що захищає ґрунт від вітрової або водної ерозії та зменшує коливання вологості та температури. Голий ґрунт також поглинає більше енергії сонячного світла у вигляді тепла, що може пригнічувати мікробну активність у верхніх шарах ґрунту (Kot, Fraç, Lipiec, & Usowicz, 2015).

Органічні ґрунти мають вищі показники інфільтрації води (Williams, Blanco-Canqui, Francis, & Galusha, 2017), що пов'язане зі збільшенням органічного вуглецю та стабільністю агрегатів, а також використанням рослин з глибоким корінням. Для вирощування сільськогосподарських культур важливим показником є здатність ґрунту утримувати воду (Crockett, & Westerling, 2018). Встановлено, що органічне землеробство сприяє покращенню здатності утримувати воду на 6—16%, однак лише при збільшенні концентрації вуглецю в ґрунті (Nima, Aulakh, Sharma, & Kukal, 2021). Крім того встановлено, що збільшенні концентрації вуглецю в ґрунті призводить до збільшення доступного вмісту води для рослин (Blanco-Canqui, Ruis, & Francis, 2023). Однак ряд досліджень не підтверджує це (de Cima, Luik, & Reintam, 2015; Williams, Blanco-Canqui, Francis, & Galusha, 2017). Дослідження (Minasny, & McBratney, 2018) вказують на те, що збільшення концентрації органічного вуглецю в ґрунті на 1% маси збільшує доступну воду до 14,7 мм води на 100 мм ґрунту порівняно з 1,16 мм при використанні неорганічного вуглецю. Для регулювання потоку води, газу та тепла, а також покращення контакту між ґрунтом та коренями всередині ґрунту важливою є наявність середніх пор ґрунту (мезопор). Доведено, що органічне землеробство сприяє рівномірнішому розподілу розмірів пор порівняно з конвекційним (Blanco-Canqui, Ruis, & Francis, 2023).

Тип внесення та тривалість обробітку ґрунту є основними факторами, що впливають на фізичні властивості ґрунту. Безорне землеробство зменшує або усуває

порушення ґрунту та залишає рослинні залишки на поверхні ґрунту, що може сприяти розвитку його структури (Halde, Gagne, Charles, & Lawley, 2017). Така система може зменшити об'ємну щільність та збільшити стабільність вологого агрегату (Di Prima та ін., 2018).

Значний вплив мають також добрива. Вплив внесення добрив з гноєм тваринного походження був більшим, ніж покривних культур або сидератів, що підтверджується зменшенням об'ємної щільності, збільшенням стабільності вологого агрегату, доступної для рослин води та інфільтрації води (Blanco-Canqui, Ruis, & Francis, 2023).

У Данії як добриво використовують біовугілля, виготовлене з рослинної сировини, яке в інших країнах вважається відходом. Його розглядають як таке, що належить до регенеративного сільського господарства в екологічному контексті (Elsgaard та ін., 2022).

Для вирощування органічних культур важливим є забезпечення ґрунту достатньою кількістю азоту в доступній формі. Було досліджено вплив методів ведення органічного сільського господарства на вимивання азоту з використанням підходу балансу азоту. Втрати при органічному господарюванні були в середньому на 40% меншими порівняно з традиційним, залежність спостерігалась від типів ґрунтів — вищі на піщаних ґрунтах, ніж на піщаних суглинках через денітрифікацію. Органічні господарства мали вищий надлишок азоту на полях. Ґрунти з низьким рівнем родючості мали вищий баланс азоту на полях через вищу фіксацію та нижчу врожайність, але значно більше включення ґрунтового азоту. Збільшення використання проміжних культур було найефективнішою сільськогосподарською практикою для зменшення втрат азоту внаслідок вимивання. Запас азоту спостерігався лише в ґрунтах з високим рівнем органічної речовини (Knudsen, Kristensen, Berntsen, Petersen, & Kristensen, 2006). Завдяки обмеженню внесення гною в період, коли культури потребують рослинних поживних речовин, недостатньому постачанню азоту відносно економічно оптимальної норми внесення та обов'язковому вирощуванню культур, які поглинають азот протягом більшої частини року, зменшилося на 45% його вимивання (Sommer, & Knudsen, 2021).

У Данії значна кількість фермерів, які ведуть органічне землеробство, застосовують методи регенеративного обробітку ґрунту, зосереджуючись на мінімальному обробітку ґрунту, включаючи прямий посів, різноманітні покривні культури та сівозміни. Залежно від розміру ферми та схильності до ризиків, рекомендовано впроваджувати практики прямого посіву без оранки та покривних культур паралельно на 10—40% своєї загальної площі з проведенням тестування кожні п'ять років для коригувань. Це сприятиме нормалізації мікробної активності ґрунту, утримання води, боротьби з бур'янами. Покривні культури додають органічні поживні речовини до ґрунту, водночас перешкоджаючи потраплянню сонячного світла на бур'яни та випаровуванню води. Тоді як безорний обробіток допомагає зберегти органічну речовину ґрунту та забезпечує необхідне середовище для ґрунтових мікроорганізмів, щоб зберегти поживні речовини покривних культур. Крім того, встановлено, що застосування методів регенеративного обробітку ґрунту зменшує вилугування азоту на 20—25% порівняно з традиційним землеробством (Jameson, Midtby, Walbom, Møller, & Mikkelsen, 2024).

У Данії можливо мати рослинний покрив протягом тривалої частини року, плануючи сівозмінні з підсівом проміжних культур перед озимим насінням, зимуючими проміжними культурами після однорічних культур та перед ярими та багаторічними культурами, такими як конюшина злакова. Оптимально, щоб вони використовувались як проміжні культури під час ярих культур або якомога швидше після збору врожаю, коли підсів ще неможливий або не розвинений (Jørgensen та ін., 2024).

Важливим аспектом для впровадження практики регенеративного сільського господарства є кліматичні умови. Данський клімат передбачає м'які зими з надмірною кількістю опадів та прохолодне літо.

У Данії розповсюдження набуває також біодинамічне господарювання. Є більше 40 компаній, сертифікованих за Demeter та зареєстрованих Данською біодинамічною асоціацією. Проведене дослідження виробників сільськогосподарської продукції, сертифікованих за Demeter, свідчить про використання складних сівозмін протягом 5 років, важливість інтеграції худоби як складової біодинамічної системи, зокрема для постачання добрив (Oudshoorn, Sørensen, & de Boer, 2011). Замість застосування заходів для боротьби зі шкідниками та комахами, ефективнішою є стабілізована екосистема та здорові рослини. Встановлено, що особливо в період переходу на біодинамічне землеробство різноманітне поєднання культур на полях перешкоджає поширенню хвороб. Для підвищення природної стійкості культури було використано сорти овочів з високим вмістом гірких речовин (Aare, Egmose, Lund, & Hauggaard-Nielsen, 2021).

Доведено, що важливим є зв'язок між вирощуванням та споживанням: навчання біодинамічному землеробству, підвищення знань про біодинамічні продукти, організація заходів з шеф-кухарями, школами та громадськістю для відвідування та ознайомлення з фермою (Gliessman, Friedmann, & Howard, 2019).

Однак виникає ряд викликів: різноманітне фермерство вимагає різноманітних знань та навичок; відсутність підтримки через обмежені дослідження, освіту та консультації в галузі диверсифікованого сільського господарства; немає законодавчої стратегії підтримки різноманітності в сільському господарстві, а навпаки накладаються обмеження; породи та різновиди не розробляються для ферм з кількома функціями та різноманітністю; хоча біодинамічні продукти дорожчі в магазинах, реальна додаткова ціна для фермерів є незначною через високу частку роздрібно-го сектору (Aare, Egmose, Lund, & Hauggaard-Nielsen, 2021).

Таким чином, Данія як лідер ведення органічного сільського господарства, є прикладом для інших країн, зокрема і України. Однак, збільшуючи площі сільськогосподарських угідь під органічне та біодинамічне землеробство, виникає ряд викликів та проблем. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на пошук методів вирішення таких проблем.

Висновки

Дослідження спрямоване на визначення особливостей організації органічного та біодинамічного господарювання в Данії як країні-лідері за площами сільськогосподарських угідь, на яких ведеться органічне сільське господарство.

Данія була першою країною у світі, яка запровадила правила органічного виробництва, розробила національні стандарти органічної продукції та запровадила

органічне маркування. Уряд Данії встановив мету, щоб до 2030 року 21% загальних сільськогосподарських угідь Данії було відведено під органічне землеробство.

Боротьба з бур'янами базується на збалансованій сівозміні, яка часто включає бобові та/або конюшину трав'яну в поєднанні з механічним або іншим фізичним контролем бур'янів. Хвороби та комах-шкідників в органічному землеробстві можна контролювати за допомогою сівозміни, стійких сортів культур та сприяння поширенню корисних комах (хижаків).

Доведено, що органічне землеробство збільшує біорізноманіття на полях на 30% порівняно з традиційними фермами.

Встановлено, що після 40 років удобрення з сидератами та з гноєм тваринного походження максимальна ущільнюваність ґрунту була на 3% нижча, ніж при комбінованому удобренні. Це свідчить про те, що додавання сидератів або гною тваринного походження може зменшити схильність ґрунту до ущільнення в органічно оброблюваних ґрунтах, збільшуючи концентрацію органічного вуглецю в ґрунті та сприяючи еластичності та відновлювальній здатності ґрунту. Органічно оброблені ґрунти мають вищі показники інфільтрації води.

У Данії розповсюдження набуває також біодинамічне господарювання. Є більше 40 компаній, сертифікованих за стандартом Demeter та зареєстрованих Данською біодинамічною асоціацією.

Література

Aare, A. K., Egmose, J., Lund, S., Hauggaard-Nielsen, H. (2021). Opportunities and barriers in diversified farming and the use of agroecological principles in the Global North: The experiences of Danish biodynamic farmers. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 45(3), 390—416. <https://doi.org/10.1080/21683565.2020.1822980>.

Anderson, R. L. (2015). A cultural system to reduce weed interference in organic soybean. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 30, 392—398. <https://doi.org/10.1017/S1742170514000167>.

Bengtsson, J., Ahnström, J., Weibull, A.-C. (2005). The effects of organic agriculture on biodiversity and abundance: a meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*, 42, 261—269. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2005.01005.x>.

Crockett, J. L., Westerling, A. L. (2018). Greater temperature and precipitation extremes intensify Western U.S. droughts, wildfire severity, and Sierra Nevada tree mortality. *Journal of Climate*, 31, 341—354. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0254.1>.

Blanco-Canqui, H., Ruis, S. J., Francis, C. A. (2023). Do organic farming practices improve soil physical properties? *Soil Use and Management*, 40(1). <https://doi.org/10.1111/sum.12999>.

Clausen, O., Patryeva, L. (2021). The Danish model of organic agriculture. *Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science*, 25(1), 53—59. [https://doi.org/10.31521/2313-092X/2021-1\(109\)-7](https://doi.org/10.31521/2313-092X/2021-1(109)-7).

Crittenden, S. J., Huerta, E., de Goede, R. G. M., Pulleman, M. M. (2015). Earthworm assemblages as affected by field margin strips and tillage intensity: an on-farm approach. *European Journal of Soil Biology*, 66, 49—56. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2014.11.007>.

DKOOF. The Danish organic on-farm living lab. Режим доступу: <https://www.agroecologypartnership.eu/dkoof>.

Daugbjerg, C., Sønderkov, K. M. (2012). Environmental policy performance revisited: Designing effective policies for green markets. *Political Studies*, 60(2), 399—418. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9248.2011.00910.x>.

Daugbjerg, C., Schwartzman Y., Organic Food and Farming Policy in Denmark: Promoting a Transition to Green Growth'. (2022). In Caroline de la Porte, and others (eds), Successful Public Policy

in the Nordic Countries: Cases, Lessons, Challenges. Oxford, Oxford Academic. <https://doi.org/10.1093/oso/9780192856296.003.0002>

De Cima, D. S., Luik, A., Reintam, E. (2015). Organic farming and cover crops as an alternative to mineral fertilizers to improve soil physical properties. *International Agrophysics*, 29, 405—412. <https://doi.org/10.1515/intag-2015-0056>.

De Olde, E. M., Oudshoorn, F. W., Bokkers, E. A. M., Stubsgaard, A., Sørensen, C. A. G., & De Boer, I. J. M. (2016). Assessing the Sustainability Performance of Organic Farms in Denmark. *Sustainability*, 8(9), 957. <https://doi.org/10.3390/su8090957>.

Di Prima, S., Rodrigo-Comino, J., Novar, A., Inovino, M., Pirastru, M., Keesstra, S., Cerda, A. (2018). Soil physical quality of citrus orchards under tillage, herbicide, and organic managements. *Pedosphere*, 28, 463—477. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(18\)60025-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(18)60025-6).

EU CAP Network Thematic Group (2023). Thematic Group on Strengthening the position of farmers in the Organic Food Supply Chain. Organic policies in Denmark: Case study.

Elsgaard, L., Adamsen, S. A. P., Henrik, B., Møller, B. H., Winding A., Jørgensen, U., Mortensen, Ø. E., Arthur, E., Abalos, D., Andersen, N. M., Thers, H., Sørensen, P., Dilnessa, A. A., Elofsson, K. (2022). Knowledge synthesis on biochar in Danish agriculture. — DCA advisory report No. 208.

Det Økologiske Spisemærke (2017). Режим доступу: <http://www.oekologisk-spisemaerke.dk/>.

Gliessman, S., Friedmann, H., Howard, P. H. (2019). Agroecology and food sovereignty. *IDS Bulletin*, 50 (2), 684—85. <https://doi.org/10.19088/1968-2019.120>.

Halde, C., Gagne, S., Charles, A., Lawley, Y. (2017). Organic no-till systems in eastern Canada: A review. *Agriculture*, 7, 36. <https://doi.org/10.3390/agriculture7040036>.

Häni, F., Braga, F., Stämpfli, A., Keller, T., Fischer, M., Porsche, H. (2003). RISE, a tool for holistic sustainability assessment at the farm level. *International Food and Agribusiness Management Review*, 6, 78—90.

Højte, S., Johansen, A. B., Fraas, E., Flatz, J. (2024). Impact and Opportunities of the 2023—27 CAP Reform in Denmark, 1—64.

Ingemann, J. H. (2006). The Evolution of Organic Agriculture in Denmark. Centre for Comparative Welfare Studies, Institut for Økonomi, Politik og Forvaltning, Aalborg Universitet.

Janssen, M., Hamm, U. (2011). Consumer Perception of Different Organic Certification Schemes in Five European Countries. *Organic Agriculture*, 1(1), 31—43. <https://doi.org/10.1007/s13165-010-0003-y>.

Jameson, P., Midtby, L., Walbom, L., Møller, S. S., Mikkelsen, J. (2024). The Potential of Regenerative Agriculture in Denmark. Boston Consulting Group. USA.

Jespersen, L. M., Baggesen, D. L., Fog, E., Halsnæs, K., Hermansen, J. E., Andreasen, L., Strandberg, B., Sørensen, J. T., Halberg, N. (2017). Contribution of organic farming to public goods in Denmark. *Organic Agriculture*, 7, 243—266. <https://doi.org/10.1007/s13165-017-0193-7>.

Jensen, K. L., Pedersen, E. (2015). Status og udvikling i dansk økologi i perioden 2005—2014 (status and development of the Danish organic sector, 2005—2014). (2015). In: Jespersen, L. M. Økologiens bidrag til samfundsgoder. ICROFS.

Jørgensen, J. R., Enni, J. A., Dalggaard, T., Horsted, K., Ingvorsen, B., Jakobsen, M., Jensen, E. H., Kongsted, A. G., Thorsøe, M. H., Kristensen, H. L., Pedersen, L. J., Pedersen, T. M., Rasmussen, C., Trkulja, I. (2024). Regenerativ landbrug i økologisk landbrug — en vidensyntese. Rådgivningsrapport fra DCA — Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, Aarhus Universitet. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33546.07369>.

Joergensen, M. S. (2007). Organic Food in Denmark — from Grass Root Initiative to Market Niche: Potentials and Barriers for Further Sustainable Transition. *Environmental Engineering and Management Journal*, 6(5), 381—389. <https://doi.org/10.30638/eemj.2007.046>.

Knudsen, M. T., Kristensen, I. S., Berntsen, J., Petersen, B. M., Kristensen, E. S. (2006). Estimated N leaching losses for organic and conventional farming in Denmark. *The Journal of Agricultural Science*, 144(2), 135—149. <https://doi.org/10.1017/S0021859605005812>.

Kot, A., Frąc, M., Lipiec, J., Usowicz, B. (2015). Biological activity and microbial genetic diversity of bare-fallow and grassland soils. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science*, 65(7), 648—657.

Levin, G., Langer, V., Frederiksen, P. (2006). Structural development in Danish agriculture and its implications for farmland nature. In: Changing European farming systems for a better future. Wageningen Academic. Netherlands. https://doi.org/10.3920/9789086865727_102.

Løes, A-K., Dýrmondsson, Ó. R., Kreismane, D., Mikkola, M., Pehme, S., Rasmussen, I. A., Skulskis, V., Wiwstad, M. (2015). The organic sector in the nordic-baltic region — what is achieved, and what is challenging further growth? 25th Congress Nordic view to sustainable rural development, 79—84.

Merfield, C., Manhire, J., Moller, H., Rosin, C., Norton, S., Carey, P., Hunt, L., Reid, J., Fairweather, J., Bengé, J., Le Quellec, I., Campbell, H., Lucock, D., Saunders, C., MacLeod, C., Barber, A., Mccarthy, A. (2015). Are organic standards sufficient to ensure sustainable agriculture? Lessons from New Zealand's argos and sustainability dashboard projects. *Sustainable Agriculture Research*, 4, 158—172. <https://doi.org/10.5539/sar.v4n3p158>.

Minasny, B., McBratney, A. B. (2018). Limited effect of organic matter on soil available water capacity. *European Journal of Soil Science*, 69, 39—47. <https://doi.org/10.1111/ejss.12475>.

Nima, D., Aulakh, C. S., Sharma, S., Kukal, S. S. (2021). Assessing soil quality under long-term organic Vis-à-Vis chemical farming after twelve years in North-Western India. *Journal of Plant Nutrition*, 44, 1175—1192. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1862195>.

Noe, E. (2006). The paradox of diffusion of organic farming: a case study in Denmark. *Sociological perspectives of organic agriculture: from pioneer to policy*, 210—226. <https://doi.org/10.1079/9781845930387.0210>.

Oudshoorn, F. W., Sørensen, C. A. G., de Boer, I. J. M. (2011). Economic and environmental evaluation of three goal-vision based scenarios for organic dairy farming in Denmark. *Agricultural Systems*, 104(4), 315—325. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2010.12.003>.

Paull, J., Tuttunen, T. (2024). Nordic Pioneers of Biodynamic and Organic Agriculture. *European Journal of Development Studies*, 4(1), 23—30. <https://doi.org/10.24018/ejdevelop.2024.4.1.336>.

Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S., Vogel, H. J. (2018). Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma*, 314, 122—137. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>.

Shanmugam, S., Hefner, M., Labouriau, R., Trinchera, A., Willekens, K., Kristensen, H. L. (2022). Intercropping and fertilization strategies to progress sustainability of organic cabbage and beetroot production. *European Journal of Agronomy*, 140, 126590. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126590>.

Sommer, S. G., Knudsen, L. (2021). Impact of Danish Livestock and Manure Management Regulations on Nitrogen Pollution, Crop Production, and Economy. *Frontiers in Sustainability*, 2, 658231. <https://doi.org/10.3389/frsus.2021.658231>.

Tuck, S. L., Winqvist, C., Mota, F., Ahnström, J., Turnbull, L. A., Bengtsson, J. (2014). Land-use intensity and the effects of organic farming on biodiversity: a hierarchical meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*, 51, 746—755. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12219>.

Willer, H., Lernoud, J. (2016). The World of Organic Agriculture. Statistics and Emerging Trends 2016; Research Institute of Organic Agriculture (FiBL): Frankfurt, Germany; IFOAM—Organics International: Bonn, Germany.

Williams, D. M., Blanco-Canqui, H., Francis, C. A., Galusha, T. D. (2017). Organic farming and soil physical properties: An assessment after 40 years. *Agronomy Journal*, 109, 600—609. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.06.0372>.

УДК 664.683-021.414:67.03-028.76:640.4

INNOVATIVE TECHNOLOGICAL APPROACHES TO COOKIE PRODUCTION FOR THE FOODSERVICE INDUSTRY USING ALTERNATIVE TYPES OF FLOUR

L. Telezhenko, V. Atanasova, Yu. Kozonova, K. Bilyk
Odesa National University of Technology

Key words:

Cookies
Baked confectionery products
Defatted almond flour
Pistachio butter
Stevia
Plant proteins

Article history:

Received 10.07.2025
Received in revised form 29.07.2025
Accepted 15.08.2025

Corresponding author:

V. Atanasova

E-mail:

vitaatanasova@gmail.com

Citation: Тележенко Л. М., Атанасова В. В., Козонова Ю. О., Білик К. О. (2025). Інноваційні технологічні підходи до виробництва печива для закладів ресторанного господарства з використанням альтернативних видів борошна. *Наукові праці НУХТ*, 31(4), 232—245.
DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-4-19

ABSTRACT

The feasibility of using defatted almond flour, pistachio urbech, and stevia in cookie production technology to enhance the nutritional and functional value of the final product is substantiated in the study. A comprehensive comparative analysis of traditional and experimental formulations was conducted, including the assessment of chemical composition, sensory properties, energy value, and physicochemical parameters. It was found that replacing wheat flour with defatted almond flour increased protein content to 22.7 g/100 g, dietary fiber to 9.2%, reduced carbohydrate content to 10.8%, and lowered caloric value by 34%. A significant increase in mineral content (Mg +1395%, Fe +2594%, Zn +189%, Ca +575.9%) and vitamins (E +1276%, B₆ +3380%, B₉ +3751%) was determined. The amino acid profile confirmed the high biological value of the protein. The impact of pistachio urbech on dough structure was analyzed, which ensured elasticity, uniform texture, moisture retention, and extended shelf life without the use of artificial stabilizers.

Stevia reduced the glycemic load and provided a stable taste without the use of sugar. Sensory properties of the product were evaluated, with a total tasting score of 4.8 out of 5. Compliance with regulatory requirements for moisture content and water absorption capacity was confirmed. A technological production scheme was developed and tested under laboratory conditions, confirming the potential of the developed formulation for industrial implementation. It was confirmed that the developed product met the quality criteria of functional foods and can be recommended for consumption by broad population groups, including individuals with metabolic disorders, children, athletes, and those following dietary regimens.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-4-19

ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ДО ВИРОБНИЦТВА ПЕЧИВА ДЛЯ ЗАКЛАДІВ РЕСТОРАННОГО ГОСПОДАРСТВА З ВИКОРИСТАННЯМ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ВИДІВ БОРОШНА

Л. М. Тележенко, В. В. Атанасова, Ю. О. Козонова, К. О. Білик
Одеський національний технологічний університет

У межах дослідження обґрунтовано доцільність використання знежиреного мигдалевого борошна, фісташкового урбечу та стевії в технології виробництва печива для підвищення харчової та функціональної цінності кінцевого продукту. Проведено комплексний порівняльний аналіз традиційної та експериментальної рецептур, що включав оцінку хімічного складу, сенсорних властивостей, енергетичної цінності та фізико-хімічних параметрів. Встановлено, що заміна пшеничного борошна на знежирене мигдалеве підвищує вміст білка до 22,7 г/100 г, харчових волокон — до 9,2 %, знижує вміст вуглеводів до 10,8 %, калорійність — на 34 %. Підтверджено суттєве зростання мінеральних речовин (Mg +1395 %, Fe +2594 %, Zn +189 %, Ca +575,9 %) та вітамінів (E +1276 %, B₆ +3380 %, B₉ +3751 %). Досліджено амінокислотний склад, який підтвердив високу біологічну цінність білка. Проаналізовано вплив фісташкового урбечу на структуру тіста, що забезпечило його еластичність, рівномірність текстури, здатність утримувати вологу та подовжило термін зберігання без застосування штучних стабілізаторів.

Стевія знизилла глікемічне навантаження та забезпечила стабільний смак без використання цукру. Оцінено органолептичні показники виробу, сумарна дегустаційна оцінка склала 4,8 із 5 балів. Доведено відповідність нормативним вимогам за вологістю та здатністю до намокання. Розроблено технологічну схему виробництва та проведено апробацію у лабораторних умовах, що підтвердило перспективність розробленої рецептури для промислового впровадження. Підтверджено, що розроблений виріб відповідає критеріям якості функціональних продуктів і може бути рекомендований для споживання широкими групами населення, включаючи осіб з метаболічними порушеннями, дітей, спортсменів і людей, які дотримуються дієт.

Ключові слова: печиво, борошняні кондитерські вироби, мигдалеве знежирене борошно, фісташковий урбеч, стевія, рослинні білки.

Постановка проблеми. Печиво — один із найпоширеніших видів борошняних кондитерських виробів, що займає провідні позиції в структурі споживання солодкої продукції населення (Сорокіна, 2023). Його популярність пояснюється не лише привабливими смаковими характеристиками, а й зручністю у зберіганні, транспортуванні та вживанні. Однак традиційні рецептури здебільшого базуються на поєднанні рафінованого цукру, пшеничного борошна й твердих жирів. Такий склад сприяє підвищенню калорійності та зниженню нутрієнтної щільності продукту. На фоні зростаючої частки населення з хронічними метаболічними по-

рушеннями, зокрема ожирінням, цукровим діабетом і серцево-судинними захворюваннями, це перетворює споживання традиційного печива на фактор ризику (Yegorov, & Mardar, 2011).

Сучасний стиль життя, що супроводжується нестачею часу, низькою харчовою поінформованістю та схильністю до надмірного споживання технологічно обробленої їжі, спричиняє дефіцит біологічно активних речовин у щоденному раціоні. Відтак, актуальність функціоналізації харчової продукції, зокрема печива, постає як відповідь на потребу у збалансованому та оздоровчому харчуванні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед основних видів печива вирізняють: цукрове, зтяжне, здобне, печиво з начинками, спеціалізоване діабетичне та вівсяне (Новікова, 2015). Кожен з них має власні технологічні особливості, форму, структуру та смакову палітру, орієнтовану на різні групи споживачів.

Актуальним напрямом сучасного кондитерського виробництва є розробка функціональних продуктів, здатних поєднувати органолептичну привабливість із користю для здоров'я. Для цього дедалі частіше використовують нетрадиційну сировину: борошно з амаранту, вівса, рису або гречки, що збагачені клітковиною та антиоксидантами; овочеві пюре та порошки з топінамбуру, моркви, буряку, спіруліни, які доповнюють печиво вітамінами, мінералами та біологічно активними речовинами (Chauhan, Saxena, & Singh, 2015; Inglett, Chen, & Liu, 2015).

Серед інноваційних підходів до розробки рецептур борошняних виробів увагу привертає використання горіхової сировини як джерела цінних нутрієнтів. Одним із перспективних рішень є включення до рецептури знежиреного мигдалевого борошна. Цей інгредієнт не лише збагачує продукт білками, харчовими волокнами, вітамінами групи В та Е, але й є природно безглютеновим, що розширює спектр споживачів, включаючи осіб з непереносимістю глютену. Механічне видалення жиру з борошна дає змогу зберегти більшість мікронутрієнтів при значному зниженні калорійності (Мао, & Hua, 2012).

Ще одним функціональним компонентом виступає фісташковий урбеч — паста зі свіжих горіхів, багата на поліненасичені жирні кислоти, антиоксиданти та мікроелементи. Його введення до складу тіста покращує структурно-механічні властивості, зокрема еластичність і здатність до утримання вологи. Завдяки цьому досягається краща текстура готового виробу та подовжується термін його зберігання (Burbano, Cabezas, & Correa, 2024).

Додатковим чинником, що підвищує цінність оновленої рецептури, є заміна цукру на натуральний підсолоджувач — стевію. Це дає змогу суттєво знизити енергетичну цінність без шкоди для смаку, а також зробити продукт доступним для осіб, які дотримуються дієти з контролем споживання цукрів або мають особливі харчові потреби.

Удосконалення рецептури печива за рахунок введення функціональних інгредієнтів відповідає сучасним науковим тенденціям і сприяє створенню продукції оздоровчого спрямування. Це підвищує біологічну цінність виробу без втрати його смакових якостей. Таким чином, розробка нових формул відкриває перспективи виробництва харчових продуктів із покращеними поживними властивостями, що відповідають запитам сучасного споживача.

У дослідженні (Siqueira, Pacheco, & Naves, 2015) вивчалася поживна якість та біоактивний потенціал частково знежиреного борошна з мигдалю Baru (*Dipteryx*

alata Vog.). Встановлено, що це борошно містить високий рівень білка (49 г/100 г), клітковини та мінералів, зокрема заліза, цинку, магнію та міді. Також виявлено значну кількість фенольних сполук (625 мг/100 г) та добру антиоксидантну здатність (130 мкмоль/еквівалент Тролоксу).

Таблиця 1. Основний хімічний склад і енергетична цінність цілого мигдалю, мигдалевого борошна та автоклавованого частково знежиреного мигдалевого борошна (Siqueira, Pacheco, & Naves, 2015)

Показник	Цілий мигдаль	Мигдалеве борошно	Автоклавоване частково знежирене мигдалеве борошно
Волога	7,38 ± 0,19 (низька)	9,95 ± 0,21 (вища)	7,16 ± 0,00 (низька)
Білки	19,72 ± 0,11 (найнижче)	27,83 ± 0,58 (середнє)	29,05 ± 0,15 (найвище)
Жири	38,37 ± 0,07 (найвищий)	12,59 ± 0,28 (нижчий)	12,97 ± 0,13 (нижчий)
Зола (мінерали)	2,46 ± 0,43 (нижче)	3,81 ± 0,16 (вища)	3,82 ± 0,05 (вища)
Харчові волокна	12,60 ± 0,30 (нижче)	16,12 ± 0,39 (вища)	17,36 ± 0,07 (найвища)
Вуглеводи	19,47 ± 0,22 (нижче)	30,15 ± 0,32 (вищі)	29,64 ± 0,08 (вищі)
Енергія (ккал)	502,09 ± 0,22 (найвища)	345,23 ± 0,32 (нижча)	351,49 ± 0,08 (нижча)

Термічна обробка борошна (автоклавування) покращила профіль незамінних амінокислот, засвоюваність білка та загальну якість білка порівняно з необробленим борошном. Це свідчить про потенціал знежирення борошна з мигдалю як джерела якісного білка та біоактивних сполук для здорового харчування й виробництва функціональних харчових продуктів.

Аналіз даних табл. 2 свідчить про вагомі переваги використання знежиреного мигдалевого борошна для підвищення харчової цінності готового продукту. Передусім його білкова цінність суттєво перевищує показники пшеничного борошна: вміст білка зростає на 29%, що дає змогу ефективніше насичувати продукт амінокислотами, необхідними для синтезу тканин та підтримки метаболізму.

Таблиця 2. Основний хімічний склад пшеничного та знежиреного мигдалевого борошна (USDA FoodData Central)

Показник	Вміст у 100 г	
	пшеничне борошно	мигдалеве знежирене борошно ТМ «SoloSvit»
Білки	10,33	39
Жири	0,98	8,4
Вуглеводи	76,31	13
Харчові волокна	4	17
Калорійність, ккал	364	283

Крім того, мигдалеве борошно є багатим джерелом цінних жирів — понад 60—65 % від загального змісту жирів у ньому припадає на мононенасичені жирні

кислоти, головним чином олеїнову кислоту (Kalita та ін., 2018). Таке харчове джерело корисних жирів асоціюється з достовірним зниженням рівня ліпопротеїнів низької щільності (ЛПНЩ), доповнюючи збереження рівня ліпопротеїнів високої щільності (ЛПВЩ) та поліпшуючи загальні показники ліпідного профілю навіть при ізокалорійній заміні продуктів з високим вмістом насичених жирів (Lee-Bravatti та ін., 2019; Berryman, West, Fleming, Bordi, & Kris-Etherton, 2015). Ба більше, систематичні огляди свідчать, що регулярне споживання мигдалю позитивно впливає на функціональність ендотелію судин, знижує маркери хронічного запалення і таким чином підтримує серцево-судинну систему в кращому функціональному стані.

Не менш важливим є високий вміст харчових волокон у мигдалевому борошні — до 17 %, що приблизно в 2,8 раза перевищує вміст клітковини у звичайному пшеничному борошні. Таке значне накопичення клітковини сприяє нормалізації моторики шлунково-кишкового тракту, адже волокна, особливо їх частки, збільшують об'єм вмісту кишечника, активізуючи перистальтику. Крім того, дослідження демонструють, що волокна мигдалю діють як пребіотики, стимулюючи зростання корисної мікрофлори та підвищуючи концентрацію коротколанцюгових жирних кислот, таких як бутират, важливий для здоров'я слизової оболонки кишечника (Creedon та ін., 2022). У результаті клітковина мигдалевого борошна сприяє зменшенню запальних процесів у шлунково-кишковому тракті та покращує загальну мікробіоту.

Окрім макроелементного складу, мигдалеве борошно відзначається високим вмістом магнію — 270 мг на 100 г продукту, що покриває до 68% рекомендованої добової норми для дорослої людини. Магній бере участь у понад 300 ферментативних реакціях, включаючи синтез білків, регуляцію м'язового тонуусу та стабілізацію нервової системи.

Варто також відзначити високий рівень вітаміну Е — 25 мг/100 г, що більш ніж удвічі перевищує добову норму споживання. Цей жиророзчинний антиоксидант виконує важливу роль у захисті клітинних мембран від ушкодження вільними радикалами та підтримує стабільність імунної системи (Bennet, Arun, & Faraday, 2018).

Таблиця 3. Амінокислотний склад мигдалю, мг/100 г білка (MyFoodData)

Амінокислота, мг	Вміст у 100 г
Гістидин	539
Ізолейцин	751
Лейцин	1473
Лізин	568
Метіонін	157
Фенілаланін	1132
Треонін	601
Триптофан	211
Валін	855

Згідно з аналітичними даними, наведеними в табл. 3, білковий профіль мигдалевого борошна характеризується повним набором незамінних амінокислот, хоча й у меншій кількості порівняно з тваринними білками. Враховуючи це, мигдалеве

борошно може бути корисним компонентом раціону, особливо для вегетаріанців і людей, які шукають альтернативні джерела білка. Найбільшу частку в його складі становлять фенілаланін і лейцин. Ці амінокислоти важливі для білкового синтезу та обміну речовин. Фенілаланін бере участь у синтезі нейротрансмітерів, а лейцин підтримує процеси відновлення м'язів. Їх присутність підвищує поживну цінність продукту (Wu, 2013). Отже, їх наявність суттєво підвищує харчову цінність продукту та його функціональне значення для організму.

Завдяки приємному горіховому смаку, а також добрій кулінарній сумісності, знежирене мигдалеве борошно може безпосередньо замінювати частково пшеничне в рецептурі млинців, печива, булочок та інших борошняних виробів. Це спрощує адаптацію рецептур і дає змогу створювати збалансовану продукцію з покращеними органолептичними властивостями.

Отже, знежирене мигдалеве борошно — не лише білково-клітковинний інгредієнт, а й концентрат біологічно активних речовин, що перетворює традиційне печиво на потенційно оздоровчий продукт з високою функціональною цінністю.

На окрему увагу заслуговує фісташковий урбеч — густа маса, отримана шляхом дрібного помелу сирих горіхів без термічної обробки. Він зберігає всі нутрієнти початкової сировини, зокрема повноцінні білки, жиророзчинні вітаміни (А, Е, К), вітаміни групи В, а також мікроелементи — магній, калій, кальцій, залізо, фосфор і фолієву кислоту (Федорчук, & Льоткіна, 2020).

Фісташки є особливо цінним джерелом мікроелементів, зокрема міді та селену, які беруть участь у регуляції низки життєво важливих процесів. Мідь є незамінним мікроелементом, що бере участь у підтримці ДНК, транспортуванні кисню, синтезі ферментів і захисті клітин від оксидативного стресу. Вона входить до складу антиоксидантних ферментів, зокрема супероксиддисмутази, та забезпечує стабільність церулоплазміну — основного білка-транспортера міді. Крім того, мідь бере участь у метаболізмі заліза, а її дефіцит або надлишок може порушувати клітинні функції.

Селен є необхідним мікроелементом, що бере участь у роботі антиоксидантних ферментів, зокрема глутатіонпероксидази і тіоредоксинредуктази, які захищають клітини від окислювального стресу. За недостатнього надходження селену знижується активність цих ферментів, що може призводити до порушення клітинних функцій. У межах фізіологічної норми селен підтримує стабільність клітинних структур і сприяє нормальній роботі імунної системи (Himoto, & Masaki, 2024).

Завдяки високому вмісту рослинного білка й харчових волокон (табл. 3) урбеч не лише збагачує рецептуру виробів, але й підвищує їх функціональну цінність для широкого кола споживачів — від спортсменів та людей з підвищеною фізичною активністю до осіб, які прагнуть збалансованого харчування, до відновлення після хвороб або підтримки здоров'я в умовах розумових та емоційних навантажень.

Таблиця 4. Вміст нутрієнтів у фісташках сирих (Mandalari та ін., 2022)

Показник	Вміст у 100 г
Білок	20,2
Загальний вміст ліпідів (жирів)	45,3

Продовження таблиці 4

Насичені жирні кислоти	5,9
Мононенасичені жирні кислоти	23,3
Поліненасичені жирні кислоти	14,4
Вуглеводи	27,2
Харчові волокна	10,6
Цукри	7,66

За останні роки поширеність надмірної ваги та ожиріння серед дітей у віці від 7 до 9 років у країнах Європейського регіону ВООЗ залишалася на високому рівні — близько 25% дітей мають надмірну вагу, з яких 11% — ожиріння. В Україні цей показник становить близько 22%, а ожиріння вражає близько 8% дітей цього віку (World Health Organization Regional Office for Europe, 2024). Надмірна вага в дитинстві пов'язана з підвищеним ризиком розвитку серцево-судинних захворювань, діабету 2 типу та інших серйозних хронічних хвороб у дорослому житті. Оцінки ВООЗ вказують на тривожні тенденції та наголошують на необхідності впровадження ефективних заходів для зниження дитячого ожиріння.

У зв'язку з цим зростає потреба в розробці харчових продуктів зі зниженою калорійністю, особливо солодких виробів. Аналіз складу різних груп борошняних кондитерських виробів свідчить, що в таких продуктах, як кекси та деякі види печива (наприклад, здобне та цукрове), підвищена енергетична цінність обумовлена великим вмістом жиру та рафінованого цукру, тоді як у бісквітах і білково-збивному печиві лише високим вмістом цукру.

У зв'язку з цим виникає нагальна потреба в пошуку альтернативних підсолоджувачів, які б дали змогу знизити калорійність солодких виробів без втрати смакових якостей. Природні некалорійні підсолоджувачі, такі як стевія (Schiatti-Sisó, Quintana, & García-Zapateiro, 2023), здобули значну популярність завдяки своїй безпечності, стабільності у харчових продуктах і високій солодкості. Їх впровадження в рецептури кондитерських продуктів відкриває нові можливості для створення дієтичних виробів, що сприяють контролю маси тіла та профілактиці захворювань, пов'язаних з надмірним споживанням цукру.

Важливо зазначити, що в промисловому виробництві використовується високочистий екстракт листя стевії, який містить не менше 95% стевіолглікозидів — природних сполук, що відповідають за солодкість. Ці речовини у 250—300 разів солодші за звичайний цукор (сахарозу) (Ashwell, 2015). Завдяки відсутності калорій і нульовому глікемічному індексу стевія вважається безпечною альтернативою для зниження енергетичної цінності продуктів і підтримки контролю ваги.

Отже, використання стевії у виробництві кондитерських виробів є перспективним напрямом, що дає змогу не лише зменшити вміст доданого цукру, але й знизити ризик розвитку хронічних захворювань, пов'язаних із надмірною масою тіла.

Мета дослідження: обґрунтування ефективності використання знежиреного мигдалевого борошна, фісташкового урбечу та стевії в технології печива для підвищення його харчової та функціональної цінності.

Матеріали і методи. У ході розробки технології виготовлення печива використовували такі інгредієнти: знежирене мигдалеве борошно ТМ «SoloSvit» ДСТУ 3893:2016, яйця курячі ДСТУ 5028:2008, вершкове масло ДСТУ 4399:2005, фісташковий урбеч ЕЭК ООН DDP-10:2007, ядра сирого мигдалю ДСТУ 06:2007, ядра

сирих очищених фісташок ДСТУ 10:2007, стевію ТМ «Green Leaf» ДСТУ 4929:2008, ванільний екстракт ДСТУ 5565-2:2007.

Органолептичні показники: якісна оцінка характеристик продукції (вигляд, колір, запах, смак, консистенція) здійснювалася за допомогою органів чуття (зору, нюху, смаку, дотику) — найшвидший і досить чутливий спосіб оцінки (особливо смаку, запаху, консистенції), який широко застосовується у контролі якості харчових продуктів (Mihafu, Issa, & Kamiyango, 2020).

Для оцінки органолептичних показників якості печива використовувалась 5-бальна шкала, яка включала коефіцієнти вагомості. Формула комплексного показника якості:

$$K_i = K_1a_1 + K_2a_2 + \dots + K_n a_n, \quad (1)$$

де K_n — одиничний показник якості; a_n — коефіцієнт вагомості.

Найважливіші органолептичні характеристики, такі як зовнішній вигляд, консистенція і смак, матимуть найвищий коефіцієнт. Готове печиво оцінювалося за шкалою, де максимальна оцінка — 5 балів, що вказуватиме на відмінну якість. Оцінка на рівні 4 балів буде вказувати на хорошу якість, 3 бали — на задовільну, а 2 бали і нижче вказуватимуть на незадовільну якість печива.

Фізико-хімічні показники: вологість і намочуваність. Вологість визначали гравіметричним методом — висушуванням зразків у сушильній шафі при температурі 105 °С до постійної маси. Вміст води (%) обчислювали як відношення різниці між масою вологого і сухого зразка до маси сухого зразка. Цей метод є класичним і найбільш точним для борошняних кондитерських виробів (Açarı, 2021; Rübner, Balköse, & Robens, 2008).

Намочуваність (здатність до намокання) визначали шляхом занурення висушеного зразка у воду на фіксований час (30 с). Після видалення надлишкової води з поверхні визначали кінцеву масу і обчислювали приріст (%):

$$W = \frac{m_{\text{після}} - m_{\text{початкове}}}{m_{\text{початкове}}} \times 100\%, \quad (2)$$

де $m_{\text{початкове}}$ — маса сухого зразка, $m_{\text{після}}$ — маса після випробування. Методика базується на принципах сорбційного аналізу і широко використовується для оцінки здатності випічки до поглинання рідини (Ponomar та ін., 2022).

Розрахункові методи застосовували для узагальнення експериментальних даних і визначення інтегральних показників якості. Зокрема, за результатами органолептичної оцінки обчислювали комплексний показник якості за формулою вагомих коефіцієнтів.

Викладення основних результатів дослідження. Органолептичні показники (табл. 5) допомогли визначити споживчі переваги дослідних зразків. Згідно з отриманими даними, введення альтернативних інгредієнтів у рецептуру вплинуло на сенсорні характеристики виробів, що дає змогу оцінити доцільність їх подальшого використання у виробництві випічки.

Характеристики виробу визначаються його круглою, правильною формою, що відповідає специфікаціям цього виду випічки, без вм'ятин та з рівними краями. Поверхня гладка, однорідно пропечена, з незначними ознаками підгорілості, без утворення крихт. Колір світло-коричневий із помірним темнішим відтінком на поверхні. На розломі спостерігається рівномірна пористість, без порожнин і слідів непромісу.

Таблиця 5. Органолептична оцінка виготовленого печива

Якісні показники	Характеристика	Коефіцієнт вагомості, a_i	Бал	Добуток $K_i \times a_i$
Зовнішній вигляд	Форма збережена відповідно заданій, без надломів, здуття і тріщин	0,15	5	0,75
Консистенція	Однорідність текстури, відсутність грудочок	0,23	5	1,15
Крихкість	Легкість ламання, відсутність крихт	0,1	4	0,4
Колір	Світло-коричнева поверхня, з темно-коричневою начинкою	0,1	4	0,4
Смак	Відповідає використаній сировині, інтенсивність горіховий	0,23	5	1,15
Запах	Відповідає використаній сировині, виразний горіховий	0,1	5	0,5
Вид у розломі	Однорідність, відсутність пустот	0,09	5	0,45
Разом:		1		4,8

Дегустаційна експертиза підтверджує високу якість продукції. Оцінка за низкою органолептичних показників, враховуючи їхню вагомість, склала 4,8 бала з максимальних 5. Зокрема, максимальні бали отримано за зовнішній вигляд (0,75), консистенцію (1,15), смак (1,15), запах (0,5) та вид у розломі (0,45). Крихкість і колір оцінено на 4 бали, що дало відповідні внески 0,4. Загалом, такі результати свідчать про високий рівень якості та відсутність небажаних ароматичних чи смакових домішок.

Відповідно до розробленої рецептури, у складі використано 46,3% знежиреного мигдалевого борошна, яке характеризується легкою, сухою структурою. Це забезпечує збереження форми печива під час випікання та надає виробу характерної хрусткості. Фісташковий урбеч у концентрації 7,3% надає м'якості й вологості завдяки олійній текстурі. Урбеч як натуральний замітник вершкового масла покращує текстуру і жирність готового продукту. У результаті такого поєднання печиво має хрустку поверхню та ніжну, м'яку середину.

Експериментальні дослідження показали, що використання зазначених компонентів у зазначених пропорціях є оптимальним для досягнення високих органолептичних характеристик готового печива. В результаті проведених випробувань було встановлено, що додавання знежиреного мигдалевого борошна та фісташкового урбечу дає змогу покращити загальні сенсорні показники виробу, зберігаючи при цьому баланс хімічного складу у відношенні до білків, жирів і вуглеводів.

Для таких борошняних кондитерських виробів, як печиво важливими показниками є масова частка вологи. Щоб визначити вологість у печиві застосовували методику висушування до сталої маси. Результати досліджень наведено в табл. 6.

Таблиця 6. Масова частка вологи готового печива

Масова частка вологи, %	Виготовлене печиво
Згідно з нормативною документацією	$\leq 15,5$
Результат випробувань	$\leq 15,2$

Технологія виробництва передбачає такий порядок дій: розм'якшене вершкове масло підігривають до температури 20—24 °С, з'єднують зі стевією та вінільним

екстрактом, замішують. Додають до суміші яйця курячі та перемішують. Попередньо просіяне мигдалеве борошно з'єднують з отриманою масою, ретельно перемішують до однорідності. Отримане тісто розділяють на дві частини у співвідношенні 1/1, до однієї частини тіста додають фісташковий урбеч, попередньо очищені та подрібнені у блендері ядра мигдалю та ядра фісташок, замішують та охолоджують обидві частини тіста до 8—10 °С. Після охолодження з двох частин тіста формують печиво, викладають на пергаментні листи та запікають у заздалегідь розігрітій духовій шафі до 180 °С, протягом 25—30 хвилин.

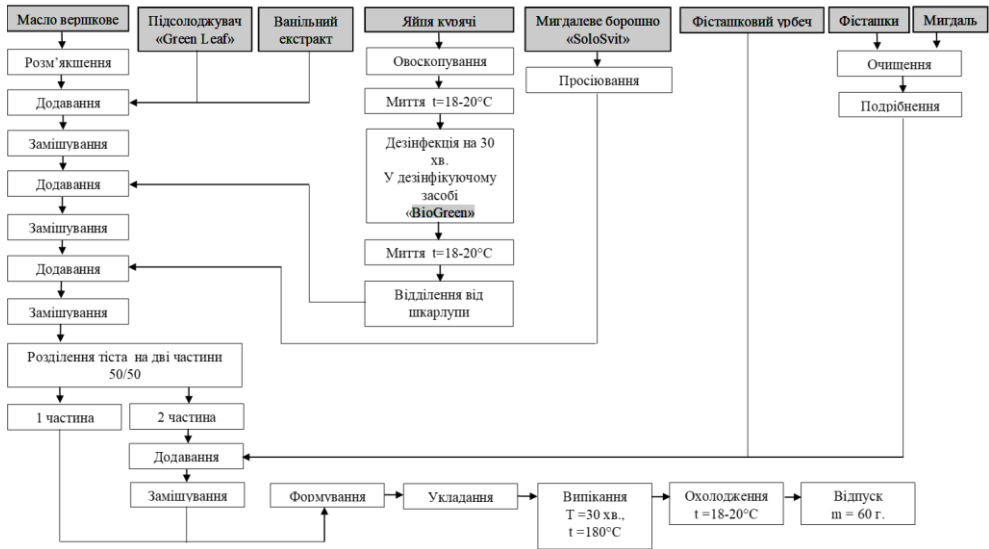


Рис. 1. Технологічна схема виробництва печива

Запропонована технологічна схема відрізняється від традиційної тим, що передбачає заміну пшеничного борошна на знежирене мигдалеве. При цьому тісто поділяли на дві частини, до однієї з яких вносили фісташковий урбеч. Такий підхід дав змогу отримати комбінований ефект: м'яку еластичну структуру всередині виробу та хрустку поверхню зовні. Введення урбечу сприяло також поліпшенню здатності тіста утримувати вологу й збереженню текстури під час зберігання. У рецептурі цукор замінено стевією, що дало змогу знизити енергетичну цінність.

Детальні результати хімічного складу готової продукції представлені в табл. 7. Дані свідчать про значне підвищення вмісту білка в новому продукті до 22,7%, що є вдвічі більше, ніж у традиційному здобному печиві (контроль) (7,5%). Вміст вуглеводів зменшився до 10,8%, що значно менше ніж у традиційному печиві, де рівень вуглеводів складає 74%. Клітковина, важлива для здоров'я шлунково-кишкового тракту, досягає 9,2%. Вміст мінеральних речовин також зріс: магній підвищився на 1394,9%, цинк — на 189%, фосфор — на 388,9%, калій — на 480,1%, залізо — на 2594%. Вміст вітамінів також поліпшився: вітамін Е зріс на 1276%, вітамін В₁ на — 113%, вітамін В₆ на — 3380%, вітамін В₉ — на 3751%, а енергетична цінність зменшилася на 34%.



Рис. 2. Загальний вигляд готових виробів дослідних зразків печива

Таблиця 7. Хімічний склад готового продукту порівняно з контролем на 100 г

Білки, г	Жири, г	Вуглеводи, г	Клітковина, г	Мінеральні речовини, мг					Вітаміни, мг				Q, ккал	
				Mg	Zn	P	K	Fe	E	B ₁	B ₆	B ₉		
Здобне печиво з використанням мигдалевого знежиреного борошна та фісташкового урбечу														
22,7	19,1	10,8	9,2	149,4	1,89	317,7	493,1	2,59	13,76	0,213	0,338	3,751	315	
Печиво здобне (контроль)														
7,5	17	74	1,8	10	—	65	85	—	1	0,1	—	—	480	

У табл. 8 наведені основні органолептичні та фізико-хімічні показники дослідного зразка печива. Масова частка вологи експериментального печива становила $15,2 \pm 0,2\%$, що відповідає нормативу ($\leq 15,5\%$), аналогічно як у контролі. Вміст жиру (у перерахунку на суху речовину) також відповідав вимогам і перевищував мінімальний рівень $1,5\%$. Здатність до намокання у дослідного зразка склала $107 \pm 5,5\%$, що дещо нижче контрольного значення (не менше 110%), однак знаходиться на межі допустимого рівня.

Таблиця 8. Показники якості готового продукту

Показники	Способи
Органолептичні показники	
Зовнішній вигляд	Форма збережена відповідно заданій, без надломів, здуття і тріщин
Колір	Світло-коричневий
Форма	Правильна, краї рівні, без пошкоджень
Смак, запах	Приємний горіховий присмак та запах, властивий даному виробу
Крихкість і консистенція	Розсипчаста, незатягнута
Вигляд на зломі	Рівномірна пористість, без порожнин і слідів непромісу, добре пропечений. Начинка не виходить за краї

Фізико-хімічні показники	
Вологість, %	15,2±0,2
Здатність до намокання, %	107±5,5
Вміст харчових волокон, %	9,2±0,2
Масова частка жиру, %	19,1±1,0

Знежирене мигдалеве борошно підвищує частку білків і харчових волокон, що збільшує водопоглинання тіста, стабілізує структуру під час випікання та зменшує усадку, що позитивно вплинуло на вологість, намокання та крихкість виробу. Фісташковий урбеч завдяки ненасиченим жирам робить тісто більш пластичним, знижує внутрішнє тертя, підвищує еластичність і здатність утримувати вологу, що забезпечує м'яку серцевину при хрусткій поверхні. Стевія зменшує осмотичне навантаження порівняно з цукром, тому процеси карамелізації та реакцій Маяра менш виражені, що обумовлює світліший колір виробу та зниження його калорійності без погіршення смакових характеристик.

Висновки

У ході дослідження встановлено, що використання 46,3% знежиреного мигдалевого борошна в рецептурі печива дає змогу підвищити вміст білка до 22,7 г/100 г, клітковини — до 9,2%, а вміст вуглеводів знижується до 10,8% порівняно з 74% у традиційному здобному печиві (контроль). Завдяки застосуванню стевії енергетичну цінність виробу знижено на 34% — до 315,2 ккал/100 г. Дослідження хімічного складу показало значне зростання мінеральних речовин: вміст магнію підвищився у 14 разів (до 149,5 мг), заліза — у 25,9 раза (до 2,59 мг). Спостерігалось також зростання вмісту вітамінів: вітаміну Е — у 13,8 раза (до 13,76 мг), вітаміну В₆ — у 3,4 раза, а вітаміну В₉ — у 28,4 раза.

Фісташковий урбеч у кількості 7,3% позитивно вплинув на структурно-механічні властивості тіста, сприяючи збереженню вологості (15,2%) та формуванню м'якої текстури з хрусткою поверхнею. Органолептична оцінка за комплексом показників становила 4,8 бала з 5 можливих, що підтверджує високу якість розробленого виробу. Отримані результати демонструють ефективність використання нетрадиційних рослинних інгредієнтів для створення функціональних кондитерських виробів, адаптованих до потреб споживачів із підвищеними харчовими вимогами.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на вивчення мікробіологічної стійкості продукту під час зберігання, оптимізацію упаковки для подовження терміну придатності та дослідження споживчого сприйняття серед цільових груп — зокрема дітей, осіб із метаболічними порушеннями та прихильників здорового харчування.

Література

Новікова, О. В. (2015). *Технологія виробництва хлібобулочних і борошняних кондитерських виробів*. Київ: Ліра-К.

Сорокіна, А. М. (2023). Тенденції розвитку сучасної кондитерської галузі України. *Проблеми сучасних трансформацій. Серія: економіка та управління*, 7. <https://doi.org/10.54929/2786-5738-2023-7-04-15>.

Федорчук, В. Г., & Льоткіна, Т. Є. (2020). Особливості виготовлення і споживання різних видів горіхової олії та пасти. *Сучасні підходи до вирощування, переробки і зберігання плодоовочевої продукції: матеріали міжнародної наук.-практ. конф.*, 18—20 березня 2020 р. Миколаїв: МНАУ, 187—190. <http://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/7885>.

Açarı, İ. K. (2021). Determination of the chemical structure of diet biscuits with modern enstrumental techniques. *Cumhuriyet Science Journal*, 42(2), 299—309. <https://doi.org/10.17776/csj.837862>.

Ashwell, M. (2015). Stevia, nature's zero-calorie sustainable sweetener: A new player in the fight against obesity. *Nutrition Today*, 50(3), 129—134. <https://doi.org/10.1097/NT.0000000000000945>.

Bennet, R., Arun, A., & Faraday, M. K. (2018). A study on the nutritive analysis of almond intake for optimal muscle hypertrophy. *Research Journal of Pharmacy and Technology*, 11(10), 4539—4542. <https://doi.org/10.5958/0974-360X.2018.00830.2>.

Berryman, C. E., West, S. G., Fleming, J. A., Bordi, P. L., & Kris-Etherton, P. M. (2015). Effects of daily almond consumption on cardiometabolic risk and abdominal adiposity in healthy adults with elevated LDL-cholesterol: A randomized controlled trial. *Journal of the American Heart Association*, 4(1), e000993. <https://doi.org/10.1161/JAHA.114.000993>.

Burbano, J. J., Cabezas, D. M., & Correa, M. J. (2024). Characterization and techno-functional properties of high protein walnut flour from an oil by-product. *Plant Foods for Human Nutrition (Dordrecht, Netherlands)*, 79(4), 810—818. <https://doi.org/10.1007/s11130-024-01219-1>.

Chauhan, A., Saxena, D. C., & Singh, S. (2015). Total dietary fibre and antioxidant activity of gluten free cookies made from raw and germinated amaranth (*Amaranthus* spp.) flour. *LWT — Food Science and Technology*.

Creedon, A. C., Dimidi, E., Hung, E. S., Rossi, M., Probert, C., Grassby, T., ..., & Whelan, K. (2022). The impact of almonds and almond processing on gastrointestinal physiology, luminal microbiology, and gastrointestinal symptoms: A randomized controlled trial and mastication study. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 116(6), 1790—1804. <https://doi.org/10.1093/ajcn/nqac265>.

Himoto, T., & Masaki, T. (2024). Current Trends on the Involvement of Zinc, Copper, and Selenium in the Process of Hepatocarcinogenesis. *Nutrients*, 16(4), 472. <https://doi.org/10.3390/nu16040472>.

Inglett, G. E., Chen, D., & Liu, S. X. (2015). Physical properties of gluten-free sugar cookies made from amaranth-oat composites. *LWT — Food Science and Technology*.

Kalita, S., Khandelwal, S., Madan, J., Pandya, H., Sesikeran, B., & Krishnaswamy, K. (2018). Almonds and cardiovascular health: A review. *Nutrients*, 10(4), 468. <https://doi.org/10.3390/nu10040468>.

Lee-Bravatti, M. A., Wang, J., Avendano, E. E., King, L., Johnson, E. J., & Raman, G. (2019). Almond consumption and risk factors for cardiovascular disease: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Advances in Nutrition (Bethesda, Md.)*, 10(6), 1076—1088. <https://doi.org/10.1093/advances/nmz043>.

Mandalari, G., Barreca, D., Gervasi, T., Roussell, M. A., Klein, B., Feeney, M. J., & Carughi, A. (2022). Pistachio Nuts (*Pistacia vera* L.): Production, Nutrients, Bioactives and Novel Health Effects. *Plants*, 11(1), 18. <https://doi.org/10.3390/plants11010018>.

Mao, X., & Hua, Y. (2012). Composition, structure and functional properties of protein concentrates and isolates produced from walnut (*Juglans regia* L.). *International Journal of Molecular Sciences*, 13(2), 1561—1581. <https://doi.org/10.3390/ijms13021561>.

Mihafu, F. D., Issa, J. Y., & Kamiyango, M. W. (2020). Implication of sensory evaluation and quality assessment in food product development: A review. *Current Research in Nutrition and Food Science*, 8(3), 690—702. <https://doi.org/10.12944/CRNFSJ.8.3.03>.

MyFoodData. (n.d.). Total amino acids in almonds. Взято з <https://tools.myfooddata.com/protein-calculator/170567/gm/100/1>.

Ponomar, M., Krasnyuk, E., Butylskii, D., Nikonenko, V., Wang, Y., Jiang, C., Xu, T., & Pismenskaya, N. (2022). Sessile drop method: Critical analysis and optimization for measuring the contact

angle of an ion-exchange membrane surface. *Membranes*, 12(8), 765. <https://doi.org/10.3390/membranes12080765>

Rübner K., Balköse D., Robens E. (2008). Methods of humidity determination Part II: Determination of material humidity. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 94, 675—682. <https://doi.org/10.1007/s10973-008-9370-y>.

Schiatti-Sisó, I. P., Quintana, S. E., & García-Zapateiro, L. A. (2023). Stevia (*Stevia rebaudiana*) as a common sugar substitute and its application in food matrices: An updated review. *Journal of Food Science and Technology*, 60, 1483—1492. <https://doi.org/10.1007/s13197-022-05396-2>.

Siqueira, A. P., Pacheco, M. T., & Naves, M. M. V. (2015). Nutritional quality and bioactive compounds of partially defatted baru almond flour. *Food Science and Technology (Campinas)*, 35(1), 127—132. <https://doi.org/10.1590/1678-457X.6532>.

USDA FoodData Central. (n.d.). Взято з <https://fdc.nal.usda.gov>.

World Health Organization Regional Office for Europe. (2024, November 29). New WHO Europe fact sheet highlights worrying post-COVID trends in childhood obesity. <https://www.who.int/europe/news/item/29-11-2024-new-who-europe-fact-sheet-highlights-worrying-post-covid-trends-in-childhood-obesity>.

Wu, G. (2013). Functional amino acids in nutrition and health. *Amino Acids*, 45(3), 407—411. <https://doi.org/10.1007/s00726-013-1500-6>.

Yegorov, B., & Mardar, M. (2011). State of Ukrainian population nutrition. *International Scientific-Practical Journal Commodities and Markets*, 11(1), 140—147.

УДК 637.3.05

INFLUENCE OF COAGULANTS OF DIFFERENT ORIGIN ON THE QUALITY INDICATORS OF CREAM CHEESE

I. Bartoshak, G. Polishchuk

National University of Food Technologies

Key words:

Cream cheese
Enzymatic coagulation
Glucono-delta-lactone
Fat
Active acidity
Cheese yield

Article history:

Received 17.07.2025
Received in revised form
31.07.2025
Accepted 18.08.2025

Corresponding author:

G. Polishchuk
E-mail:
milknuft@i.ua

Citation: Бартошак І. В.,
Поліщук Г. Є. (2025).
Вплив коагулянтів різно-
го походження на показ-
ники якості сиру вершко-
вого. *Наукові праці*
НУХТ, 31(4), 246—256.
DOI: 10.24263/2225-2924-
2025-31-4-20

ABSTRACT

Existing methods for coagulating milk mixtures using coagulants of different origins in the technology of cream cheese production have been analyzed. For the research, a classical technology was chosen, which involves enzymatic coagulation of standardized mixtures followed by whey separation and cold packaging of the cream cheese. The technological effectiveness of coagulants of various origins was evaluated based on the sensory and physicochemical characteristics of the cream cheese and the yield of the final product. The coagulation process of milk mixtures with fat contents of 5%, 10%, and 15% was studied under the combined action of mesophilic lactic acid bacteria starter culture, rennet enzyme, calcium chloride, and glucono-delta-lactone. The influence of calcium chloride and fat content on the dynamics of acid formation during the fermentation of standardized mixtures, as well as on the chemical composition and physical properties of the cream cheese samples, was confirmed. It was found that lactic acid fermentation of 10% fat standardized mixtures was accelerated by 3—4 hours when they were pre-acidified with glucono-delta-lactone to an active acidity level of pH 6.0. The feasibility of using glucono-delta-lactone as a functional-technological ingredient has been proven, as it not only shortened the technological process duration but also increased the yield of cream cheese and improved its texture and flavor characteristics. At the same time, the applied level of pre-acidification of the mixtures before adding the enzyme and starter culture to the specified pH value using glucono-delta-lactone requires further refinement within a certain range of active acidity for mixtures intended for enzymatic coagulation. The results of this study will allow for the improvement of the cream cheese technology produced by enzymatic means, with subsequent cold packaging of the curd.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-4-20

ВПЛИВ КОАГУЛЯНТІВ РІЗНОГО ПОХОДЖЕННЯ НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ СИРУ ВЕРШКОВОГО

І. В. Бартошак, Г. Є. Поліщук

Національний університет харчових технологій

Проаналізовано існуючі способи зсідання молочних сумішей із застосуванням коагулянтів різного походження в технології сиру вершкового. Для проведення дослідження обрано класичну технологію, яка передбачає ферментативне зсідання нормалізованих сумішей з подальшим відділенням сироватки і холодним фасуванням сиру вершкового. Перевірено технологічну ефективність коагулянтів різного походження за органолептичними і фізико-хімічними показниками сиру вершкового та виходом готового продукту. Досліджено процес коагуляції молочних сумішей жирністю 5, 10 і 15% за сполучення дії мезофільної закваски молочнокислих бактерій, молокозсідального ферменту, хлориду кальцію і глюконо-дельта-лактону. Підтверджено вплив хлористого кальцію і вмісту жиру на динаміку кислотоутворення в процесі ферментації нормалізованих сумішей, а також на хімічний склад і фізичні властивості зразків сиру вершкового. Виявлено прискорення процесу молочнокислого бродіння нормалізованих сумішей жирністю 10% на 3–4 год у разі їх попереднього підкислення за допомогою глюконо-дельта-лактону до значення активної кислотності 6,0 од. рН. Доведено доцільність застосування глюконо-дельта-лактону як функціонально-технологічного інгредієнта, який не тільки скорочує тривалість технологічного процесу, але й підвищує вихід сиру вершкового та покращує його текстуру і смакові характеристики. У той же час застосований рівень підкислення сумішей перед внесенням ферменту і закваски до заданого значення активної кислотності за допомогою глюконо-дельта-лактону потребує подальшого уточнення в певному діапазоні зміни активної кислотності сумішей, призначених для ферментативного зсідання сумішей. Результати дослідження нададуть можливість удосконалити технологію сиру вершкового, одержуваного ферментативним способом з подальшим холодним фасуванням згустка.

Ключові слова: сир вершковий, ферментативне зсідання, глюконо-дельта-лактон, жир, активна кислотність, вихід сиру.

Постановка проблеми. Технологію сиру вершкового було розроблено у Франції наприкінці XVII ст., але промислове виробництво цього продукту розпочалося лише наприкінці XIX ст. у США. Перший стандарт ідентифікації вершкового сиру різних видів з вимогами до показників якості був офіційно затверджений у США у 1921 р. з подальшим неодноразовим переглядом цього документа. З 1994 р. набули чинності Специфікації Міністерства сільського господарства США (USDA) для сиру вершкового (USDA. Specifications for Cream Cheese, Cream Cheese with other Foods, and Related Products, 1994), у яких було викладено класифікацію і вимоги до органолептичних, фізико-хімічних і мікробіологічних показників вершкових сирів. Опис комерційного товару для сиру вершкового був розроблений

USDA у 2008 р. та оновлений у 2021 р. (USDA. Commercial item description cream cheese, Neufchatel cheese and related products, 2021).

Згідно зі специфікаціями, сири вершкові поділяють на такі різновиди: сир вершковий (масова частка вологи — не більше 55%, масова частка молочного жиру — не менше 33%, рН — в діапазоні від 4,4 до 4,9); сир Нефшатель (вологи — не більше 65%, жиру — не менше 20%, але нижче 33%, рН — 4,4-5,0); сир вершковий зі зниженим вмістом жиру (вологи — не більше 70%, жиру — не менше 16,5%, але нижче 20%, рН — 4,4-5,1); сир вершковий легкий (вологи — не більше 70%, жиру — не більше 16,5%, рН — 4,4—5,2). Масова частка кухонної солі у всіх видах сиру — не більше 1,4%. Для виробництва сиру вершкового можна застосовувати лише молочну сировину — вершки, сухе знежирене молоко, сухе незбиране молоко, суху сироватку. До складу сирів вершкових можна додавати стабілізатори та емульгатори у кількості не більше 0,5%, харчові барвники і натуральні смако-ароматичні інгредієнти, за вмісту яких у готовому продукті може змінюватися у межах 5% масова частка вологи і жиру.

Найпопулярнішими у всьому світі є сири вершкові Філадельфія, Маскарпоне, Нефшатель, які одержують шляхом ферментативної або термокислотної коагуляції нормалізованих за вмістом жиру сумішей з відділенням сироватки та подальшим самопресуванням білково-жирових згустків (Chen та ін., 2013). Для традиційної технології, яка передбачає ферментативну коагуляцію нормалізованих сумішей з холодним фасуванням сиру, характерні доволі тривалі процеси одержання і самопресування згустка. Водночас у сучасних джерелах інформації відсутній опис можливих шляхів прискорення тривалості технологічного циклу, а також порівняльний аналіз технологічної ефективності комплексу коагулянтів різної природи при виробництві вершкових сирів, одержуваних ферментативним зсіданням сумішей. Вказане вище доводить доцільність обраного напряму наукового дослідження

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для ферментації пастеризованих гомогенізованих вершків жирністю 8—15% (у середньому приймають жирність 10,5—11,5%) у класичній технології сиру вершкового традиційного складу жирністю не менше 33% застосовують закваски на основі мезофільних молочнокислих бактерій, а для одержання сиру максимальної 40-відсоткової жирності за вмісту вологи 51% використовують суміші з підвищеним до 18% вмістом жиру (Erik, 1954). З метою покращання комплексу показників якості сиру вершкового в нормалізовані суміші додатково вносять молокозсідальні ферменти (Бартошак, & Поліщук, 2025), а для підвищення вмісту сухих речовин і формування більш щільних згустків їх підпресовують за уточненої дози внесення кухарської солі (Mirela, 2020).

Загалом, технологічний цикл виробництва вершкових сирів шляхом ферментативного зсідання доволі короткий за відсутності процесу визрівання. Проте в цій технології найбільш тривалими є процеси ферментації нормалізованих сумішей (до 16—18 год для досягнення рН 4,6—4,8) та самопресування білково-вершкових згустків (8—12 год, 8—10 °С або 18—20 °С). Для прискорення цих процесів збільшують дозу закваски, підвищують температуру ферментації й оброблення сирно-

го зерна, а замість самопресування застосовують центрифугування або ультрафільтрацію згустка (Ong, Kentish, & Gras, 2018; Phadungath, & Songklanakarin, 2005).

З метою запобігання відділенню сироватки на поверхні сиру та підвищення його виходу до нормалізованих сумішей вносять вологозв'язувальні стабілізатори і наповнювачі, які містять природні гідроколоїди (Gulzar та ін., 2015).

Для підвищення виходу сиру вершкового та скорочення тривалості технологічного циклу українськими вченими запропоновано виготовляти цей продукт змішуванням сиру кисломолочного з вершками або змішуванням сметани і йогурту з подальшим додаванням смако-ароматичних інгредієнтів і самопресуванням згустка, але технологічні схеми цих способів науково не обґрунтовані (Скульська, Цісарик, & Гуменецький, 2023; Melnyk, Nemirich, Gavrish, & Gavrilchenko, 2019).

Прискорити процес зсідання молока можливо повним або комбінованим підкисленням нормалізованих за вмістом жиру сумішей, оскільки підвищення кислотності нормалізованих молочних сумішей покращує стабільність індукованих кислотою білково-жирових просторових структур. За рахунок подібних технологічних модифікацій можна одержувати сири вершкові легкі і сири вершкові зі зниженим вмістом жиру з відмінними сенсорними властивостями, характерними для повножирних вершкових сирів (Wendin, Langton, Caous, & Hall, 2000; Feeney, Lamichhane, & Sheehan, 2021).

У виробництві натуральних м'яких сирів і сиру кисломолочного нещодавно почали використовувати органічний підкислювач природного походження — глюконо-дельта-лактон (ГДЛ). Цей підкислювач поступово гідролізується у водних розчинах, вивільняючи глюконову кислоту, яка контрольовано знижує рН та сприяє рівномірній коагуляції білка (Rajani, Jana, Bihola, & Adil, 2024). Дослідження показали, що коагуляція, індукована ГДЛ, покращує структуру сиру, максимально зберігаючи при цьому молочні компоненти. ГДЛ також є емульгатором, гелеутворювачем, стабілізатором кольору, вологозв'язувальним і структуруючим агентом, має антимікробну та антиоксидантну активність. Зокрема, відомо про повну заміну молочнокислих бактерій на ГДЛ у виробництві сирів фети, моцарели та сиру кисломолочного. Доведено, що в разі застосування ГДЛ за пришвидшеного зсідання сумішей утворюється більш щільний згусток, хоча культивовані м'які сири мають кращу текстуру та смак (Shawi та ін., 2021; Chen, Chen, Chen, & Hsieh, 2016). ГДЛ також застосовують для підвищення виходу рекомбінованого продукту по типу вершкового сиру (Bihola та ін., 2025). Встановлено, що в присутності ГДЛ взаємодії «білок-білок» та «білок-жир» є основними структурними чинниками впливу на фізичні властивості аналогового вершкового сиру (Kim, Watkinson, Fonterra, & Matia-Merino, 2022). Отже, сучасні і класичні технології вершкових сирів мають суттєві відмінності, залежно складу вихідної сировини, обраних коагулянтів і технологічних режимів виробництва. У той же час слід відзначити відсутність інформації щодо особливостей застосування ГДЛ для виробництва сиру вершкового за сполучення коагулянтів різного походження у сумішах з варійованою жирністю, що підтверджує доцільність проведення дослідження за цим напрямом.

Мета дослідження: вивчення ефективності коагулянтів різного походження в технології сиру вершкового, одержуваного ферментативним зсіданням нормалізованих сумішей різної жирності.

Матеріали і методи. Модельні зразки вершкового сиру готували відповідно до класичної технології сиру вершкового, яка передбачає кислотно-сичужне зсідання нормалізованих гомогенізованих, пастеризованих й охолоджених вершків з подальшим відділенням сироватки від утвореного згустка, його самопресуванням, фасуванням, охолодженням і зберіганням.

Для вивчення впливу вмісту жиру на динаміку ферментації та хімічний склад сиру одержували нормалізовані суміші з масовою часткою жиру (м. ч. ж.) 5, 10 і 15%. Ці суміші пастеризували при температурі 86—88 °С без витримування та гомогенізували за тиску 10 ± 2 МПа і температури 70 ± 2 °С за допомогою гомогенізатора марки 15M-8TA для забезпечення більшого вмісту жиру в білковому згустку (Kim, Watkinson, Fonterra, & Matia-Merino, 2022). Гомогенізовані вершки охолоджували до температури 30—32 °С і на їх основі готували дослідні зразки з внесенням коагулянтів різного походження.

Частину зразків перед внесенням закваски і ферменту підкислювали 20-відсотковим водним розчином ГДЛ (E575, «Праймхім Україна») до активної кислотності 6,0 од. рН. У частину зразків разом із закваскою і ферментом також вносили 40-відсотковий розчин хлориду кальцію у розрахунку 40 г безводної солі на 100 кг нормалізованої суміші.

Для одержання білково-жирових згустків використовували ліофілізовану мезофільну закваску для сиру кисломолочного (склад: *Lactococcus lactis ssp. lactis*; *Lactococcus lactis ssp. cremoris*; *Lactococcus lactis ssp. Diacetylactis*). Для інтенсифікації процесу зсідання після внесення закваски у зразки додавали фермент для сирів — СНУ-МАХ М 1000 (Данія). Закваску і фермент вносили у вершки в кількостях, рекомендованих виробниками.

Ферментацію зразків проводили при температурі 30—32 °С до досягнення активної кислотності не вище 4,8 од. рН. Одержані згустки розрізували на кубики розмірами по ребру 1—1,5 см, витримували до 30 хв, підігрівали до температури 45—50 °С за одночасного обережного вимішування для інтенсифікації відділення сироватки. Після чого згустки охолоджували до температури 18—20 °С, відкидали на чотиришарову марлю і проводили самопресування до моменту закінчення відділення сироватки та формування гладкої матової поверхні. Далі згустки загортали в полімерну плівку і відправляли на охолодження і структурування в холодильну камеру при температурі 4—6 °С не менше 24 год.

Позначення зразків з описом їх відмінностей наведено нижче:

- зразок 1 — нормалізовану суміш жирністю 5% ферментували закваскою для сиру кисломолочного і молокозсідальним ферментом з додаванням CaCl_2 ;
- зразок 2 — нормалізовану суміш жирністю 10% ферментували закваскою для сиру кисломолочного і молокозсідальним ферментом з додаванням CaCl_2 ;
- зразок 3 — нормалізовану суміш жирністю 15% ферментували закваскою для сиру кисломолочного і молокозсідальним ферментом з додаванням CaCl_2 ;
- зразок 4 — нормалізовану суміш жирністю 10% ферментували закваскою для сиру кисломолочного і молокозсідальним ферментом без додавання CaCl_2 ;
- зразок 5 — нормалізовану суміш жирністю 10% перед внесенням закваски для сиру кисломолочного і молокозсідального ферменту підкислювали ГДЛ;

- зразок 6 — нормалізовану суміш жирністю 10% перед внесенням закваски для сиру кисломолочного і молокозсідального ферменту підкислювали ГДЛ і додавали CaCl₂.

Активну кислотність вершків і згустків визначали потенціометрично згідно з ДСТУ 8550 із застосуванням лабораторного вимірювача pH/MV/ISE/Temp ADWA AD1200 ATC.

Масову частку білка у вершках, сироватці і сирному згустку визначали методом К'ельдаля згідно з ДСТУ 8063.

Масову частку жиру у вершках, сироватці і сирі визначали кислотним методом Гербера згідно з ГОСТ 5867.

Масову частку сухих речовин у вершках, сироватці і згустках (M_{сп}) визначали висушуванням наважок зразків при 135 °С протягом 2 год з подальшим перерахунком за формулою:

$$M_{sp} (\%) = (m_1 - m_0) \times 100 / m - m_0, \quad (1)$$

де: m_0 — маса бюкси, г; m — маса бюкси з наважкою зразка до висушування, г; m_1 — маса бюкси з наважкою зразка після висушування, г.

Вихід продукту враховували у відсотках за масою одержаного згустка по відношенню до маси заквашеної суміші за формулою:

$$\text{Вихід сиру} = (\text{Маса сиру} / \text{Маса молока}) \times 100\%. \quad (2)$$

Органолептичну оцінку вершкових згустків здійснювали відповідно до комерційного опису основних характеристик вершкового сиру (USDA, 1994):

- 1) колір — однорідний від білого до світло-кремовеого;
- 2) смак та аромат — помірно виражений чистий, кисломолочний, злегка діацетиловий, не допускається гіркий, крейдяний, пустий, дріжджовий та інші сторонні присмаки і запахи;
- 3) текстура — однорідна, середньої твердості при температурі 6—8 °С і мазка при температурі 20 °С;
- 4) зовнішній вигляд — гладкий, без грудочок і зернистості пастоподібний згусток з рівною, зволоженою поверхнею без слідів розтріскування та виділення сироватки, на поверхні допускається наявність поодиноких краплин вологи.

Для органолептичного оцінювання зразків сиру вершкового застосовували 5-бальну шкалу, де кожному атрибуту надавали певну кількість балів за таким принципом: 5 балів — відповідність нормативним вимогам; 4 бали — мінімальні відхилення; 3 бали — помітні відхилення; 2 бали — значні відхилення; 1 бал — дуже значні відхилення; 0 балів — продукт непридатний до споживання.

Одержані результати за 3-кратної повторюваності і заданої довірчої ймовірності $P \geq 0,95$ статистично обробляли за допомогою стандартної програми Excel.

Викладення основних результатів дослідження. На першому етапі досліджували вплив вмісту жиру і застосованих коагулянтів на динаміку кислотно-сичужного зсідання нормалізованих сумішей, у тому числі в присутності хлориду кальцію і ГДЛ.

Динаміку зміни активної кислотності усіх зразків нормалізованих сумішей впродовж ферментації наведено на рис. 1.

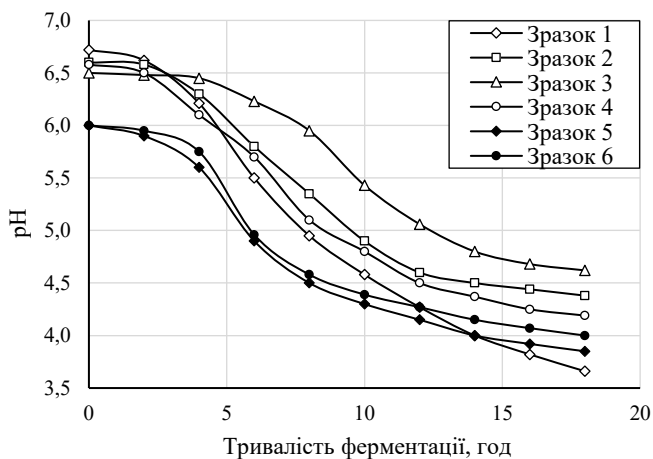


Рис. 1. Динаміка зміни активної кислотності нормалізованих сумішей впродовж ферментації

Відповідно до рис. 1, підвищення вмісту жиру в діапазоні від 5 до 15% у зразках 1—3 у деякій мірі гальмує швидкість зниження активної кислотності. Тобто чим більший вміст жиру у зразках, тим вищі значення pH наприкінці їх ферментації. Це явище можна пояснити впливом вмісту жиру в нормалізованих сумішах на метаболічну активність бактерій, що беруть участь у молочнокислому бродінні. За підвищення вмісту жиру в харчових системах відповідним чином зменшується вміст води як середовища для життєдіяльності бактерій. Жирові кульки також можуть додатково механічно блокувати доступ молочнокислих бактерій до лактози. Виявлений ефект співвідноситься з даними (Tan та ін., 2024). Присутність хлориду кальцію практично не впливає на активну кислотність зразків за рахунок буферних властивостей молока, що також підтверджується існуючою інформацією (Генчева, 2016).

Що стосується швидкості досягнення заданої верхньої межі активної кислотності ($\text{pH} = 4,8$), прийнятої для визначення повноти ферментації нормалізованих сумішей, то очевидну позитивну роль у цьому процесі відіграє їхнє попереднє підкислення розчином ГДЛ. Так, для зразків 5 і 6, попередньо підкислених ГДЛ до $\text{pH} = 6,0$, час досягнення граничного значення активної кислотності становить 7 год, у той час, як для зразків без підкислення ГДЛ жирністю 5 і 10% — 10—11 год, а для зразка жирністю 15% — до 14 год. За порівняння динаміки зміни активної кислотності для зразків однакової жирності (10%) — зразка 2, зразка 4 і зразків, підкислених ГДЛ 5 і 6, то час досягнення активної кислотності не вище 4,8 од. pH для них становив: 11, 10 і 7 год (для обох підкислених зразків), відповідно. Таким чином, можна стверджувати, що попереднє підкислення однакових за хімічним складом нормалізованих сумішей скорочує час ферментації на 3—4 години.

При візуалізації процесу ферментації зразків 5 і 6, підкислених ГДЛ, утворення згустків відбувалося вже за активної кислотності 5,1, тобто значно вище за ізоелектричну точку зсідання казеїну, що варто більш детально вивчити в подальших дослідженнях і врахувати в удосконаленій технології.

Значення активної кислотності готових зразків сиру вершкового, сироватки і початку візуального утворення згустка наведені на рис. 2.

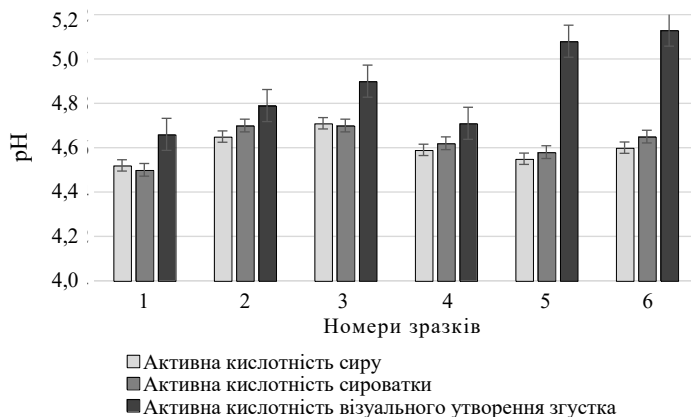


Рис. 2. Активна кислотність зразків сиру вершкового, сироватки і початку візуального утворення згустка

Активна кислотність сиру вершкового і сироватки для всіх зразків була доволі наближеною. Відповідно до порівняльного аналізу цих значень, їхній найнижчий рівень спостерігався для зразків 1 (м. ч. ж. 5%), дещо вищі значення слід відмітити для зразків 4 (м. ч. ж. 10% без додавання CaCl_2) і для зразків 5 і 6 (м. ч. ж. 10%), підкислених ГДЛ, що пояснюється впливом доданих компонентів. Зрозуміло, що початок утворення згустка дуже важко вловити візуально, оскільки цей метод є доволі неточним, але навіть зі значною похибкою він дає змогу визначити відмінність характеру процесу зсідання згустків. Значне пришвидшення утворення згустка в зразках 5 і 6, підкислених ГДЛ, можна пояснити зниженням стабільності казеїнових міцел, агрегації та поступового розвитку зв'язку між білками за зниження активної кислотності (Wang, & Zhao, 2023). Активна кислотність усіх зразків сиру вершкового знаходилася в межах норми, в діапазоні від 4,4 до 4,9, відповідно до Специфікацій USDA для сиру вершкового.

Хімічний склад зразків сиру вершкового наведено у табл. 1.

Таблиця 1. Фізико-хімічні показники зразків сиру і сироватки

Показник	Номер зразка					
	1	2	3	4	5	6
М. ч. вологи, %	58,51±1,33	57,23±1,78	56,20±1,38	57,93±1,65	55,06±1,02	54,74±1,92
М. ч. білка, %	9,15±0,25	8,25±0,21	7,20±0,22	7,99±0,30	9,8±0,32	10,3±0,41
Абсолютна м. ч. ж у сири, %	23,32±1,21	29,71±1,70	32,4±1,63	28,5±1,38	33,2±1,83	33,8±1,59
М. ч. ж. у сухій речовині сиру, %*	56,14	69,40	73,97	67,70	73,1	73,5
М. ч. сухих речовин у сироватці, %	7,10±0,22	6,24±0,16	5,93±0,17	6,82±0,20	5,18±0,14	5,0±0,19
Вихід сиру, %*	10,2	11,5	12,3	11,0	15,8	16,4

*Показники розраховані на основі середньоарифметичних значень фізичних величин відповідно до формул (1) і (2).

Відповідно до Специфікацій USDA, в сирі вершковому класичному вміст води не повинен перевищувати 55%, а вміст жиру має бути не нижчим за 33%. Цим вимогам відповідають зразки 5 і 6. Зразки 1—4 за хімічним складом можуть бути віднесені до сиру Нефшатель. Найбільший вихід сиру виявлено для зразків 5 і 6, підкислених ГДЛ за найнижчих втрат сухих речовин із сироваткою. Застосування хлориду кальцію підвищує вихід сиру, що можна пояснити утворенням додаткових зв'язків між макромолекулами білків і відповідним підвищенням їх вологоутворювальної здатності (Makhal, Kanawjia, & Giri, 2013). Для збільшення вмісту жиру за зниження вмісту води у зразках 1—4 необхідно більш детально опрацювати технологічні режими щодо оброблення сирного зерна і відпресування сироватки від згустка. Що стосується зразків 5 і 6, то додавання ГДЛ до сумішей перед внесенням закваски і ферменту є доцільним, оскільки дає змогу одержувати сир вершковий без зміни встановлених у схемі проведення дослідження технологічних параметрів виробництва.

Органолептичні показники зразків сиру вершкового наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Органолептичні показники зразків сирів вершкових

Показник	Номер зразка					
	1	2	3	4	5	6
Смак та аромат	Чистий, кисло-молочний, злегка діацетиловий, з вираженою кислинкою	Чистий, кисло-молочний, з вершковим присмаком, злегка діацетиловий,	Чистий, кисло-вершковий злегка діацетиловий	Чистий, кисло-молочний, з вершковим присмаком, злегка діацетиловий	Чистий, кисло-вершковий злегка діацетиловий, з вираженою кислинкою	Чистий, кисло-вершковий злегка діацетиловий, з вираженою кислинкою
Консистенція	Однорідна, занадто мазка	Однорідна, доволі щільна, помірно мазка	Однорідна, доволі щільна, достатньо мазка	Однорідна доволі щільна, помірно мазка	Відмінна, однорідна, достатньо мазка	
Колір	Білий зі злегка кремовим відтінком, рівномірний за всією масою		Білий з вираженим кремовим відтінком, рівномірний за всією масою		Білий зі злегка кремовим відтінком, рівномірний за всією масою	
Зовнішній вигляд	Пастоподібний мазкий згусток, на поверхні наявні поодинокі краплі сироватки	Гладкий, пастоподібний мазкий, достатньо щільний згусток	Гладкий, пастоподібний мазкий, щільний згусток	Пастоподібний мазкий згусток, на поверхні наявні поодинокі краплі сироватки, незначна зернистість	Гладкий, без грудочок і зернистості пастоподібний згусток з рівною, зволоженою поверхнею	
Загальна сума балів	17,2	18,5	19,4	17,5	19,6	20

За даними, наведеними в табл. 2, очевидно є доцільність застосування підкислювача ГДЛ у технології сирів вершкових. Цей коагулянт, окрім підвищення виходу готового продукту, також сприяє формуванню відмінної, однорідної мазкої консистенції і вираженому кисловершковому смаку в зразках 5 і 6 сиру вершкового, органолептична оцінка яких отримала максимальні бали. Слід відзначити й

доцільність комплексного застосування хлориду кальцію як додаткового коагулянта, що зміцнює вершковий згусток та надає йому більш повного смакового відчуття. М'які сири з вказаними смаковими характеристиками і мазкою консистенцією будуть користуватися попитом для безпосереднього споживання, приготування різних страв у домашніх умовах, а також у секторі HoReCa.

Висновки

1. Комплексна дія мезофільної закваски молочнокислих бактерій, молокозсідального ферменту, хлориду кальцію і глюконо-дельта-лактону, спрямована на коагуляцію нормалізованих сумішей жирністю 10% за їх попереднього підкислення до значення активної кислотності 6,0 од. рН, прискорює процес молочнокислого бродіння на 3—4 год, залежно від наявності хлориду кальцію.

2. Підвищення вмісту жиру у нормалізованих сумішах від 5% до 15% сповільнює процес молочнокислого бродіння, зокрема, подовжує його з 10 до 14 годин.

3. Підкислення сумішей глюконо-дельта-лактоном перед внесенням закваски, хлористого кальцію і ферменту призводить до візуального утворення згустків за підвищеної до 5,1 од. рН активної кислотності, а також до збільшення виходу сиру вершкового та покращання його органолептичних показників.

4. Застосований рівень підкислення нормалізованих сумішей перед внесенням ферменту і закваски за допомогою глюконо-дельта-лактону до сталого значення 6,0 од. рН потребує більш детального вивчення в широкому діапазоні зміни активної кислотності, що є перспективним завданням для подальших досліджень, спрямованих на удосконалення технології сиру вершкового.

Література

Бартошак, І., Поліщук, Г. (2025). Порівняльний аналіз технологічної ефективності різних способів зсідання вершкових сумішей. *Харчова промисловість*, 37, 59—69. <https://doi.org/10.24263/2225-2916-2025-37-8>.

Генчева, В. (2016). Вплив розчинів солей кальцію та магнію на фізико-хімічні показники якості молока. *Актуальні питання біології, екології та хімії*, 11(1), 137—146.

Скульська, І., Цісарик, О., Гуменецький, М. (2023). Розроблення технології м'якого сиру з мигдалем. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*, 4, 173—180. <https://doi.org/10.32782/tmv-tech.2023.4.22>.

Bihola, A., Jana, A., Parmar, S., Gill, A., Vashisht, P., Sain, M., Adil, S. (2025). Recombined milk cheeses: A review, *International Dairy Journal*, 166, 106219, <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2025.106219>.

Breidinger, S. L., Steffe, J. F. (2001). Texture Map of Cream Cheese. *Journal of Food Science*, 66, 453—456. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2001.tb16128.x>.

Chen, N., Liu, X., Ding, Q., Wang, F., Luo, J., Ren, F. (2013). Effects of coagulation methods on quality of cream cheese. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 29, 287—291. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6819.2013.02.039>.

Chen, Y. C., Chen, C. C., Chen, S. T., & Hsieh, J. F. (2016). Proteomic profiling of the coagulation of milk proteins induced by glucono-delta-lactone. *Food Hydrocolloids*, 52, 137—143. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.06.005>.

Lundstedt, E. (1954). Manufacture of Quality Cream Cheese: A Means of Utilizing Some of Our Excess Milk Fat. *Journal of Dairy Science*, 37(2), 243—245. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(54\)70251-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(54)70251-5).

Feeney, E., Lamichhane, P., Sheehan, J. (2021). The cheese matrix: Understanding the impact of cheese structure on aspects of cardiovascular health — A food science and a human nutrition perspective. *International Journal of Dairy Technology*, 74(4), 656—670. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12755>.

Kim, J., Watkinson, P., Fonterra, M. L., Matia-Merino, L. (2022). Effect of Process and Formulation Variables on the Structural and Physical Properties in Cream Cheese using GDL Acidulant. *Food Biophysics*, 17(1), 273—287. <https://doi.org/10.1007/s11483-022-09719-w>.

Čolić, L., Mirela. (2020). Physico-chemical properties, spreadability and consumer acceptance of low-sodium cream cheese. *Mljekarstvo*, 70, 13—27. <https://doi.org/10.15567/mljekarstvo.2020.0101>.

Makhal, S., Kanawjia, S. K. A. Giri. (2013). Role of calcium chloride and heat treatment singly and in combination on improvement of the yield of direct acidified Cottage cheese. *Journal of Food Science and Technology*, 52(1). <https://doi.org/10.1007/s13197-013-1028-5>.

Melnyk, O., Nemirich, O., Gavrish, A., & Gavrilchenko, P. (2019). Технологічні аспекти виробництва крем-сиру з порошком зі шпинату. *НВ ЛНУ ветеринарної медицини та біотехнологій. Серія: Харчові технології*, 21(91), 157—161. <https://doi.org/10.32718/nvvet-f9126>.

Gulzar, N., Sameen, A., Khan, M., Huma, N., Murtaza, M.-A., Rafiq, S. (2015). Nutritional and Functional Properties of Fruited Cream Cheese Spread as Influenced by Hydrocolloids. *Journal of Food and Nutrition Research*, 3(3), 191—195. <https://doi.org/10.12691/jfnr-3-3-10>.

Ong, L., Kentish, S. E., Gras, S. L. (2018). Small scale production of cream cheese: A comparison of batch centrifugation and cloth bag methods. *International Dairy Journal*, 81, 42—52. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2018.01.008>.

Phadungath, C., Songklanakarin, J. (2005). Cream cheese products: A review. *Journal of Science and Technology*, 27(1), 191—199.

Rajani, B., Jana, A. H., Bihola, A., Adil. (2024). Changes in physico-chemical and functional properties of Pizza cheeses made using "dual acidification" method during refrigerated storage. *Discover Food*, 4, 157. <https://doi.org/10.1007/s44187-024-00241-1>.

Al-Hatim, R., Kadhim, Z., Issa, N., Ghazi Al-Shawi, S. (2021). Application of Glucono-Delta-Lactone Acid (GDL) in Foods System: A Review. *Natural Volatiles and Essential Oils*, 8(5), 6450—6463.

Tan, C., Tian, Y., Tao, L., Xie, J., Wang, M., Zhang, F., Yu, Z., Sheng, J., & Zhao, C. (2024). Exploring the Effect of Milk Fat on Fermented Milk Flavor Based on Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry (GC-IMS) and Multivariate Statistical Analysis. *Molecules*, 29(5), 1099. <https://doi.org/10.3390/molecules29051099>.

Wendin, K., Langton, M., Caous, L., Hall, G. (2000). Dynamic analyses of sensory and microstructural properties of cream cheese. *Food Chemistry*, 71, 363—378. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(00\)00200-4](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(00)00200-4).

Wang, X., & Zhao, Z. (2023). Acid-Induced Gelation of Milk: Formation Mechanism, Gel Characterization, and Influence of Different Techniques. Intech Open. *In book: Dairy Processing — From Basics to Advances*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.107893>.

УДК 663.5

STUDY OF THE EFFECT OF PALYGORSKITE FRACTIONATION ON EFFICIENCY OF REMOVING UNDESIRABLE IMPURITIES FROM SORTIVKAS UNDER NORMAL AND REDUCED PRESSURE CONDITIONS

A. Yakimenko, L. Melnyk

*National University of Food Technologies***Key words:**

Sortivka
Palygorskite
Fractionation
Normal conditions
Reduced pressure
conditions

Article history:

Received 09.07.2025
 Received in revised form
 24.07.2025
 Accepted 05.08.2025

Corresponding author:

A. Yakimenko

E-mail:

jakimenko.andrey@gmail.
 com

Citation: Якименко А. В., Мельник Л. М. (2025). Дослідження впливу фракційності палигорськита на ступінь вилучення небажаних домішок із сортівок за нормальних умов та при розрідженні. *Наукові праці НУХТ*, 31(4), 257—266.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-4-21

ABSTRACT

Strict requirements for quality of food ethanol and reduction of energy costs have made it urgent to find effective ways to purify ethanol from impurities that impair its sensory properties and cause non-compliance with international standards.

Industrial samples of water-alcohol solutions (sortivkas) treated with palygorskite, a common in Ukraine and readily available natural dispersed mineral were used for the study.

To ensure the effective use of palygorskite in the purification of sortivkas from impurities, the effect of its fractionation on its adsorption capacity under normal conditions and under reduced pressure conditions was investigated. Fractions of 1.0÷0.5 mm, 2.0÷1.0 mm, and 3.0÷2.0 mm were used.

It was found that palygorskite with fraction of 3.0÷2.0 mm had higher adsorption capacity than the adsorbent of lower fractionation, which can be explained by the possibility of adjusting the contact time between the adsorbent and adsorbate, and the lower hydraulic resistance of the adsorbent layer.

If sortivka was purified in the presence of ambient air (normal conditions), the quality of the purified water-alcohol solution deteriorated due to the catalytic activity of oxygen adsorbed from the air. Removal of air from the adsorber by creating a vacuum over the surface of palygorskite has contributed to the improvement of the quality of the purified water-alcohol solution. Reduced pressure shifted the thermodynamic equilibrium towards lower temperatures, which slowed down the course of chemical processes and, consequently, reduced the likelihood of the formation of additional impurities in water-alcohol solutions. In addition, purification under reduced pressure conditions increased the duration of the adsorber operation, and thus reduced the energy consumption for adsorbent regeneration.

It was found that palygorskite adsorbed harmful impurities from sortivkas more efficiently at vacuum of 0.05 MPa. It reduced the content of heavy metals in sortivkas, did not lead to formation of new harmful impurities during sorption processes, which confirms its environmental safety.

Assessment of sensory properties of sortivkas pretreated with palygorskite of 3.0÷2.0 mm fraction at vacuum of 0.05 MPa was high and unanimous.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-4-21

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ФРАКЦІЙНОСТІ ПАЛИГОРСЬКІТА НА СТУПІНЬ ВИЛУЧЕННЯ НЕБАЖАНИХ ДОМІШОК ІЗ СОРТІВОК ЗА НОРМАЛЬНИХ УМОВ ТА ПРИ РОЗРІДЖЕННІ

А. В. Якименко, Л. М. Мельник

Національний університет харчових технологій

Жорсткі вимоги до якості харчового етилового спирту та скорочення енергетичних витрат актуалізували пошук ефективних способів очищення етанолу від домішок, що погіршують його органолептичні властивості і є причиною невідповідності світовим стандартам.

Для дослідження були використані промислові зразки водно-спиртових розчинів (сортівки), які обробляли поширеним в Україні та доступним природним дисперсним мінералом палигорськітом. Для ефективного використання палигорськіта в очищенні сортівок від домішок досліджено вплив його фракційності на його адсорбційну спроможність за нормальних умов та при розрідженні. Використовували фракції 1,0÷0,5 мм, 2,0÷1,0 мм, 3,0÷2,0 мм.

Встановлено, що палигорськіт фракції 3,0÷2,0 мм має вищу адсорбційну спроможність, ніж адсорбент нижчої фракційності, що можна пояснити можливістю регулювання часу контакту адсорбента й адсорбата, нижчим гідравлічним опором шару адсорбента.

Якщо очищення сортівки проходило в присутності оточуючого повітря (нормальні умови), то за рахунок каталітичної активності адсорбованого з повітря кисню відбувалося погіршення якості очищуваного водно-спиртового розчину. Видалення повітря з адсорбера шляхом створення розрідження над поверхнею палигорськіта сприяло покращенню якості очищуваного водно-спиртового розчину. Застосування розрідження змістило термодинамічну рівновагу в бік більш низьких температур, що сприяло уповільненню перебігу хімічних процесів і зменшенню ймовірності утворення додаткових домішок у водно-спиртових розчинах. Крім того, очищення при розрідженні збільшувало тривалість роботи адсорбера, а отже, знижувалися енерговитрати на регенерацію адсорбента.

Встановлено, що палигорськіт ефективніше адсорбує шкідливі домішки із сортівки при розрідженні в 0,05 МПа. Він зменшує вміст важких металів у сортівках, не спричиняє утворення нових шкідливих домішок під час сорбційних процесів, що підтверджує його екологічну безпеку.

Оцінка органолептичних властивостей сортівок, попередньо очищених палигорськітом фракції 3,0÷2,0 мм при розрідженні в 0,05 МПа, є високою та одностайною.

Ключові слова: сортівка, палигорськіт, фракційність, нормальні умови, розрідження.

Постановка проблеми. Нормативні державні документи обмежують вміст домішок у харчовому етиловому спирті (ДСТУ 4222:2003, ДСТУ 4181:2003). Однак

неякісна вихідна сировина, порушення технологічного регламенту виробництва етанолу призводять до отримання етилового спирту зі збільшеним вмістом альдегідів, ефірів, вищих спиртів, метанолу (Янчевський, Ковальчук, Кравчук, Попова, & Олійник, 1999; Шиян, Сосницький, Шевченко, & Кириленко, 2022).

Вміст шкідливих домішок можна знизити шляхом очищення спиртового розчину природними глинистими мінералами, зокрема палигорськітом, поклади та розмаїття якого в Україні дуже великі (Мельник, Манк, & Марцін, 2004; Mank, & Melnyk, 2005). Ці глини використовувалися як абсорбенти ще з 1930-х років, проте їх застосування значно розширилося лише після Другої світової війни, коли їх почали використовувати для поглинання жиру, нафти, води, хімікатів та інших небажаних речовин, пролитих на підлогу заводів, станцій, авіаційних ангарів тощо (Galán, 1996).

Палигорськіт (відомий у зарубіжній науковій дослідженні також як атапульгіт) — це природний гідратований магнієво-алюмінієвий силікатний глинистий мінерал, який відносять до родини сепіолітів. Завдяки своєрідності кристалічної будови, формам і розмірам кристалів палигорськіт демонструє відмінні колоїдні й адсорбційні властивості та є стійким до різноманітних агресивних середовищ. При цьому природний палигорськіт є екологічно безпечним адсорбентом.

Відтак залишається актуальним проведення теоретичних та експериментальних досліджень можливості використання палигорськіту в харчовій промисловості України, зокрема, лікеро-горілчаній промисловості, як реальної альтернативи більш дорогому адсорбенту — активному вугіллю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Глинисті мінерали знаходять у великих покладах по всьому світу, що гарантує їх доступність і посилює інтерес до їх можливого застосування. Так, палигорськіт добувають у США, Китаї, Бразилії, Греції, Іспанії, Україні, Туреччині, Іраку, Гватемалі, Сенегалі, Австралії тощо. Вважається, що у США видобувають найбільшу кількість палигорськіту (76% від світового видобутку), в той час як у Китаї (провінції Аньхуей) знаходиться один з його найбільших покладів (близько 22 млн т) (Rusmin та ін., 2016).

Глинисті мінерали були та залишаються одними з важливих промислових мінералів, які широко застосовуються у різних сферах. Вони використовуються в сільському господарстві, будівництві, харчовій промисловості, у сфері захисту природного середовища тощо (Murtagh, 2000). При цьому продовжуються активні наукові дослідження, зокрема палигорськіту, що покращує існуючі та створює нові способи видобування й обробки цього мінералу, розширює традиційні сфери його застосування, а також призводить до появи нових застосувань.

Наукові вітчизняні та іноземні дослідження палигорськіту протягом останніх років демонструють, що:

1) палигорськіт як ефективний, недорогий і простий в експлуатації мінерал залишається одним з основних адсорбентів для очищення стічних вод від промислових та сільськогосподарських відходів, наприклад, від органічних барвників (Zhang, Wang, Zhang, Liu, & Wang, 2015; Silva та ін., 2021; Xu, Feng, Li, Li, & Yao, 2024), важких металів (Melnyk, Bessarab, Matko, & Malovanyy, 2015; Yang та ін., 2024; Hussein, Al-Bidry, & Wasiti, 2025) чи відходів пивоварних заводів (Papaevangelou, Bakalakou, Tsiliniokos, & Akratos, 2023). Найбільша кількість досліджень проводиться саме у цій сфері;

2) хоча необроблений палигорський має низьку антимікробну активність, його особлива структура пор, багаті поверхневі групи, висока питома поверхня та краща іонообмінна здатність, а також нетоксичність, біосумісність та екологічність роблять його придатними для застосування в галузях, пов'язаних зі здоров'ям людини, наприклад, для очищення питної води з метою поглинання бактерій (Мельник, Мельник, Ткачук, & Якименко, 2024). Крім того, палигорський можна використовувати для створення функціональних антимікробних нанокомпозитних і гібридних матеріалів, які можуть бути застосовані в різних сферах, таких як пакування харчових продуктів, перев'язування ран чи кормові добавки для здоров'я тварин (Yang, & Wang, 2022). Так, завдяки модифікаціям і поєднанням з іншими компонентами палигорський може бути заміником антибіотиків у сільському господарстві при виробництві кормових добавок для птиці (Zha, Chen, Wang, Wang, & Zhou, 2022) чи, наприклад, для лікування та профілактики діареї тварин, спричиненої сальмонелами (Yao та ін., 2017);

3) продовжується аналіз можливостей заміни палигорським більш дороговартісного активного вугілля у харчовій промисловості, наприклад, для очищення арахісової олії від афлатоксинів, які вважаються канцерогенними речовинами (Wang, Wang, Li, & Ji, 2025), для освітлення соєвої олії (Xavier та ін., 2016; Zhou, 2019) чи для очищення бразильської кашаси (міцного алкогольного напою, який отримують шляхом дистиляції чистого екстракту цукрової тростини) від альдегідів, вищих спиртів, фурфуролу, складних ефірів та летких кислот (Zacaroni та ін., 2015);

4) незважаючи на велику кількість досліджень адсорбційних можливостей палигорського, на які впливають такі фактори як його питома поверхня, розмір пор, здатність до обміну катіонів (що, в основному, залежать від хімічного складу і структури палигорського), небагато науковців вивчали вплив походження палигорського на його адсорбційні можливості, хоча саме походження палигорського, вочевидь, має визначальний вплив на його хімічний склад та структуру (Zhang, Wang, Zhang, Liu, & Wang, 2015; Rusmin та ін., 2016);

5) дослідники розуміють, що неочищений та необроблений палигорський не є ефективним (крім того, палигорський, як й інші природні глини, має домішки, що безпосередньо впливають на його фізико-хімічні характеристики, тому для його корисного застосування необхідна обробка). Іноді застосування необробленого палигорського може навіть мати негативні наслідки (наприклад, використання необробленого палигорського при очищенні жирів та олій призводить до видалення з них деяких корисних компонентів, таких як токоферол, стероли та ароматичні речовини, які можуть впливати на якість кінцевого олійного продукту (Wang, Wang, Li, & Ji, 2025)). Тому науковці активно продовжують досліджувати, розробляти та вдосконалювати методи очищення, обробки та модифікації палигорського. Переважно проводиться активація палигорського температурою (Zhou, 2019; Silva та ін., 2021) та кислотами (оцтовою, соляною) (Silva та ін., 2021; Hussein, Al-Bidry, & Wasiti, 2025), проте непоодинокими є також дослідження, в яких застосовуються каскадні процеси, які, залежно від поставлених цілей, поєднують, наприклад: а) кислотну та температурну обробки, результати якої демонструють сильнішу специфічну адсорбцію багатовалентних катіонів важких металів (Rusmin та ін., 2016);

б) ультразвукову гідротермальну обробку, активацію розчинення кислоти та відбілювання комплексом, що дає змогу отримати палигорськіт дуже високого ступеня чистоти, який демонструє високу ефективність очищення забруднених вод від барвників метиленового синього (МВ) та конго червоного (СR) (Xu, Feng, Li, Li, & Yao, 2024).

Крім того, існують дослідження обробки палигорськіту шляхом «екструзії/розмивання/модифікації поверхні/гомогенізації під високим тиском» без пошкодження кристалічної структури і довжини нанострижнів. Отриманий палигорськіт демонструє значне покращення властивостей порівняно з необробленим мінералом і розширює можливості застосування палигорськіта в нанокompозитах (Wang, & Wang, 2016).

Як випливає з вищезгаданих досліджень, палигорськіт, який має широкую географію, активно досліджується різними науковцями, в країнах яких знаходять його значні поклади. При цьому науковці постійно знаходяться у пошуку нових способів його обробки та застосування. Водночас примітно, що незначна кількість іноземних наукових досліджень присвячується застосуванню адсорбційних властивостей палигорськіту в харчовій промисловості, зокрема в лікєро-горілчаній.

Мета дослідження: дослідження впливу фракційності палигорськіта на ступінь вилучення небажаних домішок із сортівок за нормальних умов і при розрізненні.

Матеріали і методи. Матеріали дослідження: сортівка (40% об.), палигорськіт фракції 1,0±0,5 мм, 2,0±1,0 мм, 3,0±2,0 мм.

Для приготування сортівки ректифікований спирт «Екстра» та ректифікований спирт вищої очистки змішували з попередньо освітленою та пом'якшеною водою. Концентрацію отриманого розчину визначали ареометричним методом (Янчевський, Ковальчук, Кравчук, Попова, & Олійник, 1999). Дослідний розчин наливали в скляний циліндр об'ємом 250 см³, вимірювали температуру термометром з ціною поділки 0,1 °С, після чого занурювали спиртомір АСП-1. За показами спиртоміра і спеціальними таблицями поправок на температуру знаходили дійсну концентрацію етилового спирту за температури 20 °С, яка повинна бути 40% об. (Янчевський, Олійничук, Кравчук, Ковальчук, & Михайло, 2002).

Для встановлення фракційності палигорськіта використовували сита із різним діаметром отворів, що представляли собою комплект із п'яти сит. Палигорськіт засипали на верхнє сито, що закривалося кришкою, сильно струшували й отримували розсів адсорбента на різні фракції. Кожну фракцію зберігали окремо в скляній посудині, закритій притертою пробкою.

Перед використанням розсіяні фракції зважували і піддавали висушуванню. Висушували палигорськіт в електрошафі СЕШ-1 при t=180 °С протягом 4—5 год. Висушені бюкси з наважками палигорськіта витримували в ексикаторі протягом 30 хв, а потім заповнювали ними адсорбер.

Для визначення вмісту альдегідів використовували калориметричний метод з використанням фуксинсірчистої кислоти відповідно до ДСТУ 4165-2003. У присутності альдегідів безбарвний розчин фуксинсірчистої кислоти набуває червоно-фіолетового забарвлення за рахунок виділення фуксину. Визначали альдегіди шляхом порівняння інтенсивності кольорів типового розчину оцтового альдегіду та досліджуваного водно-спиртового розчину на фотоелектрокалориметрі ФЕК-60

в кюветах з довжиною грані 20 мм при зеленому світлофільтрі з довжиною світлової хвилі $\lambda=536$ нм.

Забарвленість досліджуваного розчину не повинна бути інтенсивнішою, ніж забарвленість типового розчину.

Викладення основних результатів дослідження. Очищення сортівки об'ємом 100 мл палигорськітом фракції $1,0\pm 0,5$ мм масою 4 г при нормальних умовах здійснювали в адсорбері динамічним способом. Отримані розчини аналізували на хроматографі.

Результати адсорбційного очищення сортівки від альдегідів палигорськітом фракції $1,0\pm 0,5$ мм при нормальних умовах наведені на рис. 1.

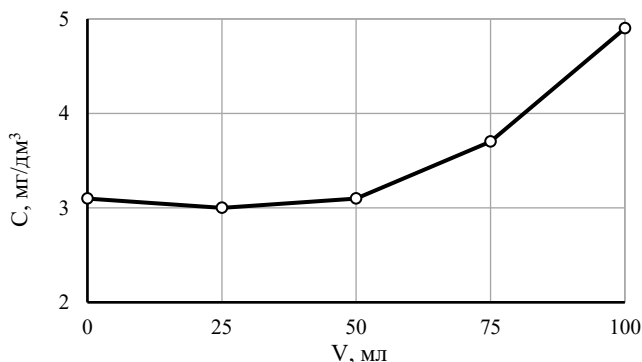


Рис. 1. Залежність концентрації альдегідів у сортівках від об'єму розчину, пропущеного через шар палигорськіту (фракція $1,0\pm 0,5$ мм)

З рис. 1 видно, що кількість альдегідів зростає. Це можна пояснити перевагою каталітичних процесів над адсорбційними.

При очищенні сортівки палигорськітом фракції $2,0\div 1,0$ мм кількість альдегідів зростає з 2,93 до 4,51 мг/дм³.

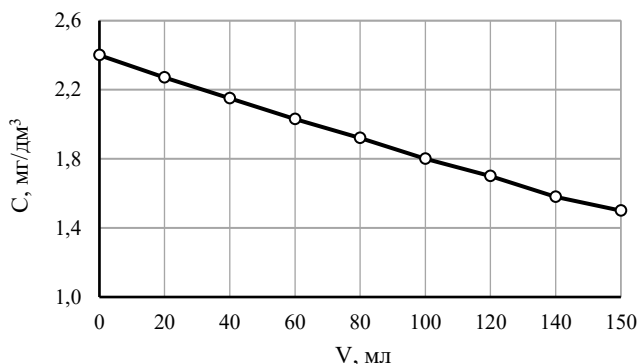


Рис. 2. Залежність концентрації альдегідів у сортівках від об'єму розчину, що пройшов крізь шар палигорськіту (фракція $3,0\div 2,0$ мм)

Аналіз рис. 2 підтверджує, що палигорськіт фракції $3,0\div 2,0$ мм ефективно адсорбує альдегіди, кількість яких зменшується із 2,4 до 1,5 мг/дм³.

Отримані експериментальні дані дали змогу порівняти адсорбційну спроможність палигорськіту фракції 1,0÷0,5 мм, 2,0÷1,0 мм, 3,0÷2,0 мм щодо альдегідів за нормальних умов. Це підтверджують дані табл. 1.

Таблиця 1. Концентрація альдегідів (мг/дм³) у сортівках, очищених палигорськітом різної фракційності за нормальних умов

Назва домішки	Фракційність, мм					
	1,0÷0,5		2,0÷1,0		3,0÷2,0	
Альдегіди	Концентрація домішки					
	C _о	C _р	C _о	C _р	C _о	C _р
	3,1	4,9	2,93	4,51	2,4	1,5

Отже, серед фракцій, які випускаються промисловістю, фракція палигорськіту 3,0÷2,0 мм виявила за нормальних умов максимальну адсорбційну спроможність щодо альдегідів. Така фракція не спричиняє великого гідравлічного опору в адсорбері, дає змогу регулювати швидкість адсорбційних процесів, а отже, і тривалість контакту сортівки з адсорбентом. Також дуже важливо, що така фракція регенерується набагато ефективніше, ніж дрібніша.

Адсорбційна спроможність палигорськіта щодо очищення сортівки за відсутності кисню значно зростає (Якименко, Мельник, & Бессараб, 2025). Тож видалення повітря з адсорбенту шляхом створення розрідження над його поверхнею повинно сприяти поліпшенню якості обробленого палигорськітом водно-спиртового розчину. Застосування розрідження зміщує термодинамічну рівновагу в бік більш низьких температур, що сприяє уповільненню перебігу хімічних процесів, а отже, зменшує ймовірність утворення додаткових домішок у водно-спиртових розчинах.

Для перевірки цього твердження проведені додаткові дослідження впливу дії поверхні палигорськіту фракції 3,0÷2,0 мм до альдегідів при різних тисках (табл. 2).

Таблиця 2. Адсорбційна спроможність палигорськіту фракції 3,0 ÷ 2,0 мм щодо альдегідів етилового спирту при різних тисках

Домішки	C _о , мг/дм ³	Тиск, МПа			
		0,03	0,05	0,07	0,09
Альдегіди	2,43	1,3	1,4	2,01	2,15

Дані табл. 2 свідчать, що адсорбційна спроможність палигорськіту фракції 3,0÷2,0 мм щодо альдегідів вища при розрідженні в 0,03 і 0,05 МПа. Оскільки підтримувати тиск 0,03 МПа складніше, подальші дослідження проводили при розрідженні в 0,05 МПа.

Динаміку сорбції палигорськітом альдегідів можна простежити на рис. 3, де наведені зміни концентрації альдегідів у сортівках, які пройшли крізь шар палигорськіту при розрідженні 0,05 МПа.

Із рис. 3 видно, що при досягненні об'єму сортівки в 100 мл вміст альдегідів зменшується порівняно з початковим. Подальше збільшення об'єму сортівки для

очищення є недоцільним, оскільки вміст альдегідів в очищеній палигорськітом сортівці починає зростати.

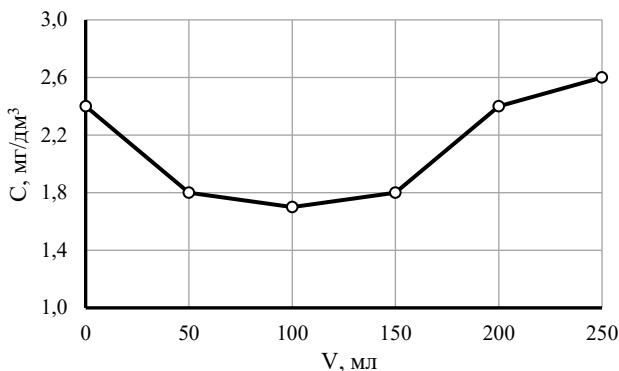


Рис. 3. Залежність вмісту альдегідів у сортівках від об'єму розчину, що пройшов через шар палигорськіту при розрідженні

Дегустаційній оцінці була піддана сортівка, очищена палигорськітом фракції 3,0÷2,0 мм при розрідженні в 0,05 МПа. Результати дегустації наведені в табл. 3.

Таблиця 3. Оцінка органолептичних властивостей сортівок, попередньо очищених палигорськітом фракції 3,0÷2,0 мм при розрідженні в 0,05 МПа

Дегустаційна комісія	Колір	Запах	Смак	Загальна оцінка
№1	2,0	3,7	3,7	9,5
№2	2,0	3,7	3,7	9,5
№3	2,0	3,7	3,8	9,4
№4	2,0	3,7	3,8	9,4
№5	2,0	3,7	3,8	9,4

Із табл. 3 видно, що дегустаційна оцінка очищених при розрідженні в 0,05 МПа палигорськітом фракції 3,0÷2,0 мм зразків — висока і однотайна, що свідчить про доцільність застосування розрідження при адсорбційному очищенні сортівок.

Висновки

1. Палигорськіт фракції 3,0÷2,0 мм має кращу адсорбційну спроможність, ніж адсорбенти нижчої фракційності, що можна пояснити можливістю регулювання тривалості контакту адсорбента й адсорбата, нижчим гідравлічним опором шару адсорбента.

2. Палигорськіт ефективніше сорбує альдегіди із сортівок при розрідженні в 0,05 МПа.

3. Очищення сортівок палигорськітом при розрідженні збільшує тривалість роботи адсорбера, а отже, знижуються енерговитрати на регенерацію сорбента.

4. Оцінка органолептичних властивостей сортівок, попередньо очищених палигорськітом фракції 3,0÷2,0 мм при розрідженні в 0,05 МПа, є високою і однотайною.

5. Палигорськіт не вносить нових шкідливих домішок у сортивку під час її очищення, що підтверджує його екологічну безпеку.

Література

Мельник, Н. А., Мельник, Л. М., Ткачук, Ю. В., Якименко, А. В. (2024). Асептичні властивості природних мінералів. *Продовольчі ресурси*, 12(23), 112—118. <https://doi.org/10.31073/foodresources2024-23-13>.

Мельник, Л. М., Манк, В. В., Марцін, І. І. (2004). Ефективність дії природних дисперсних мінералів в очищенні водно-спиртових розчинів. *Наукові праці НУХТ*, 15, 23—25. <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/7454>.

Шиян, П., Сосницький, В., Шевченко, О., Кириленко, Р. (2022). *Алкогольні напої — досвід поколінь (технологія, обладнання, рецептури)*. <https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi72/0052389.pdf>.

Якименко, А. В., Мельник, Л. М., Бессараб, О. С. (2025). Вплив кисню та аргону на адсорбційно-каталітичні процеси, що відбуваються при очищенні сортівок активним вугіллям і природними адсорбентами. *Наукові праці НУХТ*, 25(1), 217—225. <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2025-31-1-11>.

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

Янчевський, В. К., Олійничук, С. Т., Кравчук, З. Д., Ковальчук, В. П., Михайло, В. Н. (2002). *Таблиці спиртометрические. Справочное пособие*. Київ: УкрНДІспиртбіопрод.

Galan, E. (1996). Properties and applications of palygorskite-sepiolite clays. *Clay Minerals*, 31, 443—453. <https://doi.org/10.1180/claymin.1996.031.4.01>.

Haydn, H. Murray. (2000). Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite: a general overview. *Applied Clay Science*, 17, (5—6), 207—221. [https://doi.org/10.1016/S0169-1317\(00\)00016-8](https://doi.org/10.1016/S0169-1317(00)00016-8).

Hussein, A. F., Al-Bidry, M. A., & Wasiti, A. A. A. (2025). Investigation and evaluation of palygorskite microstructure following acid pretreatment and its potential use as an adsorbent for copper. *Sci. Rep.*, 15, 3813. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-88449-8>.

Mank, V. V., Melnyk, L. N. (2005). Use of clay minerals for adsorptive clearing Of aqueous-alcoholic solutions. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 2(138), 113—117 https://www2.irms.cas.cz/materialy/acta_content/2005_02/14_Mank.pdf

Melnyk, L., Bessarab, O., Matko, S., Malovanyy, M. (2015). Adsorption of heavy metals ions from liquid media by palygorskite. *Chemistry & Chemical Technology*, 9(4), 467—470. http://science2016.lp.edu.ua/sites/default/files/Full_text_of_%20papers/full_text_10.pdf.

Papaevangelou, V., Bakalakou, K. A., Tsiliniokos, J., & Akrotos, C. S. (2023). Testing Zeolite and Palygorskite as a Potential Medium for Ammonium Recovery and Brewery Wastewater Treatment. *Water*, 15(23), 4069. <https://doi.org/10.3390/w15234069>.

Rusmin, R., Sarkar, B., Biswas, B., Churchman, J., Liu, Y., Naidu, R. (2016). Structural, electrokinetic and surface properties of activated palygorskite for environmental application. *Applied Clay Science*, 134(2), 95—102. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.07.012>.

Silva, V. C., Araújo, M. E. B., Rodrigues, A. M., Cartaxo, J. M., Menezes, R. R., Neves, G. A. (2021). Adsorption Behavior of Acid-Treated Brazilian Palygorskite for Cationic and Anionic Dyes Removal from the Water. *Sustainability*, 13(7), 3954. <https://doi.org/10.3390/su13073954>.

Silva, V. C., Araújo, M. E. B., Rodrigues, A. M., Vitorino, Md. B. C., Cartaxo, J. M., Menezes, R. R., Neves, G. A. (2021). Adsorption Behavior of Crystal Violet and Congo Red Dyes on Heat-Treated Brazilian Palygorskite: Kinetic, Isothermal and Thermodynamic Studies. *Materials*, 14(19), 5688. <https://doi.org/10.3390/ma14195688>.

Wang, W., Wang, A. (2016). Recent progress in dispersion of palygorskite crystal bundles for nanocomposites. *Applied Clay Science*, 119(1), 18—30. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.06.030>.

Wang, D., Wang, Y., Li, Ch., Ji, J. (2025). Safe and targeted detoxification of aflatoxins from contaminated peanut oil by palygorskite infiltrated with Span series surfactant. *Applied Clay Science*, 265, 107660. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2024.107660>.

Xavier, K. C. M., Santos, M. S. F., Osajima, J. A., Luz, A. B., Fonseca, M. G., Silva Filho, E. C. (2016). Thermally activated palygorskites as agents to clarify soybean oil. *Applied Clay Science*, 119(2), 338—347. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.10.037>.

Xu, C., Feng, Y., Li, H., Li, Y., Yao, Y. (2024). Purification of natural palygorskite clay: Process optimization, cleaner production, mineral characterization, and decolorization performance. *Applied Clay Science*, 250, 107268. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2024.107268>.

Yang, F., Wang, A. (2022). Recent researches on antimicrobial nanocomposite and hybrid materials based on sepiolite and palygorskite. *Applied Clay Science*, 219, 106454. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2022.106454>.

Yang, X., Zhou, Y., Hu, J., Zheng, Q., Zhao, Yu., Lv, G., Liao, L. (2024). Clay minerals and clay-based materials for heavy metals pollution control. *Science of The Total Environment*, 954, 176193. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176193>.

Yao, D. W., Yu, Z. Z., Li, N., Hou, Y. N., Xu, J. R., Yang, D. J. (2017). Copper-modified palygorskite is effective in preventing and treating diarrhea caused by *Salmonella typhimurium*. *J. Zhejiang Univ. Sci. B.*, 8(6), 474—480. <https://doi.org/10.1631/jzus.B1600133>.

Zacaroni, L. M., Magriotis, Z. M., Cardoso, M. G., Wilder Douglas Santiago, Mendonça, J. G., Vieira, S. S., Nelson, D. L. (2015). Natural clay and commercial activated charcoal: Properties and application for the removal of copper from cachaça. *Food Control*, 47, 536—544. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2014.07.035>.

Zha, P., Chen, Y., Wang, S., Wang, A., Zhou, Y. (2022). Dietary palygorskite-based antibacterial agent supplementation as an alternative to antibiotic improves growth performance, intestinal mucosal barrier function, and immunity in broiler chickens. *Poultry Science*, 101(5), 101640. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.101640>.

Zhang, Y., Wang, W., Zhang, J., Liu, P., Wang, A. (2015). A comparative study about adsorption of natural palygorskite for methylene blue. *Chemical Engineering Journal*, 262, 390—398. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.10.009>.

Zhou, L. (2019). Adsorption behavior and mechanism of attapulgit when used in oil bleaching. *Food science*, 40(3), 87—93. <https://www.spkx.net.cn/EN/Y2019/V40/I3/87>.

УДК 543

ANALYTICAL POTENTIALS OF LEAD CARBOXYLATE COMPLEXES WITH CROWN ETHERS**O. Kronikovskiy, K. Chebanenko, V. Ischenko, O. Kronikovska***National University of Food Technologies***N. Stadnichuk***L. I. Medved's research center of preventive toxicology, food and chemical safety, ministry of health***Key words:***Crown ethers**Natural water**Lead**Extraction**Atomic absorption***Article history:**

Received 09.07.2025

Received in revised form

21.07.2025

Accepted 12.08.2025

Corresponding author:

O. Kronikovskiy

E-mail:

oleg.kronikovskiy@gmail.com

Citation: Кроніковський О. І., Чебаненко Х. В., Іщенко В. М., Кроніковська О. П., Стаднічук Н. О. (2025). Аналітичні можливості карбоксилатних комплексів Плюмбуму з краун-етерами. *Наукові праці НУХТ*, 31(4), 267—276.
DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-4-22

ABSTRACT

A range of analytical methods is used for the quantitative determination of lead in water. One of the rapid and sensitive methods for detecting Pb is atomic absorption spectroscopy, either in flame or electrothermal modes. However, direct determination of lead by this method is complicated by the interfering effects of foreign ions. To overcome this issue, liquid-liquid extraction is often employed. The selectivity of the extraction largely depends on the appropriate choice of reagents, solvents, and process conditions. Macrocyclic crown ethers have proven to be quite selective reagents for extracting various metals.

The synergistic effect of the crown ether 18-crown-6 on the extraction of lead carboxylates using a range of organic solvents was investigated. The dependence of lead extraction efficiency on the concentration of the components has been studied. Based on the results obtained, it was found that under the experimental conditions, lead was transferred to the organic phase in the form of PbLA₂ complexes. This was confirmed by both the method of molar ratios and the logarithmic method.

Schemes of the processes occurring in the extraction systems were provided and the corresponding extraction constants of the complexes were calculated. Conditions for the quantitative transfer of the complexes into the organic phase were determined. The wide pH range for the extraction of the lead complex with 18-crown-6 and trichloroacetate ion, along with the highest extraction constant compared to other metal complexes, which ensures the required selectivity, enabled the concentration of lead from large volumes of aqueous phase.

These findings made it possible to develop a method for extraction-atomic absorption determination of lead in water and other samples. Based on the obtained results, a procedure for extraction concentration and atomic absorption determination of lead in natural, wastewater, and other types of water was proposed and tested on real samples.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-4-22

АНАЛІТИЧНІ МОЖЛИВОСТІ КАРБОКСИЛАТНИХ КОМПЛЕКСІВ ПЛЮМБУМУ З КРАУН-ЕТЕРАМИ

О. І. Кроніковський, Х. В. Чебаненко, В. М. Іщенко, О. П. Кроніковська

Національний університет харчових технологій

Н. О. Стаднічук

ДП «Науковий центр превентивної токсикології, харчової та хімічної безпеки імені академіка Л. І. Медведя МОЗ України»

Для кількісної оцінки вмісту Плюмбуму у воді використовується ряд аналітичних методів. Досить експресним і чутливим методом визначення Pb є атомно-абсорбційна спектроскопія в полуменевому чи електротермічному варіантах. Однак пряме визначення Плюмбуму цим методом ускладнюється через вплив сторонніх іонів. Для вирішення цієї проблеми часто використовується рідинна екстракція. Селективність екстракції значною мірою залежить від правильності підбору реагентів, розчинників та умов проведення процесу. Досить селективними реагентами при вилученні ряду металів зарекомендували себе макроциклічні краун-етери

У статті розглянуто синергетичну дію краун-етеру 18-краун-6 на екстракцію карбоксилатів Плюмбуму рядом органічних розчинників. Досліджено залежність ступеня вилучення Плюмбуму від концентрації компонентів. На основі отриманих результатів встановлено, що в умовах проведення експерименту в органічну фазу Плюмбум переходить у вигляді комплексів $PbLA_2$. Це підтверджується як методом молярних відношень, так і логарифмічним методом.

Наведено схеми процесів, що відбуваються в екстракційних системах і розраховано відповідні константи екстракції комплексів. Встановлено умови кількісного вилучення комплексів в органічну фазу. Широкий інтервал рН вилучення комплексу Плюмбуму з 18-краун-6 та трихлорацетат-іоном найбільш високе порівняно з комплексами інших металів, значення константи екстракції, що забезпечує необхідну селективність вилучення та концентрацію Плюмбуму з великих об'ємів водної фази, надали можливість розробки методики екстракційно-атомно-абсорбційного визначення Плюмбуму у воді та інших об'єктах. На основі отриманих результатів запропоновано методику екстракційного концентрування та атомно-абсорбційного визначення Плюмбуму в природних, стічних та інших водах, яку перевірено на реальних об'єктах.

Ключові слова: краун-етери, природна вода, Плюмбум, екстракція, атомна абсорбція.

Постановка проблеми. Одна з основних екологічних проблем людства — якість питної води, яка безпосередньо пов'язана зі станом здоров'я населення, екологічною чистотою продуктів харчування, з рішенням проблем медичного та соціального характеру. Активна техногенна діяльність людини призводить до забруднення природних вод сполуками важких металів, в тому числі й Плюмбуму. Необхідно зважати, що Плюмбум відноситься до класу високонебезпечних речовин. Для живих організмів він є одним із найсильніших токсикантів (Сніжко, 2001). Неорганічні сполуки Плюмбуму порушують обмін речовин і є інгібіторами ферментів.

Тривале споживання води навіть з низьким вмістом металу — одна з причин гострих і хронічних захворювань. Плюмбум накопичується в кістках, замінюючи кальцій, зв'язує велику кількість молекул амінокислот, гемоглобіну, більшість ензимів. Отруєння Плюмбумом призводять до підвищення кров'яного тиску, порушень кровотворної функції та роботи мозку, нирок і шлунково-кишкового тракту. Плюмбум досить стійкий у навколишньому середовищі і через його широке використання вміст цього елемента в продуктах харчування зростає майже в кожній країні, створюючи серйозну загрозу (Mitra та ін., 2023). Підвищення вмісту Плюмбуму у водах проходить, в основному, за рахунок промислових стічних вод і використання етилованих бензинів. У місцевостях з м'якою водою концентрація Pb^{2+} може досягати 1 мг/дм^3 . Гранично ж допустима концентрація вмісту Плюмбуму в питній воді складає 10 мкг/дм^3 (згідно з вимогами ДСанПіН 2.2.4-171-10).

Контроль вмісту Плюмбуму в питних, природних, стічних водах та інших об'єктах навколишнього середовища є важливою аналітичною задачею, що вимагає розробки нових, сучасних, селективних і високоефективних методик його визначення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для кількісної оцінки вмісту Плюмбуму у воді використовується ряд аналітичних методів. Досить експресним і чутливим методом визначення Pb є атомно-абсорбційна спектроскопія в полуменовому (Сухан, Крониковский, & Назаренко, 1988) чи електротермічному (Іщенко, Іщенко, & Панчук, 2010) варіантах. Однак пряме визначення Плюмбуму на рівні ГДК цим методом часто ускладнюється заважаючим впливом сторонніх іонів, що присутні в природних водах (Іщенко, Таратайко, Іщенко, & Крониковський, 2015). Для послаблення цього впливу іноді можна скористатися застосуванням хімічних модифікаторів (Bader, & Bukhzam, 2014). Ефективним підходом для усунення завад з боку заважаючих визначенню Плюмбуму іонів металів і суттєвого підвищення чутливості методу аналізу є попереднє сорбційне чи екстракційне концентрування (Pavithran, Varma, & Reddy, 2003; Мельник, Мельник, & Магорівська, 2024). Досить селективними реагентами при вилученні ряду металів зарекомендували себе макроциклічні краун-етери (Hiraoka, 1986; Pavithran, Varma, & Reddy, 2003; Lap, Kanbur, & Taufun, 2021). У випадку жорстких катіонів лужних і лужноземельних металів спостерігаються гарні кореляційні залежності між екстракційними властивостями краун-етерів і відповідністю розмірів порожнини краун-етера діаметра катіона-комплексотворювача (Heydari, Habibi, & Faraji, 2022) та між стійкістю внутрішньосферних комплексів у воді і значеннями констант екстракції органічними розчинниками — чим вища стійкість комплексів у воді, тим легше вони переходять в органічну фазу (Vogtle, 2021). З останніх досліджень заслуговує на увагу праця (Purwaningsih та ін., 2024), в якій представлено розробку електрохімічного методу аналізу в поєднанні з гелевою електромембранною екстракцією для одночасного виявлення кадмію та Плюмбуму в пробах навколишньої води. Краун-етер додавали до гелю як комплексотворювач і катіонний носій. Межі виявлення за цією методикою становлять $0,10\text{ мкг/л}$ для кадмію і $0,19\text{ мкг/л}$ для Плюмбуму, що в 120 разів чутливіше, ніж прямі електрохімічні вимірювання.

Мета дослідження полягає в підборі умов кількісної і разом з тим селективної екстракції карбоксилатів Плюмбуму з поліетерами та розробці методик визначення і подальшого вилучення вмісту Плюмбуму в різних об'єктах на основі аналізу екстракційно-аналітичних характеристик цих комплексів.

Матеріали і методи. Розчин 18-краун-6 («Aldrich»), робочі розчини нітратів Pb^{2+} , Fe^{3+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Ni^{2+} , Co^{2+} готували розчиненням наважок солей у воді та додатково стандартизували комплексонометрично. Вихідний розчин Pb^{2+} готували розчиненням точної наважки металічного свинцю (99,9%) в нітратній кислоті кваліфікації «х.ч.». Розчин трихлорацетатної кислоти стандартизували рН-метричним титруванням. Бідистильовану воду отримували згідно з рекомендаціями (Bond, Dietz, & Chiarizia, 2000). Хлороформ очищали багаторазовим промиванням бідистильованою водою.

Вміст Плюмбуму у водній та органічній фазах визначали на атомно-абсорбційному спектрофотометрі «Сатурн-3П-1» (довжина хвилі 283,3 нм, полум'я пропан-бутан — повітря). Реєстрацію аналітичного сигналу вели за допомогою програмного забезпечення виробництва НВО «Семі» (м. Суми). Кислотність розчинів контролювали на рН-метрі ЭВ-74 зі скляним електродом.

Експеримент проводили таким чином: у ділительну лійку поміщали необхідну кількість водного розчину краун-етеру, розчин солі Плюмбуму, певну кількість розчину нітратної кислоти чи літій гідроксиду для створення необхідного значення рН і доводили об'єм водою до 5 мл. Екстрагували протягом 2 хв хлороформним розчином карбонової кислоти. Після розділення фаз вимірювали рН водної фази. Вміст Плюмбуму у фазах після екстракції контролювали атомно-абсорбційним методом.

Викладення основних результатів дослідження. Відомо, що Плюмбум здатний вилучатися в органічну фазу як самими карбоновими кислотами при їх високіх концентраціях (1—2 моль/л), так і поліетерами в системах з аніонами барвників та неорганічними аніонами (Lehn, Atwood, Davies, MacNicol, & Wogtle, 1996; Васильєва, Горліченко, Шевченко, Шепеліна, & Ганін, 2009). Авторами пропонованої статті досліджена синергетична дія ряду поліетерів і карбоксилат-йонів на екстракцію Плюмбуму органічними розчинниками.

За відсутності сольватуючих добавок не виявлено помітної (близько 1%) екстракції Плюмбуму із 0—2 моль/л розчинів нітратної і трихлорацетатної кислот та 0—0,1 моль/л розчинів бромпропіонової кислоти; 0,05 моль/л розчини бромкапронової і капронової кислот помітно екстрагують Плюмбум у слабокислому середовищі.

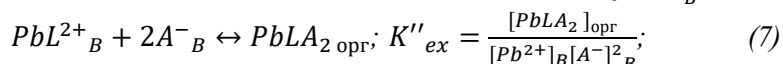
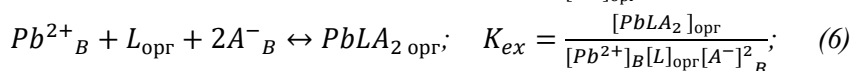
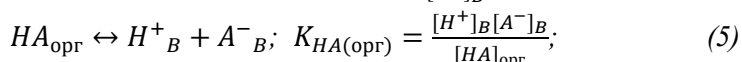
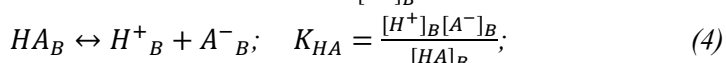
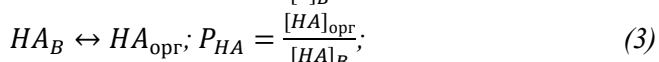
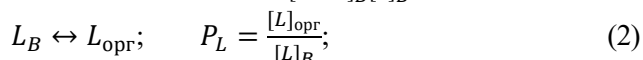
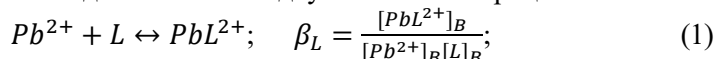
Введення в екстракційну систему краун-етера 18-краун-6 значно підвищує ступінь екстракції Плюмбуму карбоновими кислотами та розширює область рН максимального вилучення, тобто в системі утворюються різнолігандні комплекси Плюмбуму, які добре екстрагуються хлороформом (Atanassova, & Dukov, 2005). У випадку карбонових кислот можливо підібрати умови кількісної екстракції Плюмбуму; для нітратної кислоти максимальне значення екстракції досягає близько 85%, що спостерігається при її концентрації рівній 1,5—2 моль/л.

Найбільш ефективною з аналітичної точки зору виявилась система Плюмбум — 18-краун-6 — трихлорацетатна кислота (Кроніковський, Іщенко, & Панчук, 2014),

в якій спостерігається кількісне вилучення Плюмбуму в органічний розчинник у широкому інтервалі кислотності — від сильноокислих розчинів до нейтральних.

Досліджена залежність ступеня вилучення Плюмбуму від концентрації компонентів. Як і в раніше, у вивчених комплексах Плюмбум координує одну молекулу 18-краун-6, що підтверджується як методом молярних відношень, так і логарифмічним методом. Аналогічно доведено, що до складу екстрагованого комплексу входять два трихлорацетат-йони, тобто в досліджуваних умовах в органічну фазу Плюмбум переходить у вигляді комплексу $PbLA_2$.

Зважаючи на комплексоутворення у водній фазі та розподілення лігандів між органічним розчинником і водою в системі відбуваються такі процеси:



$$lgK_{ex} = lgK''_{ex} + lg\beta_L - lgP_L. \quad (8)$$

В умовах нашого експерименту з урахуванням константи димеризації трихлорацетатної кислоти (Rehman, Ali, Anwar, & Yawar, 2006; Song та ін., 2017) утворенням димерів можна знехтувати. Аналогічно в розбавлених розчинах можна знехтувати міжлігандною взаємодією, яка є причиною пониження екстракції при високих концентраціях кислот (Sung, Moorthy, Song, & Ha, 2014). При розрахунках приймали, що $lg\beta_L = 4,27$, $P_L = 6,3$ (Gagabe, Satoh, Satoh, & Sawada, 2006). Приклад визначення K_{ex} комплексу $Pb18C6(TXA)_2$ наведено в табл. 1. Задаючи отримані експериментально значення концентрацій Pb^{2+} в органічній та водній фазах при відомих загальних концентраціях компонентів і рН, розраховували рівноважні концентрації компонентів в обох фазах. Зважаючи на отримані рівноважні концентрації, розраховували K''_{ex} . Експеримент проводили за умов, коли основна частина Плюмбуму, що знаходився у водній фазі, зв'язана в комплекс з 18-краун-6, що суттєво зменшує вплив похибки в значеннях P_L і β_L . Отримані таким чином концентраційні константи залежать від йонної сили розчину. Раніше у (Dukov, & Atanassova, 2003) було показано, що залежність ця при $\mu < 0,7$ задовільно описується рівнянням Девіс (Мельник, Мельник, & Магорівська, 2024). Отримані з урахуванням рівняння Девіс термодинамічні константи екстракції та статистична обробка також наведені в табл. 1, 2.

Своєрідним є вплив розчинника на значення констант екстракції комплексу $Pb18C6(TXA)_2$ (табл. 2): різниця в K_{ex} для різних за природою розчинників ледве перевищує похибку експерименту.

Таблиця 1. Визначення константи екстракції комплексу Pb18C6(TXA)₂ хлороформом
($pK_{HA} = 0,66$; $P_L = 6,3$)

pH	C_{18C6} , моль/л	C_{Pb} , моль/л	C_{TXA} , моль/л	R, %	lgK''_{ex}	lgK''_{ex} (терм.)
1,18	$2 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	0,02	44	4,18	4,57
			0,03	50	3,93	4,35
			0,10	87	3,73	4,40
1,45	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	0,05	70	3,79	4,33
			0,05	62	3,86	4,40
2,01	$2 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	0,01	36	4,40	4,67
			0,02	56	4,17	4,56
			0,03	68	4,05	4,47
2,13	$4 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	0,04	75	3,95	4,43
			0,01	56	4,25	4,52
			0,02	82	4,18	4,57
			0,03	94	4,34	4,74
			0,05	95	4,14	4,67
					$\bar{x} = 4,07$	$\bar{x} = 4,51$
					$s = 0,21$	$s = 0,13$
					$\Delta x = 0,13^*$	$\Delta x = 0,08$

* $P = 0,95$

Таблиця 2. Термодинамічні константи екстракції комплексів Pb18C6(TXA)₂ різними розчинниками

Розчинник	P_L	lgK''_{ex}	lgK_{ex}
CHCl ₃	6,3	$4,55 \pm 0,10$	8,02
CH ₂ Cl ₂	4,5	$4,7 \pm 0,1$	8,3
C ₂ H ₄ Cl ₂	1,1	$3,88 \pm 0,05$	8,21

Для порівняння аналогічно визначені значення констант екстракції хлороформом ряду металів у вигляді комплексів з 18-краун-6 та трихлорацетат-йоном (табл. 3).

Таблиця 3. Константи екстракції хлороформом комплексів M(18C6)(CCl₃COO)_n

Метал	lgK_{ex}	
	Концентраційна*	Термодинамічна
Ag(I)	$1,23 \pm 0,05$	1,8
Tl(I)	$2,54 \pm 0,03$	3,0
Na	$0,34 \pm 0,02$	0,9
K	$2,31 \pm 0,01$	2,9
Rb	$1,53 \pm 0,03$	2,0
Cs	$1,54 \pm 0,03^{**}$	2,4
Ca	$0,94 \pm 0,02$	2,2
Sr	$2,98 \pm 0,02$	4,2
Ba	$2,40 \pm 0,02$	3,6
Pb(II)	—	8,02
Bi(III)	$5,0 \pm 0,1$	6,8

*В присутності 1 моль/л CCl₃COOLi.

**Для Cs(18C6)₂CCl₃COO.

Широкий інтервал рН вилучення комплексу Плюмбуму з 18-краун-6 та трихлорацетат-йоном найбільш високе порівняно з комплексами інших металів, значення константи екстракції (Назаренко, Крониковский, & Сухан, 1987), що забезпечує необхідну селективність вилучення та концентрацію Плюмбуму з великих об'ємів водної фази (табл. 4), надали можливість розробки методики екстракційно-атомно-абсорбційного визначення Плюмбуму в різних об'єктах, в тому числі і у воді. Методика полягала в тому, що в ділительну лійку поміщають аліквотну частину (< 990 мл) досліджуваного розчину, що містить 5—200 мкг Pb^{2+} , 10 мл 7 моль/л розчину трихлорацетатної кислоти. Об'єм водної фази доводять до 1000 мл бідистильованою водою і екстрагують Плюмбум двома порціями 0,2 моль/л хлороформного розчину 18-краун-6 по 25 мл протягом 2—3 хв кожною. Екстракти збирають, відганяють хлороформ до об'єму 10 мл, залишок переносять у мірну колбу ємкістю 25 мл, доводять до мітки спиртом (метанол, етанол, ізопропанол) і визначають вміст Плюмбуму атомно-абсорбційним методом. Приклади визначення Плюмбуму при його вмісті 0,010 мкг/мл та 0,020 мкг/мл та статистична обробка результатів наведені в табл. 4.

Таблиця 4. Результати визначення Плюмбуму в присутності нітратів металів (C_{Me} : $C_{Pb} = 200$; $n = 4$)

Введено Pb, мг/мл	Сторонній метал	Знайдено Pb, мг/мл	ΔX , мг/мл ($P = 0,95$)
0,208	—	0,206	0,0032
0,416*	—	0,0416	0,0006
0,0208*	—	0,0194	0,0006
0,0208**	—	0,0204	0,0006
0,0104**	—	0,0098	0,0010
1,0·10 ⁻⁵ ***	—	9,4·10 ⁻⁶	1,6·10 ⁻⁶
2,0·10 ⁻⁵ ***	—	1,9·10 ⁻⁵	1,6·10 ⁻⁶
0,208	Cu ²⁺	0,204	0,0064
0,208	Fe ³⁺	0,202	0,0064
0,208	Cd ²⁺	0,202	0,0032
0,208	Zn ²⁺	0,202	0,0032
0,208	Co ²⁺	0,204	0,0032
0,208	Ni ²⁺	0,204	0,0032

* $V_o:V_e = 1:5$.

** $V_o:V_e = 1:10$.

*** $V_o:V_e = 1:20$.

Методика екстракційного концентрування Плюмбуму з великих об'ємів водної фази з допомогою краун-ефіра 18-краун-6 і його подальшого атомно-абсорбційного визначення була апробована на реальних об'єктах. Об'єктами досліджень була річкова вода (р. Либідь) і озерна вода (Нижнє озеро Голосіївського парку). Результати, отримані за розробленою методикою та паралельно за методикою (Іщенко, Іщенко, & Панчук, 2010) наведені в табл. 5. Обидві методики дають близькі за значеннями результати вмісту Плюмбуму в природних водах, що підтверджують стандартні відхилення та довірчий інтервал.

Таблиця 5. Визначення Плюмбуму в природній воді ($n = 4$; $P = 0,95$)

Місце відбору проби	C_{Pb} , мг/мл	
	За розробленою методикою	За методикою (Іщенко, Іщенко, & Панчук, 2010)
Р. Либідь (гирло)	0,036 ± 0,004	< 0,04
Нижнє озеро Голосіївського парку	0,291 ± 0,012	0,285 ± 0,015

Методика також була апробована на реальних зразках води в лабораторії Дніпровської водопровідної станції. Розроблена методика може бути успішно використана для контролю вмісту Плюмбуму в природних і стічних водах та інших об'єктах.

У подальшому цікавим є дослідження можливостей використання комплексів інших металів з краун-етерами та карбоновими кислотами для розробки методик їх вилучення та подальшого визначення в різних об'єктах навколишнього середовища.

Висновки

Досліджена екстракція Плюмбуму у вигляді різнолігандних комплексів з 18-краун-6 і карбоксилат-йонами органічними розчинниками. Найбільш ефективною з аналітичної точки зору виявилась екстракційна система Pb-18C6-трихлорацетат-йон.

Підібрано умови утворення та кількісного і селективного вилучення Плюмбуму у вигляді стійкого комплексу складу $Pb18C6(CCl_3COO)_2$ з великих об'ємів водної фази в органічну.

Розроблено методику селективного екстракційного вилучення та концентрування Плюмбуму у вигляді комплексу $Pb18C6(CCl_3COO)_2$ хлороформом з подальшим атомно-абсорбційним визначенням його в природних, стічних та інших водах, яка була апробована на реальних об'єктах.

Література

Васильєва, М. Г., Горліченко, М. Г., Шевченко, С. В., Шепеліна, С. І., Ганін, Е. В. (2009). Особливості утворення комплексів «хазяїн-гість» краун-етерів з HN-протондонорними молекулами. *Вісник Одеського державного екологічного університету*, 8, 239—244. <http://bulletin.odeku.edu.ua/wp-content/uploads/2009/07/30-Vasileva-Gorlichenko-Shevchenko-Shepelina-Ganin.pdf>.

Іщенко, В. Б., Іщенко, В. М., Панчук, Т. К. (2010). Електротермічне атомно-абсорбційне визначення Плюмбуму в природних водах з використанням органічних комплексоутворювачів в якості хімічних модифікаторів. *Науковий вісник НУБіП*, 150, 89—97. http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/bpc_2014_6_3-4_10.pdf.

Іщенко, М. В., Таратайко, П. І., Іщенко, В. М., Кроніковський, О. І., Бойко Р.С. (2015). Дослідження вилучення металічних елементів із чорних та зелених чаїв з використанням методів головних компонент та кластерного аналізу чаїв. *Біоресурси і природокористування*, 7, 43—47. file:///C:/Users/User/Downloads/Kanarsky,+08_Ishenko.pdf.

Крониковський, О. І., Іщенко, В. М., Панчук, Т. К. (2014). Екстракційне концентрування та атомно-абсорбційне визначення Плюмбуму у воді в вигляді комплексу $Pb18C6(CCl_3COO)_3$. *Біоресурси і природокористування*, 6(3—4), 52—57. <https://journals.nubip.edu.ua/index.php/Bio/uk/article/view/4410>.

Мельник, Ю. Р., Мельник, С. Р., Магорівська, Г. Я. (2024). Вплив краун-етерів і полігліколітів на показники сталості процесу окиснення циклогексану. *ЖССТ*, 18(3), 379—385. <https://doi.org/10.23939/chcht18.03.379>.

Назаренко, А. Ю., Крониковський, О. І., Сухан, В. В. (1987). Экстракция карбоксилатов свинца в присутствии полиэфиров 18-краун-6 и ПЭГ-1500. *Журнал неорганической химии*, 32(9), 2233—2237.

Сніжко С. І. (2001). *Оцінка та прогнозування якості природних вод*: монографія. Київ: видавництво Ніка-Центр.

Сухан, В. В., Крониковський, О. І., Назаренко, А. Ю. (1988). Аналитическое применение экстракции металлов 18-краун-6 в присутствии трихлорацетат-иона. *Журнал аналитической химии*, XLIV, (11), 1953—1958.

Atanassova, M., Dukov, I. L. (2005). Crown ethers as synergistic agents in the solvent extraction of trivalent lanthanoids with, thenoyltrifluoroacetone. *Separation Science and Technology*, 40, 1103—1113. <https://doi.org/10.1081/SS-200049855>.

Bader, N., Bukhzam, A. (2014). Crown Ethers: Their Complexes and Analytical Applications. *Journal of Applicable Chemistry*, 3 (1), 237—244. https://www.researchgate.net/publication/317398327_Crown_Ethers_Their_Complexes_and_Analytical_Applications.

Bond, A. H., Dietz, M. L., Chiarizia, R. (2000). Incorporating size selectivity into synergistic solvent extraction: A review of crown ether—containing systems. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 39, 3442—3464. <https://doi.org/10.1021/ie000356j>.

Dukov, I. L., Atanassova, M. (2003). Effect of diluents on the synergistic solvent extraction of some lanthanides with thenoyltrifluoroacetone and quaternary ammonium salt. *Hydrometallurgy*, 68, 89—96. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(02\)00171-8](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(02)00171-8).

Gagabe, F. G., Satoh, Y., Satoh, K., Sawada, K. (2006). Crown ethers as synergist in the 2-thenoyltrifluoroacetone extraction of lanthanoids in 1,2-dichloroethane. *Monatshfte fur Chemie, Chemical Monthly*, 137, 1015—1025. <https://doi.org/10.1007/s00706-006-0503-3>.

Heydari, S., Habibi, D., Faraji, A. (2022). A Green and Efficient Solvent- and Catalyst-Free Ultrasonic Dibenzoylation Procedure. *Chem. Chem. Technol.*, 16, 126—132. <https://doi.org/10.23939/chcht16.01.126>.

Hiraoka, M. (1986). *Crown Compounds. Their Characteristics and Applications*. Amsterdam, Oxford, New York: Elsevier Scientific Publishing Company.

Lap, M., Kanbur, Y., Tayfun, Ü. (2021). The Use of Mussel Shell as a Bio-Additive for Poly (Lactic Acid) Based Green Composites. *Chem. Chem. Technol.*, 15, 621—626. <https://doi.org/10.23939/chcht15.04.621>.

Lehn, M., Atwood, J. L., Davies, J. E. D., MacNicol, D. D., & Wogtle, F. (1996). *Comprehensive supramolecular chemistry*. Oxford-New York-Tokyo: Pergamon, 1—11.

Ludyn, A., Reutsky, V., Reutsky, V., Hrynychuk, Y. (2021). Influence of amino acids and alcohols on catalytic oxidation of cyclohexane. *Chem. Chem. Technol.*, 15, 352—358. <https://doi.org/10.23939/chcht15.03.352>.

Melnyk, Yu., Melnyk, S., Mahorivska, H. (2023). The Assessment of Sustainability Indicators for Triglycerides Transesterification with Alcohols Catalyzed by Ion Exchange Resins. *Vopr. khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 4, 58—68. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2023-149-4-58-68>.

Mitra, S., Chakraborty, A. J., Tareq, A. M., Emran, T. B., Nainu, F., Khusro, A., Idris, A. M., Khandaker, M. U., Osman, H., Fahad, A., Alhumaydhi, F. A., Simal-Gandara, J. (2022). Impact of heavy metals on the environment and human health: Novel therapeutic insights to counter the toxicity. *Journal of King Saud University Science*, 34(3), 101865. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.101865>.

Pavithran, R., Varma, R. L., Reddy, M. L. P. (2003). Synergistic solvent extraction of trivalent lanthanoids with mixtures of 1-phenyl-3-methyl-4-pivaloyl-5-pyrazolone and crown ethers. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 21, 797—813. <https://doi.org/10.1081/SEI-120025924>.

Purwaningsih, D. R., Pengsomjit, U., Aly, M., Aly, S., Darwish, I. A., Karuwan, C., Kraiyya, C. (2024). Ultra-sensitive detection of cadmium and lead in water using crown ether gel electromembrane extraction coupled with miniaturized electrochemical system. *Microchemical Journal*, 206. 111449. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.111444>.

Rehman, H., Ali, A., Anwar, J., & Yawar, W. S. (2006). Synergistic extraction of Ce(III), Eu(III) and Tm(III) with a mixture of picrolonic acid and benzo-15-crown-5 in chloroform. *Journal of Radionalytical and Nuclear Chemistry*, 267, 421—425. <https://doi.org/10.1007/s10967-006-0065-1>.

Song, X., Hao, J., Bai, Y., Han, L., Yan, G., Lian, X., Liu, J. (2017). Solvent-free Oxidation of Cyclohexane by Oxygen over Al-Cu-Co Alloys: Influence of the Phase Structure and Electrical Conductivity on Catalytic Activity. *New J. Chem.*, 41, 4031—4039. <https://doi.org/10.1039/c7nj00238f>.

Sung, S. P., Moorthy, M. S., Song, H.-J., Ha, C. S. (2014). Functionalized mesoporous silicas with crown ether moieties for selective adsorption of lithium ions in artificial sea water. *J Nanosci Nanotechnol*, 14(11), 8845—8851. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25958615/>.

Vogtle, F., & Weber, E. (1985). *Host Guest Complex Chemistry Macrocycles. Synthesis, Structures, Applications*. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer-Verlag.

ДО ВІДОМА АВТОРІВ

Шановні колеги!

Редакційна колегія журналу «Наукові праці Національного університету харчових технологій» запрошує вас до публікації наукових праць (<http://sw.nuft.edu.ua>).

До друку приймаються рукописи, які раніше не були опубліковані в друкованих та електронних виданнях. Автор, який подає матеріали до друку, зберігає за собою всі авторські права та надає відповідному виданню право першої публікації, дозволяючи розповсюджувати матеріал із зазначенням авторства й джерела первинної публікації, а також погоджується на розміщення її електронної версії на сайті Національної бібліотеки ім. В. І. Вернадського та у відкритому доступі в електронній мережі університету. Автор надає право редакційній колегії на рецензування та відхилення поданих для опублікування матеріалів. В одному номері може бути видана лише одна стаття автора (як власна, так і в співавторстві).

На електронну адресу журналу (prnuht@nuft.edu.ua) необхідно надіслати такі документи:

- файл статті;
- рецензію доктора наук певної галузі (за тематичною спрямованістю статті). Якщо один із авторів статті є доктором наук, то рецензія не обов'язкова;
- заяву з підписами автора(-ів) про те, що надіслана стаття раніше не друкувалася і не подана до будь-яких інших видань.

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

Статті подаються у вигляді вичитаних роздручків на папері формату А4 (поля з усіх сторін по 2 см, Time New Roman, кегль 14, інтервал 1,5) та електронної версії (редактор Microsoft Word). У тексті статті не повинно бути порожніх рядків. Між словами допускається лише один пробіл. Усі сторінки тексту мають бути пронумеровані.

Обсяг дослідницької статті має бути не менше 10 сторінок (без урахування анотацій та списку використаних джерел). У дослідницькій статті має бути проаналізовано не менше 15 джерел. Обсяг оглядової статті має бути не менше 25 сторінок (без урахування анотацій та списку використаних джерел). В оглядовій статті повинно бути проаналізовано не менше 40 джерел.

ПОСЛІДОВНІСТЬ СТРУКТУРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СТАТТІ

1. Індекс УДК.
2. Назва статті (англійською та українською мовами).
3. Ініціали та прізвища авторів англійською та українською мовами.
4. Анотація англійською та українською мовами (не менше 1800 символів з пробілами).

Анотація має бути максимально інформативною, це окремий текстовий документ, у якому лаконічно викладені результати дослідження. У тексті анотації не варто використовувати загальні фрази, вказувати несуттєві деталі й загальновідомі положення. Також слід уникати прямих повторів будь-яких фрагментів статті.

5. Ключові слова (5—6 слів/ключових словосполучень англійською та українською мовами).
6. Структура текстової частини:

- постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з важливими практичними завданнями;

- аналіз останніх досліджень і публікацій, на які спирається автор;
- формулювання мети статті;
- викладення основних результатів дослідження;
- висновки і перспективи подальших наукових досліджень.

7. Після тексту статті в алфавітному порядку наводиться список літературних джерел.

Бібліографічні описи оформляються згідно з міжнародним стилем APA. Бібліографічний опис подається мовою видання. Не допускається посилання на неопубліковані матеріали. У переліку джерел мають переважати посилання на наукові праці останніх років. Наприкінці кожної публікації наводиться ідентифікатор DOI у форматі <https://doi.org/.....>, якщо він є, або посилання на публікацію. Також слід обмежити посилання на власні публікації, оскільки це знижує наукову цінність статті та індекс цитування автора. Не можна посилатись на національні стандарти, технічні умови, підручники, конспекти лекцій, лабораторні практикуми та іншу ненаукову літературу. Посилання на патенти слід робити в тексті статті, вказавши лише номер та назву патенту.

У статті мають бути проаналізовані напрацювання вчених з усього світу. На основі аналізу сучасних статей з англomовних журналів має бути доведена актуальність теми у світі, визначені питання, які потребують вирішення, сформульована мета дослідження.

9. Таблиці (у Word або Excel) можна подавати як у тексті, так і в окремих файлах (на окремих сторінках). Кожна таблиця повинна мати тематичний заголовок, набраний напівжирним шрифтом, і порядковий номер (без знака №), якщо таблиць кілька. Слово

«Таблиця» і номер друкуються курсивом, заголовок — напівжирним шрифтом. Таблиці повинні мати книжковий формат і вільно вмщатися у висоту і ширину журнальної сторінки.

10. Ілюстрації (креслення, рисунки, схеми, діаграми) мають бути розміщені в тексті. **Обов'язковою вимогою** є надсилання оригінальних файлів рисунків, створених у програмах-редакторах Corel Draw X6, Origin. Всі елементи рисунка (типи, товщина і колір ліній, шрифт текстів тощо) мають вільно редагуватися у наявному програмному забезпеченні). Рисунки в растрових форматах (bmp, gif, jpeg, tif) або у форматі pdf не приймаються до розгляду, оскільки не можуть вільно редагуватися. **Вимоги до оформлення рисунків:** вісь координат — 0,2 мм, без сітки, сам рисунок (наприклад, крива) — 0,35 мм, текст в рисунку — Times New Roman 9,5, ширина рисунка — до 13 см. Всі рисунки мають бути чорно-білими. Підписи до рисунків набираються безпосередньо під рисунками прямим напівжирним шрифтом.

Фотографії мають бути чіткими та контрастними (формати TIF, JPG з роздільною здатністю 300 dpi), розмірами 6×9. Фотографії друкуються в разі крайньої потреби, якщо наведена на них інформація має значну наукову цінність. Авторам краще завантажити фотографії у хмарний сервіс і в списку літератури дати на них посилання.

11. Математичні формули повинні бути роздруковані з правильним виділенням верхніх і нижніх індексів. Нумерація формул здійснюється арабськими цифрами у круглих дужках біля правого поля сторінки. Індеси від скорочених українських слів друкуються прямим шрифтом малими літерами. В індексах, що складаються з двох скорочених слів, після першого скороченого слова ставиться крапка, після другого — крапка не ставиться. Цифри в індексах також друкуються прямим шрифтом. Індеси, позначені латинськими літерами, друкуються курсивом. У формулах літери латинського алфавіту набираються курсивом, грецького й українського — прямим шрифтом.

Хімічні формули набираються прямим шрифтом. Математичні символи, що входять до складу хімічних формул, — курсивом.

Формули вставляються безпосередньо в текст. Прості формули набираються з клавіатури, а складні — за допомогою редактора формул Microsoft Equation 3.0 object або Math Type 5.6. Інші версії редакторів формул є неприйнятними. Символи вставляються тільки через таблицю символів. Скорочення позначень одиниць фізичних величин мають відповідати Міжнародній системі одиниць (SI).

12. Відомості про авторів статті повинні бути наведені за єдиним зразком у вказаному порядку: прізвище (прописними літерами), ім'я та ім'я по батькові (повністю); наукове звання; посада чи професія, місце роботи; телефон, E-mail.

13. Дата надходження статті до редакції (після тексту надрукованого матеріалу).

Використання автоматичного перекладу наукового тексту (статті, анотації, ключових слів) **не допускається**. Переклад має бути належної якості.

Відсутність будь-якого з пунктів переліку, зазначеного вище, рецензії, невідповідність вимогам до оформлення, наявність орфографічних, граматичних, стилістичних помилок, автоматичний переклад елементів матеріалу є підставою для **відмови** в прийнятті статті до друку.

Автор несе відповідальність за додержання вимог чинного законодавства при підготовці матеріалів, у тому числі норм авторського права і достовірність наведених фактичних даних (цитат, посилань, імен, назв тощо).

Адреса редакції:

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

Контактні телефони: міський — (044) 287-92-95, внутрішній — 92-95.

E-mail: npnuht@nuft.edu.ua

SUBMISSION GUIDELINES

Dear colleagues,

The editorial board of the Journal “Scientific works of the National University of Food Technologies” invites you to the publication of your manuscripts (<http://sw.nuft.edu.ua>).

Only the manuscripts that have not previously been published in print and electronic media are accepted. The author who submits materials for publication reserves the copyright and provides the right of first publication to the Journal, allows to distribute the manuscript indicating the authorship and the primary source of publication and agrees to placing the electronic version of the manuscript on the website of the V. I. Vernadsky National Library of Ukraine, publicly available electronic network of the University. The author gives the right to the editorial board to review and reject the material submitted for publication. The author can publish one manuscript (of his/her single authorship or co-authored) per every issue of the Journal.

The following documents are necessary to be sent to the e-mail address of the journal (npnuht@nuft.edu.ua):

- Electronic version of the manuscript;
- A review of the manuscript by a doctorate of the corresponding branch of science. If one of the authors is a doctorate him/herself, then a review is not necessary;
- A statement signed by the author(s) that the manuscript has not been published and is not submitted for publication.

REQUIREMENTS FOR MANUSCRIPTS

The electronic version should be submitted in a Microsoft Word document (margins of 2 cm, Time New Roman, type size 14, spacing 1.5). There should be no blank lines in the manuscript. No extra spaces are allowed between the words. All pages of the manuscript should be numbered.

The number of pages of the research article should be at least 10 (excluding abstracts and references). At least 15 references should be analyzed in the research paper. The length of the review article should be at least 25 pages (excluding abstracts and references). At least 40 references should be analyzed in the review article.

The use of automatic translation for any part of your text (manuscript, abstract, keywords) is not allowed. Translation must be of good quality.

The editors reserve the right to edit the manuscript scientifically and literary.

SEQUENCE OF STRUCTURAL ELEMENTS OF THE MANUSCRIPT

1. UDC index.
2. The title of the manuscript (in English, Ukrainian).
3. Full names of the authors in English, Ukrainian (not more than four authors).
4. An abstract in English, Ukrainian (not less than 1800 characters with spaces). The abstract should be highly informative, it is a separate text document in which the results of the research must be summarized. General phrases, insignificant details and well-known provisions shouldn't be written in the abstract. Direct repetitions of any parts of the article should be also avoided.
5. A list of keywords (5—6 words or key phrases in English, Ukrainian).
6. The structure of the text:
 - Problem definition and its relationship with important practical tasks;
 - Analysis of recent studies and publications related to subject matter of the manuscript;
 - Problem statement (statement of purpose of the manuscript);
 - Presentation of the main material;
 - Conclusions and recommendations for further research.
7. A list of references of their quotation should be presented after the text of the manuscript.

Bibliographic descriptions should be made according to international style APA. Bibliographic descriptions should be submitted in the language of their edition. Links to unpublished materials are not allowed. The list of references should contain links only to recent and relevant studies. At the end of each reference, the DOI identifier is provided in the format <https://doi.org/>, if it is, or a link to the publication. National standards,

specifications, textbooks, lecture notes, laboratory workshops and other non-scientific literature must not be referenced. References to patents should be made in the text of the article, indicating only the number and title of the patent. In the list of references, the sources should be presented in alphabetical order.

The investigations of scientists from all over the world should be analyzed in the article. Based on the analysis of modern articles from English-language journals, the relevance of the topic in the world should be proved, the issues which need to be solved should be identified, and the purpose of the research should be formulated.

8. Tables (in Word and Excel) can be submitted both in the text of the manuscript and in separate files (on separate pages). Each table should have a title, typed in bold, and its serial number if there are several tables. The word "Table" and number are printed in italics; the title is printed in bold. Tables should be in book format and fit freely in the height and width of the journal page.

9. Figures, images and tables should be performed in Corel Draw, Origin on white paper and placed both in the text and in separate files. Captions should be typed in bold directly under the figures. Images must be clear and contrasting (TIF, JPG with a resolution of 300 dpi); the size 6×9. Photos are printed in case of extreme necessity, if they provide information of the significant scientific value.

10. Mathematical formulas should be typed with the correct placing of upper and lower indices. The formulas should be numbered by Arabic numerals in parentheses at the right margin of the page. The indices of Ukrainian abbreviated words should be typed in bold and in lower case. The first word of an index, consisting of two abbreviated words, should be followed by a dot, and the second word has no dot. The numbers in the indexes are typed in upright font. Indexes should be typed in Latin letters and in italics. In formulas, the letters of Latin alphabet are typed in italics; Greek and Ukrainian letters are in upright font.

Chemical formulas should be typed in upright font. Mathematical symbols that make up the chemical formulas should be typed in italics.

Formulas should be put directly into the text. Simple formulas are typed from the keyboard, and complex — using the Microsoft Equation 3.0 object or MathType 5.6. Other equation editors are unacceptable. The characters are inserted only through the symbol table. The contraction of physical units must comply with the rules of the International System of Units (SI).

11. Information about the authors should be given as follows: second name (in uppercase letters), first name and patronymic (in full); academic title; position or profession, place of work; phone number, E-mail.

12. The date when the manuscript was received by the editorial board.

The use of **automatic translation** for any part of your text (manuscript, abstract, keywords) **is not allowed**. Translation must be of good quality.

The absence of any item listed above; absence of abstracts; non-compliance to the design requirements; spelling, grammatical, stylistic errors; automatic translation of any part of the manuscript are the grounds **for refusal** to accept the manuscript for publication.

The author is fully responsible for compliance with current legislation, including the rules of copyright and the consistency of data (quotations, references, names, etc.).

Editorial office address:

National University of Food Technologies
Volodymyrska str., 68,
building Б, room 412, 01601 Kyiv, Ukraine
E-mail: npnuht@nuft.edu.ua