



2025

НАУКОВІ ПРАЦІ

НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Том 31 № 1

*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. 8 from 27th of February, 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 № 8 від 27 лютого 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

канд. техн. наук, доц., Україна

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

Члени редакційної колегії:

Агота Гедре Райшене

Agota Giedre Raisiene

д-р екон. наук, Литва

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

Андрій Маринін

Andrii Marynin

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

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

Валерій Мирончук

Valerii Myronchuk

д-р техн. наук, проф., Україна

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

Василь Кишенько

Vasyl Kyshenko

канд. техн. наук, доц., Україна

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

Василь Пасічний

Vasyl Pasichnyi

д-р техн. наук, проф., Україна

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

В'ячеслав Івашук

Vyacheslav Ivaschuk

д-р техн. наук, проф., Україна

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

Віктор Стабніков

Viktor Stabnikov

д-р техн. наук, проф., Україна

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

Володимир Зав'ялов

Volodymyr Zavialov

д-р техн. наук, проф., Україна

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

Галина Поліщук

Halyna Polishchuk

д-р техн. наук, проф., Україна

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

Герхард Шльонінг

Gerhard Schleining

д-р техн. наук, Австрія

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

Дайва Лескаускайте

Daiva Leskauskaite

д-р техн. наук, проф., Литва

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

Кристина Сильва

Cristina L. M. Silva

д-р техн. наук, проф., Португалія

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

Лада Шірінян

Lada Shirinyan

д-р екон. наук, проф., Україна

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

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

Автоматизація та інформаційні технології

Залозний Р. В., Заєць Н. А. Використання методів навчання з підкріпленням у системі керування аквапонікою

7 Zalozny R., Zaets N. Using reinforcement learning methods in an aquaponic control system

Біотехнології

Шопінський В. В., Буценко Л. М. Біотехнологічний потенціал ендوفітних мікроорганізмів у підвищенні стійкості рослин до абіотичних стресів

21 Shopinskiy V., Butsenko L. Biotechnological potential of endophytic microorganisms in enhancing plant resistance to abiotic stresses

Шопова З. С., Поліщук В. Ю., Дуган О. М. Теоретичний аналіз створення надпродуцентів рибіфлавіну шляхом регуляції активності ізоцитратлази в аскоміцетів роду *Eremothecium*

37 Shopova Z., Polishchuk V., Dugan O. Theoretical analysis of the creation of riboflavin overproducers through regulation of isocitrate lyase activity in ascomycetes of the genus *Eremothecium*

Економіка, менеджмент і маркетинг

Сімкін Д. О., Петухова О. М. Аутсорсинг як інструмент підвищення ефективності діяльності підприємств харчової промисловості

57 Simkin D., Pietukhova O. Outsourcing as a tool for enhancing efficiency in the food industry enterprises

Механічна та електрична інженерія

Тептя В. В., Остра Н. В., Малогулько Ю. В., Сікорська О. В., Повстянко К. О. Інноваційні підходи до забезпечення стабільного електропостачання і запобігання відключенням: український досвід

70 Teptya V., Ostra N., Malohulko Yu., Sikorska O., Povstyanko K. Innovative approaches to ensuring stable electricity supply and prevent power outages: ukrainian experience

Авдєєва Л. Ю., Макаренко А. А. Сучасні методи виробництва сушеного м'яса і м'ясних продуктів

87 Avdieieva L., Makarenko A. Modern approaches to the production of dried meat and meat products

Балиута С. М., Копилова Л. О., Сінюков Д. В., Жуков М. Ю., Кондрашевський М. С. Адаптивне регулювання напруги в системах електрозабезпечення із розосередженою генерацією

107 Baliuta S., Kopylova L., Sinyukov D., Zhukov M., Kondrashevsky M. Adaptive voltage regulation in power supply systems with distributed generation

Володін С. О., Мирончук В. Г., Васильківський К. В., Запорожець О. В. Інженерний аналіз та оптимізація систем керування позиційними приводами в запірно-регулювальних системах продуктопроводів

120 Volodin S., Myronchuk V., Vasyukivskyi K., Zaporozhets O. Engineering analysis and optimization of positioning actuator control systems in locking and regulating systems of product pipes

Погорілий Т. М. Моделювання оптимальних параметрів роботи горизонтальної центрифуги для отримання крохмалю типу «А»

131 Pohorilyi T. Optimal parameters simulation of the horizontal centrifuge for receiving type "A" starch

Харчові технології

Сімахіна Г. О., Науменко Н. В. Нові можливості оздоровчого харчування з позицій нутригенетики та нутригеноміки

Food Technologies

145 Simakhina G., Naumenko N. The novelty opportunities of healthy nutrition in terms of nutrigenetics and nutrigenomics

<i>Батраченко О. В.</i> Дослідження властивостей нових інноваційних напівфабрикатів у тістовій оболонці	157	<i>Batrachenko O.</i> Research of the properties of the innovative semi-finished products in a dough shell
<i>Ощипок І. М.</i> Ефективна стратегія розвитку птахопереробних підприємств	168	<i>Oshchypok I.</i> Effective strategy for the development of poultry processing enterprises
<i>Потапчук І. М., Гусятинська Н. А.</i> Використання коагулянтів і завантаження АФМ для попереднього очищення води з поверхневих джерел для потреб теплосилових установок харчових підприємств	185	<i>Potapchuk I., Husiatynska N.</i> Use of coagulants and AFM loading for pre-treatment of water from surface sources for the needs of thermal power plants of food enterprises
<i>Загорулко А. М., Загорулко О. Є.</i> Удосконалення способу виробництва полікомпонентного напівфабрикату високого ступеня готовності	197	<i>Zahorulko A., Zagorulko A.</i> Improvement of the manufacturing method of a high degree of readiness semi-finished polycomponent product
<i>Сидоренко В. О., Бабич І. М., Куц А. М.</i> Наукові підходи до вибору нових сортів винограду Закарпаття для приготування ігристих вин	208	<i>Sydorenko V., Babych I., Kuts A.</i> Scientific approaches to the selection of new grape varieties of transcarpatia for the preparation of sparkling wines
<i>Якименко А. В., Мельник Л. М., Бессараб О. С.</i> Вплив кисню та аргону на адсорбційно-каталітичні процеси, що відбуваються при очищенні сортівок активним вугіллям і природними адсорбентами	216	<i>Yakimenko A., Melnyk L., Bessarab O.</i> Oxygen and argon impact on adsorption and catalytic processes occurring during purification of sortivka by active carbon and natural adsorbents

УДК 664.6:681.5

USING REINFORCEMENT LEARNING METHODS IN AN AQUAPONIC CONTROL SYSTEM

R. Zalozny

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

N. Zaets

National University of Food Technologies

Key words:

*Aquaponics
Control system
Reinforcement learning
Modeling
DQN agent*

Article history:

Received 10.01.2025
Received in revised form
27.01.2025
Accepted 11.02.2025

Corresponding author:

R. Zalozny
E-mail:
blackblackgreygrey@gmail.
com

Citation: Залозний Р. В.,
Заєць Н. А. (2025). Використання методів навчання з підкріпленням у системі керування аквапонією. *Наукові праці НУХТ*, 31(1), 7—20.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-1-3

ABSTRACT

The distribution of control tasks in an aquaponic system was analyzed and a three-level aquaponic control system that combines automatic, automated and manual processes to ensure its efficient and adaptive operation was presented in the article. The use of Reinforcement learning (RL) methods to automate harvesting and other procedures in aquaponic systems at the second management level was investigated. Using the mathematical possibility of aquaponics, the structure of the control system was created, which made it possible to analyze the effectiveness of using reinforcement learning methods in an automated control system. To train the RL agent with neural networks, a model of the medium built on physical equations was used. This approach allowed generating a large amount of data for training, simulating different conditions and scenarios, which is impossible to do on a real object due to limited time and resources. Training of RL agents was carried out in two stages to ensure effective exploration of the medium and further optimization of the policy.

RL methods have shown significant benefits, such as increased process efficiency, reduced need for manual intervention, and optimization of the control of complex systems. The proposed two-stage approach, including exploration of the medium and optimization of actions, ensured the stability and accuracy of the RL agent in real conditions. Using a DQN agent with recurrent networks made it possible to take into account time dependencies and long-term effects, although the implementation of this method requires significant computing resources and experience in deep learning.

Training on simulations made it possible to avoid the risks of experiments in real conditions and accelerated the development process. The obtained results confirmed the effectiveness of RL methods for creating intelligent control systems that maintain optimal conditions for plants and fish in aquaponic systems.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-1-3

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ НАВЧАННЯ З ПІДКРІПЛЕННЯМ У СИСТЕМІ КЕРУВАННЯ АКВАПОНІКОЮ

Р. В. Залозний

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Н. А. Засць

Національний університет харчових технологій

У статті проведений аналіз розподілу задач керування в аквапонній системі та представлено трирівневу систему управління аквапонними системами, яка поєднує автоматичні, автоматизовані та ручні процеси для забезпечення її ефективної й адаптивної роботи. Досліджено використання методів Reinforcement Learning (RL) для автоматизації збору врожаю та інших процедур в аквапонічних системах на другому управлінському рівні. Використано математичну модель аквапоніки, на основі якої створено структуру системи керування, що дало змогу проводити аналіз ефективності використання методів навчання з підкріпленням в автоматизованій системі керування.

Для навчання RL-агента з нейронними мережами застосовано модель середовища, побудовану на фізичних рівняннях. Такий підхід дав змогу генерувати велику кількість даних для навчання, симулюючи різні умови та сценарії, що неможливо зробити на реальному об'єкті через обмеженість часу та ресурсів. Навчання RL-агентів проводилося у два етапи, щоб забезпечити ефективне дослідження середовища та подальшу оптимізацію політики.

RL-методи показали значні переваги, такі як підвищення ефективності процесів, зниження потреби в ручному втручанні, а також оптимізацію управління складними системами. Запропонований двоетапний підхід, що включає вивчення середовища та оптимізацію дій, забезпечив стабільність і точність роботи RL-агента в реальних умовах. Використання DQN-агента з рекурентними мережами надає можливість врахувати часові залежності та довготривалі ефекти, хоча впровадження цього методу потребує значних обчислювальних ресурсів і досвіду в глибокому навчанні.

Навчання на симуляціях дало змогу уникнути ризиків експериментів у реальних умовах і прискорило процес розробки. Отримані результати підтвердили ефективність RL-методів для створення інтелектуальних систем управління, здатних підтримувати оптимальні умови для рослин і риби в аквапонічних системах.

Ключові слова: аквапоніка, система керування, навчання з підкріпленням, моделювання, DQN-агент.

Постановка проблеми. Аквапоніка — це нова високотехнологічна сільськогосподарська технологія, яка поєднує в собі як вирощування рослинної продукції, так і виробництво рибної продукції. Основною метою методу є органічне виробництво м'ясної та рослинної продукції для їжі людей.

В основі виробництва — використання природних процесів життєдіяльності прісноводних тварин (риб, креветок) як живильного середовища для рослин про-

мислового виробництва. У ході процесу рослини споживають необхідні їм продукти виділень живих організмів — хімічні речовини (азотисті, калійні, фосфорні сполуки, вуглекислий газ тощо), розчинені у воді, і, при цьому, природним шляхом очищають і збагачують її киснем (Smith, Lopez, Patel, & Zhang, 2023).

У процесі виробництва зникає потреба у використанні різних хімічних добрив, зі складною системою їх дозування та зберігання: процес хімізації, переробки та очищення відбувається природним шляхом та у замкнутому циклі.

Виробництво їжі залежить від наявності ресурсів, таких як земля, прісна вода, викопна енергія та поживні речовини (Bradley, Lane, & Woodbury, 2018; Conijn, Bindraban, Schröder, & Jongschaap, 2018; Pedersen, 2018), а поточне споживання або деградація цих ресурсів перевищує їх глобальну швидкість (Van Vuuren, Smith, & Riahi, 2010). Концепція планетних кордонів має на меті визначення межі навколишнього середовища, де людство може безпечно діяти в умовах дефіциту ресурсів (Rockström та ін., 2009; Залозний, & Заєць, 2024).

Традиційні одноконтурні системи аквапоніки включають як аквакультуру, так і гідропоніку, між якими відбувається рециркуляція води (Taylor, Kumar, Choi, & Becker, 2023). У традиційних системах автоматизації при керуванні не враховується взаємозв'язок технологічних параметрів обох підсистем, таких як pH, температура та концентрація поживних речовин тощо. Однак роз'єднання контурів системою керування аквапоніки для аквакультури та гідропоніки може зменшити потребу в компромісах шляхом розділення компонентів, забезпечуючи таким чином у кожній підсистемі оптимізацію технологічних умов (Nguyen, Wilson, Lee, & Harrison, 2023).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Глобальні екологічні, соціальні та економічні виклики вимагають інновацій у виробництві їжі, зокрема в контексті сталого розвитку. Контрольоване сільське господарство, зокрема аквапоніка, що поєднує рециркуляційні системи аквакультури та гідропоніку, пропонує потенційне рішення для проблем, пов'язаних зі зміною клімату, втратою родючості ґрунту та дефіцитом ресурсів (Immacolata, Pontrandolfi, & Manelli, 2016; Junge, König, Villarroel, Komives, & Jijakli, 2017).

Загалом, дослідники зосереджують увагу на ключових біохімічних процесах у воді. Оскільки побічним продуктом життєдіяльності риби є аміак (NH_3), що є токсичним для риби, у біофільтрі здійснюється процес нітрифікації, у якому NH_3 перетворюється на NO_2 та NO_3 , що є поживою для рослин (Chen, Al-Habsi, Brown, & Green, 2023; Garcia, Wang, Roberts, & Singh, 2023).

У системах аквапоніки, де важливими є взаємодії між водним середовищем, рослинами та рибою, моніторинг і контроль основних параметрів води є надзвичайно важливими для забезпечення стабільної та продуктивної роботи системи (Kotzen, & Appelbaum, 2010; Залозний, & Заєць, 2024). Оскільки біофільтр виконує важливу роль у перетворенні токсичних сполук (аміаку) в менш токсичні форми (нітрати), важливо налаштувати параметри води так, щоб це забезпечувало оптимальні умови для росту рослин і здоров'я риби (Karimanzira, & Rauschenbach, 2021).

У (Goddek, Joyce, Kotzen, & Burnell, 2020) детально розглянуто основні параметри аквапоніки, зокрема впливи та взаємозв'язки, що формуються в умовах симбіозу аквакультури, нітрифікуючих бактерій і рослин. Дослідження спрямоване на вирішення проблем і моделювання процесів у замкнутих системах (Lastiri, 2021; Verma, Chandrakant, John, Peter, & John, 2023). Здійснено моделювання з

інтеграцією RAS для тилляпії та NFT для томатів. Риба забезпечує 26% потреб рослин в азоті. Керування параметрами води зменшує коливання нітратів на 35%, сприяючи ефективності системи. Було виявлено дисбаланс (TSS для риби, натрій, кальцій, магній, амоній — для рослин) і розроблено стратегію управління, щоб запобігти дисбалансу, зменшити потребу в добривах і підвищити ефективність води. Запропоновано алгоритм калібрування математичної моделі на основі множини приналежності та мозаїки Вороного, ефективний для обмеженого аналізу даних, оцінки упереджень через (гіпер)сфери. Модель пояснила 84% мінливості росту риби та 75% засвоюваності.

У контексті параметрів води для аквапонічної системи основними факторами, які визначають ефективність цієї системи, є pH, аміак (NH_3), нітрит (NO_2), нітрат (NO_3), кисень і температура води. Ці параметри критично важливі для здоров'я як рослин, так і риби, а також для функціонування біофільтра, який є ключовим елементом аквапоніки (Hager, Bright, Tidwell, & Duscì, 2021). Важливість розгляду питання математичного моделювання систем аквапоніки, в тому числі моделі акваріума як невід'ємної частини загальної системи, полягає в можливості подальшої реалізації змодельованих систем.

Важливо також звернути увагу на перспективи аквапонічних систем у галузі фармацевтики. Лікарські рослини є ключовим ресурсом для виробництва фармацевтичних препаратів, але надмірний збір з природних запасів без належного відновлення загрожує зникненням багатьох видів. Отже, розвиток і поширення знань у сфері підвищення ефективності аквапонічних систем стимулюватиме їх подальший розвиток.

Мета дослідження: розробка та використання методів навчання з підкріпленням для керування аквапонікою в реальному часі та перевірка їх ефективності, що дасть змогу досягти максимальної ефективності та стійкості аквапонічної системи шляхом оптимізації її процесів, підвищення продуктивності та забезпечення екологічності

Матеріали і методи. Керування аквапонічною системою включає в себе кілька ключових аспектів, таких як моніторинг і регулювання параметрів води, рівнів поживних речовин, а також контролю за умовами для рослин і риби. Це може включати як автоматичне, так і ручне управління залежно від технології та обладнання.

Не всі з названих процесів підлягають автоматизації та, як правило, замінюються ручним управлінням:

- коригування складу добрив. Хоча можна автоматизувати основні процеси моніторингу поживних речовин, іноді доводиться вручну додавати або коригувати склади добрив у разі серйозних змін у потребах рослин або риби;

- виявлення та усунення проблем з рибою, що виконується шляхом спостереження за станом риби та потребує людського втручання, особливо у разі хвороб або аномальних поведінкових реакцій. Це важливо для корекції умов середовища або лікування риби;

- збір врожаю та риби, висадка рослин і заселення акваріуму рибою неможливо автоматизувати без спеціального робота чи механізму. Це також включає обробку та догляд за рослинами;

- визначення стану й обслуговування технологічної апаратури та технічних засобів. Хоча більшість систем фільтрації може бути автоматизована, періодична

перевірка та очищення фільтра, особливо у випадку забруднення або засмічення, може вимагати втручання людини.

У сучасних аквапонічних системах для віддаленого моніторингу та керування часто використовуються системи Інтернету речей (IoT). Це дає змогу користувачу отримувати дані про температуру, pH, рівень кисню, вологість, світло тощо через мобільні додатки або комп'ютери. Автоматичні системи можуть бути інтегровані в таку мережу для оптимізації та забезпечення ефективної роботи системи без потреби постійного контролю.

Отже, в аквапонічній системі більшість параметрів, таких як циркуляція води, температура, pH та рівень кисню, можна автоматизувати, в той час як догляд за рослинами та рибою, коригування поживних речовин та деякі аспекти фільтрації все ще потребують людського втручання. З огляду на це, запропоновано трирівневу систему управління аквапонічною системою (рис. 1), що поєднає автоматичні, автоматизовані та ручні процеси для забезпечення ефективної та адаптивної роботи системи.

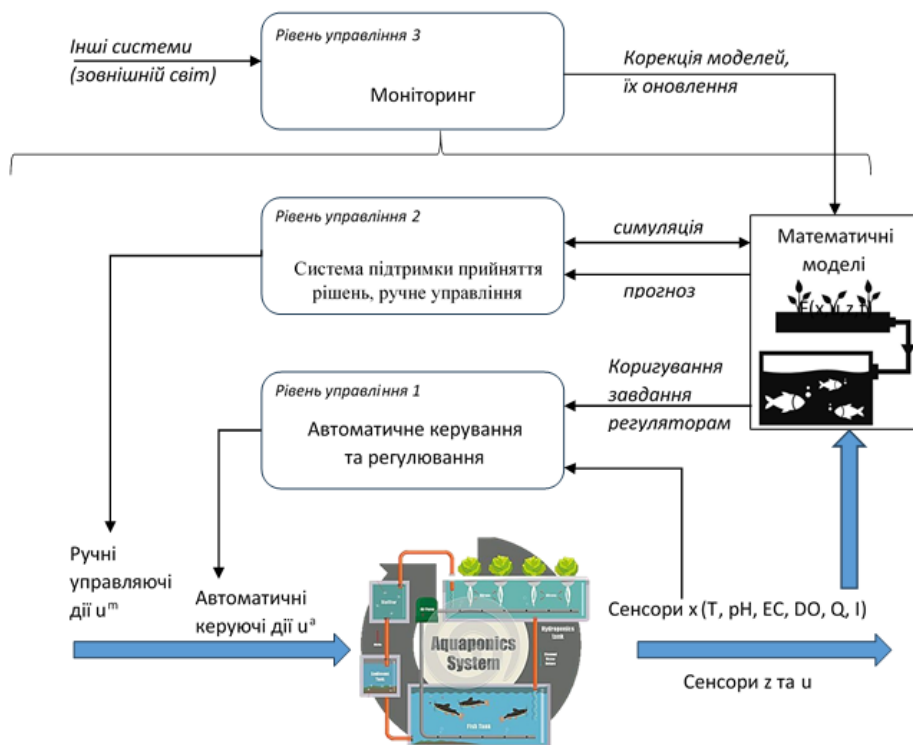


Рис. 1. Структура системи керування аквапонікою

Перший рівень — автоматичне управління: на цьому рівні реалізовані всі основні функції, що потребують регулярного моніторингу та коригування без втручання людини (регулювання циркуляції води — автоматичне коригування потоку води через систему, що забезпечує належну аерацію та фільтрацію, залежно від потреб риби та рослин; регулювання температури води: використання термостатів і

систем нагріву/охолодження для підтримки оптимальної температури води; моніторинг рівня кисню — автоматична активація або деактивація аераторів для забезпечення достатнього рівня розчиненого кисню в воді; управління освітленням — автоматичне включення та вимикання штучного освітлення в залежності від часу доби або потреб рослин; регулювання потоку води через біофільтр — автоматичне коригування потоку води для підтримки оптимальної площі поверхні біофільтра та ефективності фільтрації.

Другий рівень — система підтримки прийняття рішень, ручне управління. Цей рівень забезпечує можливість втручання оператора у разі необхідності, зокрема для коригування складу добрив, очищення біофільтрів, моніторингу стану риби та рослин, збору врожаю, підбору і налаштування фільтраційного матеріалу, регулювання рівня рН і хімічних показників. Розробка і впровадження методів навчання з підкріпленням на цьому рівні дасть змогу прогнозувати поведінку системи.

Третій рівень — моніторинг параметрів в аквапонічній системі, що дає змогу здійснювати необхідні коригування системи в реальному часі та вчасно отримувати дані про ключові параметри системи.

Для забезпечення ефективної роботи системи управління в аквапонічній системі пропонується інтеграція із сучасними технологіями Інтернету речей (IoT), що дає змогу здійснювати віддалений моніторинг і контроль параметрів через мобільні додатки або комп'ютери. Оператор може вчасно отримувати дані про ключові параметри системи, а також здійснювати необхідні коригування в реальному часі.

Запропонована тривірнева система управління дасть змогу забезпечити баланс між автоматизацією і гнучкістю для забезпечення високої продуктивності аквапонічної системи. Для оптимізації забезпечення адаптивного керування, яке враховує динамічні зміни умов у реальному часі, знижує потребу в ручному втручанні та мінімізує ризики, пов'язані з людським фактором на другому рівні системи управління, необхідно розробити методи навчання з підкріпленням Reinforcement Learning (RL).

Результати і обговорення. Для аналізу ефективності використання методів навчання з підкріпленням в автоматизованій системі керування аквапонічною системою спочатку була створена її математична модель:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dQDO}{dt} = k_{oxygen_air} \times (8 - QDO) - k_{respiration_fish} - k_{respration_plants} + k_{oxygen_aerator} \\ \frac{dpH}{dt} = k_{phrespiration} + k_{phplants} + k_{pHEC} \times EC \\ \frac{dT_w}{dt} = k_{temp_heater} \times Ua + k_{temp_air} \times (Ta - Tw) \\ \frac{dLevel}{dt} = Qw - evapor_rate \\ EC = k_{ECTIN} \times [TIN] + k_{ECTIP} \times [TIP] \end{array} \right. \quad (1)$$

де k_{oxygen_air} — коефіцієнт обміну кисню між повітрям і водою, г/л/день; $k_{respiration_fish}$ — коефіцієнт споживання кисню рибою, г/л/день; $k_{respiration_plants}$ — коефіцієнт споживання кисню рослинами; г/л/день; $k_{oxygen_aerator}$ — кисень від аерації, г/л/день; k_{temp_heater} — підвищення температури нагрівачем, °C/Вт; k_{temp_air} — вплив температури повітря на воду, °C/°C; $k_{ph_respiration}$ — вплив дихання риби на рН, од рН/день/г; k_{ph_plants} — вплив рослин на рН, од рН/день/г; $evapor_rate$ — швидкість випаровуван-

ня води; k_{pHEC} — вплив рН на електропровідність; k_{ECTIN} — коефіцієнт впливу концентрації TIN на електропровідність, мСм/см на г/л; $8 - QDO$ — різниця між максимальною концентрацією кисню у воді та поточною концентрацією, мг/л; EC — електропровідність води, мСм/см; Tw — поточна температура води, °C; Qw — витрата води через насос (г/л/день).

Наведені параметри спочатку бралися з літератури для конкретних умов (температура води, об'єм води, рівень аерації тощо) або таблиць, а потім уточнювалися на експериментальній установці. Наприклад, коефіцієнт обміну кисню між повітрям і водою k_{oxygen_air} визначається, зокрема, швидкістю дифузії кисню з повітря у воду. Для аквапонних систем з малими потужностями аерації це значення може бути в межах 0,01—0,1 г/л/день. Було взято $k_{oxygen_air} = 0,03$ г/л/день. Далі проводився експеримент, протягом якого було виміряно середню концентрацію кисню у воді до і після аерації за певний час. Залежно від інтенсивності аерації цей коефіцієнт був уточнений. Змінні для управління наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Змінні для управління

Змінна	Одиниці	Типове значення	Примітка
<i>Риба</i>			
Початкова популяція риби FP0	шт.	10—50	Рекомендація
Додавання риби FPs	шт./день	+(0—5)/день	Рекомендація
Збір риби collect_fish	День збору	Сигнал 0 або 1 (цикл 120—200 днів)	Рекомендація. Збір риби пов'язаний з чисткою акваріуму
<i>Рослини</i>			
Кількість пучків	шт.	1—50	Рекомендація
Збір рослин collect_plant	День збору	Сигнал 0 або 1 (цикл 20—40 днів)	Рекомендація
Доданий додатковий азот (добриво) N_add	г/л	0	Рекомендація для росту рослин
<i>Біофільтр</i>			
Площа біофільтра Abio	см²	10—100	Рекомендація
Моніторинг та ручне управління			
pHmin, pHmax	—	6,0, 7,5	Ручне управління рН. Якщо pH<pHmin: додати луг. Якщо pH>pHmax: додати кислоту
ECmin, ECmax	мСм/см	1,2, 2,5	Ручне управління рН електропровідності. Якщо EC<ECmin: додати добрива. Якщо EC>ECmax: зменшити добрива або змінити воду

Використання методів Reinforcement Learning (RL) для управління збором врожаю та іншими ручними процедурами на другому управлінському рівні аквапонічної системи має кілька значних переваг. RL-методи можуть значно підвищити ефективність і точність процесу збору врожаю, можливість переведення з ручного на напівавтоматичний режим, а також підвищення якості керування, що дає змогу досягати оптимальних результатів при мінімальному людському втручанні. Завдяки можливості навчання на основі досвіду RL-системи самостійно знаходять оптимальні стратегії керування, реагуючи на зміни в реальному часі. Це робить RL ідеальним для автоматизації систем аквапоніки, оптимізації її процесів та розв'язання задач керування, де традиційні методи є малоефективні або обмежені.

Для аквапонічної системи з підсистемами (рослини, риба, біофільтр) та використанням підходу навчанням з підкріпленням винагорода (reward) має враховувати досягнення таких цілей, як максимізація врожайності рослин, здоров'я риби, ефективність біофільтра та стабільність параметрів системи. Було запропоновано кілька варіантів критеріїв винагороди:

1. Максимізація продуктивності системи, мета: баланс між продуктивністю (маса рослин і риб) та стабільністю водних параметрів:

$$reward = \alpha W_{plants} + \beta W_{fish} - \gamma |EC - EC_{opt}| - \delta |pH - pH_{opt}|, \quad (2)$$

де W_{plants} — загальна маса рослин, г; W_{fish} — загальна маса риби, г; EC — електропровідність, мСм/см; EC_{opt} — оптимальне значення; pH — рівень pH, pH_{opt} — оптимальний діапазон (6,0—7,5); $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ — вагові коефіцієнти для кожного параметра.

2. Мінімізація витрат і відходів, мета: зменшити витрати добрив, кисню та ресурси системи, одночасно підтримуючи врожайність:

$$reward = -\lambda_1 N_{add} - \lambda_2 TIP - \lambda_3 Q_{DO} + \theta Harvest, \quad (3)$$

де N_{add} — кількість доданого азоту, г/л; TIP — неорганічний фосфор, г/л; Q_{DO} — споживання кисню, л/год; $Harvest$ — кількість зібраного врожаю рослин/риби; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \theta$ — вагові коефіцієнти.

3. Стабільність екосистеми, мета: утримання стабільних умов у системі, що забезпечує довгострокову продуктивність:

$$reward = -\mu_1 |pH - pH_{opt}| - \mu_2 |EC - EC_{opt}| - \mu_3 Deviation(TIN, TIP, Q_{DO}), \quad (4)$$

де $Deviation(TIN, TIP, Q_{DO})$ — відхилення від допустимих діапазонів для азоту, фосфору, кисню; μ_1, μ_2, μ_3 — вагові коефіцієнти.

4. Комплексний підхід (поєднання критеріїв), мета: максимізація продуктивності за мінімізації витрат та підтримання стабільності параметрів:

$$reward = \alpha Productivity - \beta Cost - \gamma Instability, \quad (5)$$

де $Productivity = W_{plants} + W_{fish}$; $Cost = N_{add} + TIP + Q_{DO}$; $Instability = |pH - pH_{opt}| + |EC - EC_{opt}| + Deviation(TIN, TIP, Q_{DO})$; α, β, γ — вагові коефіцієнти для кожної складової.

Отже, якщо мета — врожайність, то рекомендується використовувати формулу (2). Якщо мета — оптимізація ресурсів, то формулу (3). Для довгострокової стабільності системи рекомендується формула (4), а для балансу всіх факторів — формула (5).

У табл. 2 наведені діапазони для стандартної аквапонічної системи (180 л). Відмітимо, що значення в межах діапазону додають до винагороду, а значення за межами діапазону враховуються як нестабільність (Instability).

Таблиця 2. Оптимальні значення параметрів аквапонічної системи

Параметр	Оптимальний діапазон	Одиниця вимірювання	Коментарі
pH	6,0—7,5	Од. pH	Оптимальний діапазон для рослин і риби
EC	1,2—2,5	мСм/см	Відображає концентрацію розчинених солей, важливо для рослин
TIN	20—50	мг/л	Загальний неорганічний азот, зумовлений кормом і біофільтром
TIP	0,5—2,0	мг/л	Загальний неорганічний фосфор. Надлишок може бути шкідливим для риби
Wplants	> 500	г	Середня маса врожаю рослин (наприклад, за цикл 30 днів)
Wfish	> 1000	г	Середня маса риби (наприклад, за цикл 120—200 днів)
Nadd	1—5	мг/л	Доданий азот у вигляді добрив для підтримки росту рослин
QDO	6—8	мг/л	Рівень розчиненого кисню у воді, критично важливий для здоров'я риб

Використання RL-агента для управління аквапонічною системою, зокрема для визначення часу висадки та збору рослин, заселення риби та вибору площі біофільтра, ґрунтується на інтеграції моделі середовища та навченого агента. Модель середовища, побудована на основі фізичних рівнянь (1), симулює динаміку системи, включаючи зміни рівня pH, температури, концентрації аміаку, нітритів, нітратів, ріст рослин в стан риби. Навчений RL-агент приймає рішення на основі поточного стану системи та прогнозів майбутніх станів, отримуючи винагороду за ефективні дії, такі як підтримання оптимального рівня поживних речовин або здоров'я риби.

Основна ідея полягає в тому, що агент використовує модель середовища для прогнозування майбутніх станів, наприклад, рівня аміаку чи нітратів, і на цій основі визначає оптимальний час висадки чи збору рослин, кількість риби для заселення або площу біофільтра. Якщо модель прогнозує високий рівень нітратів через тиждень, агент може вирішити висадити рослини, щоб поглинути зайві поживні речовини. Аналогічно, якщо прогнозується збільшення аміаку, агент може збільшити площу біофільтра для його нейтралізації. Цей підхід дає змогу створювати адаптивну систему, яка ефективно підтримує оптимальні умови для рослин і риби, враховуючи динаміку середовища.

Для RL-системи було обрано DQN-агент з послідовними та рекурентними нейронними мережами з одним або двома прихованими шарами (рис. 2). На рис. 3—6 наведені результати моделювання RL-системи з DQN-агентом. Кількість параметрів мережі критика Number of learnables: 34.2 M.

Використання моделі середовища, побудованої на фізичних рівняннях, для навчання RL-агента з нейронними мережами є коректним і ефективним підходом.

Цей метод дає змогу генерувати велику кількість даних для навчання, симулюючи різні умови та сценарії, що неможливо зробити на реальному об'єкті через обмеженість часу та ресурсів. Оскільки фізична модель точно відтворює динаміку системи, агент може навчитися приймати оптимальні рішення в широкому діапазоні умов, що робить його більш універсальним і готовим до роботи в реальному середовищі.

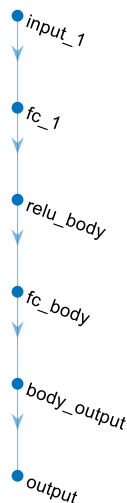


Рис. 2. Структура нейронної мережі DQN-критика (візуалізація Matlab, рекурентна мережа)

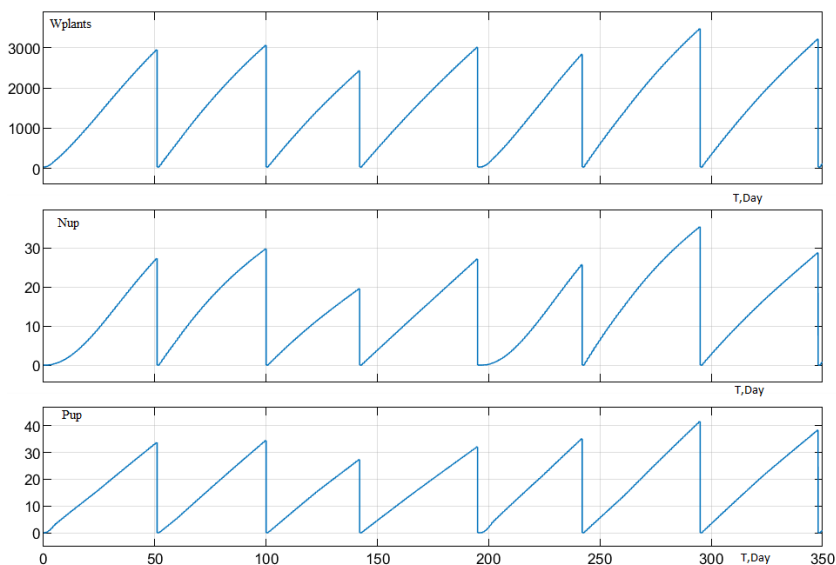


Рис. 3. Результати моделювання стану рослини

Для RL-агентів навчання проводилося у два етапи, щоб забезпечити ефективне дослідження середовища та подальшу оптимізацію політики. На першому етапі

агент навчався за критерієм кількості епізодів, що дало йому змогу дослідити різні стратегії взаємодії з середовищем. Цей підхід забезпечив широке дослідження, уникнення локальних оптимумів і накопичення достатнього досвіду для подальшого вдосконалення.

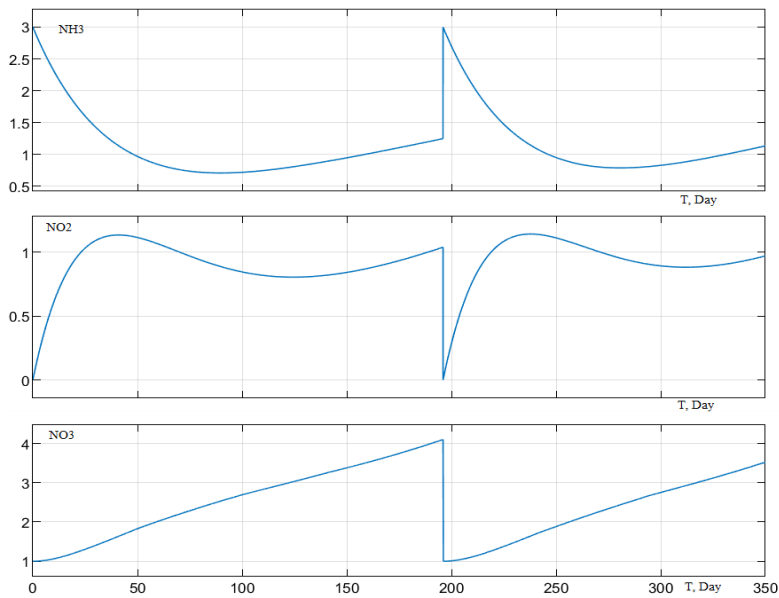


Рис. 4. Результати моделювання стану біофільтра

Після завершення першого етапу агент донавчався за критерієм середнього значення винагороди. На цьому етапі основним завданням була максимізація ефективності агента, зосередившись на стабільному підвищенні середньої винагороди. Навчання тривало до тих пір, поки середня винагорода за останні епізоди не досягала заданого порогу, що забезпечило більш точну та надійну політику.

Такий двоетапний підхід дає змогу поєднати широке дослідження середовища на початковому етапі з подальшою оптимізацією, що є особливо важливим для таких складних систем, як аквапоніка. На першому етапі агент вивчав різні сценарії висадки рослин, заселення риби та регулювання площі біофільтра, тоді як на другому етапі він оптимізував свої дії для досягнення максимальної ефективності. Цей підхід забезпечив не лише стабільність навчання, але й готовність агента до роботи в реальних умовах, де важливо враховувати як досвід, так і точність прийняття рішень.

DQN-агент з рекурентними мережами є потужним інструментом для складних задач, де необхідно враховувати часові залежності та довготривалі ефекти дій. Однак велика кількість параметрів робить його вимогливим до обчислювальних ресурсів, що може значно збільшити вартість впровадження. Навчання такого агента досить повільне, але після навчання він може бути досить швидким за умови використання оптимізованих бібліотек. Реалізація та налаштування DQN з рекурентними мережами вимагають досвіду у роботі з глибоким навчанням та RL, що мо-

же бути складним без відповідного досвіду. Тому цей агент рекомендується використовувати у випадках, коли задача вимагає високої точності та врахування складних залежностей, а ресурси для його навчання та впровадження є доступними.

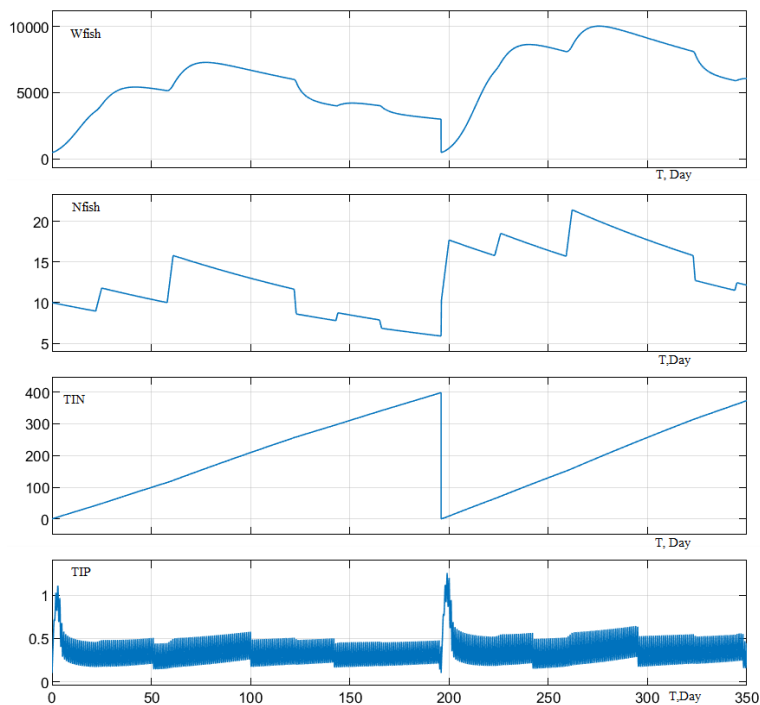


Рис. 5. Результати моделювання стану риби

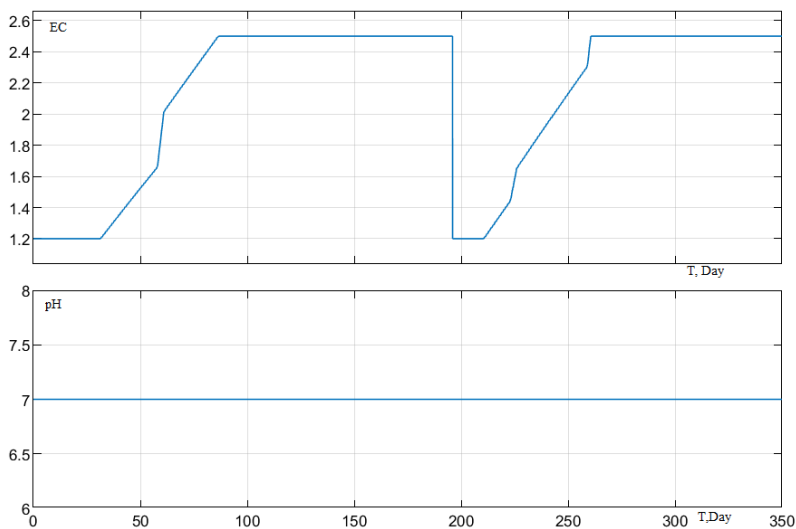


Рис. 6. Результати моделювання ЕС та pH

DQN-агента навчили на моделі середовища, побудованій на фізичних рівняннях, яка симулює динаміку аквапонічної системи, включаючи зміни рівня рН, температури, концентрації аміаку, нітритів, нітратів, ріст рослин і стан риби. Однак сам агент у своєму складі використовує нейронні мережі, які відповідають за прийняття рішень на основі отриманих даних.

Навчання агента на симуляції також дає змогу уникнути ризиків, пов'язаних з експериментами на реальному об'єкті, таких як можливість завдання шкоди рослинам або рибі через помилкові дії агента на початкових етапах навчання. Крім того, симуляція дає змогу швидко тестувати різні стратегії та гіперпараметри, що значно прискорює процес розробки. Після навчання на симуляції агент може бути легко адаптований до реального середовища за допомогою донавчання на реальних даних, враховуючи при цьому специфічні особливості конкретної системи. Отже, цей підхід є не лише коректним, але й оптимальним для створення ефективних RL-агентів у складних системах, таких як аквапоніка.

Використання RL-агента для визначення початку висадки та збору рослин, заселення риби та площі біофільтра дає змогу створити інтелектуальну систему управління, яка оптимізує роботу аквапонічної системи, забезпечує ефективне управління, підтримуючи оптимальні умови для рослин і риби.

Висновки

Використання методів Reinforcement Learning (RL) для управління аквапонічними системами продемонструвало високу ефективність та адаптивність до складних і динамічних умов. RL-агент, навчений на симуляціях, дає змогу уникнути ризиків на початкових етапах і забезпечує оптимізацію ключових процесів, таких як висадка рослин, заселення риби та регулювання площі біофільтра.

Поеднання етапу дослідження середовища та подальшої оптимізації дій забезпечує як стабільність, так і точність у прийнятті рішень. Незважаючи на високу вимогливість до ресурсів і складність налаштування DQN-агента з рекурентними мережами, його застосування виправдане для задач із високими вимогами до точності й обліку часових залежностей. У результаті RL-система забезпечує ефективне управління аквапонікою, мінімізуючи людське втручання та підтримуючи оптимальні умови для рослин і риби.

Література

Залозний, Р. В., Заєць, Н. А. (2024). Математичне моделювання процесів біофільтрації в аквапонних системах. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*, 30(5), 25—33.

Залозний, Р. В., Заєць, Н. А. (2024). Системний аналіз і структура керування аквапонними системами. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*, 30(1), 7—16.

Bradley, M., Lane, S., & Woodbury, N. (2018). *Modeling and control of an aquaponics system*. Взято з https://byu.apmonitor.com/do/uploads/Main/Report_aquaponics2018.pdf.

Conijn, J. G., Bindraban, P. S., Schröder, J. J., & Jongschaap, R. E. E. (2018). Can our global food system meet food demand within planetary boundaries? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 251, 244—256. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.001>.

Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., & Bumell, G. M. (Eds.). (2020). *Aquaponics food production systems*. Взято з <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-15943-6>.

Hager, J., Bright, L. A., Tidwell, J. H., & Dusci, J. (2021). A practical handbook for growers: Aquaponics production manual. Взято з https://www.researchgate.net/publication/355972997_A_Practical_Handbook_for_Growers_AQUAPONICS_Production_Manual.

Immacolata, V., Pontrandolfi, A., & Manelli, A. (2016). The employment crisis and green orientation in agriculture: New educational models. *Procedia — Social and Behavioral Sciences*, 6, 116—122. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2016.02.074>.

Junge, R., König, B., Villarroel, M., Komives, T., & Jijakli, M. H. (2017). Strategic points in aquaponics. *Water*, 9(3), 182. Взято з <https://www.mdpi.com/2073-4441/9/3/182>.

Karimanzira, D., & Rauschenbach, T. (2021). An intelligent management system for aquaponics. Взято з https://www.researchgate.net/publication/350632213_An_intelligent_management_system_for_aquaponics.

Kotzen, B., & Appelbaum, A. (2010). An investigation of aquaponics using brackish water resources in the Negev Desert. *Journal of Applied Aquaculture*, 22(4), 297—315. <https://doi.org/10.1080/10454438.2010.527571>.

Lastiri, D. R. (2021). Modelling and identification of water and nutrient balances in aquaponics. <https://doi.org/10.18174/548235>.

Pedersen, S. (2018). Simulation and optimization of recirculating aquaculture systems. *Department of Electrical Engineering, Chalmers University of Technology*. Взято з https://research.chalmers.se/publication/505266/file/505266_Fulltext.pdf.

Rockström, J., W. et al. (2009). Planetary boundaries: Exploring the safe operating space for humanity. Взято з <https://pubs.giss.nasa.gov/abs/ro06010m.html>.

Van Vuuren, D. P., Smith, S. J., & Riahi, K. (2010). Downscaling socioeconomic and emissions scenarios for global environmental change research: A review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 1(3), 393—404. <https://doi.org/10.1002/wcc.50>.

Verma, A. K., Chandrakant, M. H., John, V. C., Peter, R. M., & John, I. E. (2023). Aquaponics as an integrated agri-aquaculture system (IAAS): Emerging trends and future prospects. *Technological Forecasting and Social Change*, 194, 122709. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122709>.

Smith, J. A., Lopez, M. R., Patel, K. V., & Zhang, T. Y. (2023). Development of intelligent control systems for aquaponic food production: Challenges and innovations. *Computers and Electronics in Agriculture*, 210, 107527. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107527>.

Taylor, S. K., Kumar, A., Choi, J. H., & Becker, P. E. (2023). Optimizing nutrient dynamics in aquaponics: A machine learning approach to sustainable farming. *Agricultural Systems*, 207, 103605. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103605>.

Jones, R. L., Fernandez, C. M., Gupta, S. P., & Olsen, D. H. (2023). Reinforcement learning-based control strategies for automated aquaponics management. *Journal of Cleaner Production*, 384, 135493. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135493>.

Nguyen, P. H., Wilson, T. R., Lee, M. J., & Harrison, B. W. (2023). Enhancing water quality in aquaponics through IoT-enabled real-time monitoring and control. *Environmental Technology & Innovation*, 32, 102892. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.102892>.

Chen, F. R., Al-Habsi, H. K., Brown, L. J., & Green, S. P. (2023). Advanced biofiltration systems in aquaponics: Integration of biological and AI-driven control. *Aquacultural Engineering*, 101, 102257. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2023.102257>.

Garcia, E. M., Wang, Q., Roberts, N. A., & Singh, J. P. (2023). Sustainable aquaponics: Evaluating energy efficiency and automation solutions for urban farming. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 180, 130823. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.130823>.

BIOTECHNOLOGICAL POTENTIAL OF ENDOPHYTIC MICROORGANISMS IN ENHANCING PLANT RESISTANCE TO ABIOTIC STRESSES

V. Shopinskyi¹, L. Butsenko^{1,2}

¹National University of Food Technologies

²Zabolotny Institute of Microbiology and Virology, NAS of Ukraine

Key words:

Endophytes
Abiotic stress conditions
Phytohormones
Metabolites
Plant growth-promoting activities

Article history:

Received 09.01.2025
Received in revised form 24.01.2025
Accepted 12.02.2025

Corresponding author:

L. Butsenko

E-mail:

l.m.butsenko@gmail.com

Citation: Шопінський В. В., Буценко Л. М. (2025). Біотехнологічний потенціал ендоефітних мікроорганізмів у підвищенні стійкості рослин до абіотичних стресів. *Наукові праці НУХТ*, 31(1), 21—36.
DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-1-4

ABSTRACT

The intensification of abiotic stresses highlights the need for effective methods to enhance plant resilience. Endophytic microorganisms are emerging as a promising biotechnological tool to address such challenges. Today endophytic bacteria are used in plant growth promotion preparations. The mechanisms by which endophytes facilitate plant adaptation to stress factors include osmotic regulation, optimization of photosynthetic activity, improvement of nutrient uptake, enhancement of antioxidant defense systems, and more.

Recent advances in understanding the role of endophytes in enhancing plant resistance under abiotic stress conditions, including thermal, saline, cold stresses, and heavy metal exposure are reviewed in the article. It was established that with increasing temperatures (which is the main stress factor in climate change), endophytic microorganisms of different taxonomic groups stimulated the growth of plant roots, thus increasing their ability to obtain moisture and resistance. Endophytes enhance plant resistance to salt stress by influencing the expression of the regulate ion balance genes. In conditions of anthropogenic pollution (especially in the war zone), the ability of endophytes to form chelates for metal ions binding is important to effectively limits the toxicity of cadmium cations. By activating the redox systems of the host-plant, endophytes reduce the toxic effect of manganese ions on plants.

Thus, endophytes represent a valuable biotechnological resource for enhancing plant resilience to stress conditions. Their application in agriculture and forestry has the potential to improve ecosystem stability, reduce the reliance on chemical agents, and promote environmental sustainability.

БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПОТЕНЦІАЛ ЕНДОФІТНИХ МІКРООРГАНІЗМІВ У ПІДВИЩЕННІ СТІЙКОСТІ РОСЛИН ДО АБІОТИЧНИХ СТРЕСІВ

В. В. Шопінський¹, Л. М. Буценко^{1,2}

¹Національний університет харчових технологій

²Інститут мікробіології і вірусології ім. Д. К. Заболотного, НАН України

Інтенсифікація абіотичних стресів актуалізує пошуки методів підвищення стійкості рослин. Ендофітні мікроорганізми, які вступають у стійкі симбіотичні взаємодії з рослинами, привертають увагу як перспективний біотехнологічний інструмент вирішення таких завдань. Уже сьогодні ендофітні бактерії застосовують у складі препаратів для рослинництва. Механізми, за допомогою яких ендофіти сприяють адаптації рослин до стресових факторів, включають осморегуляцію, оптимізацію фотосинтезувальної активності, покращення засвоєння поживних речовин, посилення антиоксидантних захисних систем тощо.

У статті висвітлено останні досягнення у вивченні ролі ендофітів у підвищенні стійкості рослин в умовах абіотичних стресів: теплових, сольових, холодових стресів і впливу важких металів. Встановлено, що за підвищення температур (що є основним стресовим фактором в умовах змін клімату) ендофітні мікроорганізми різних таксономічних груп стимулюють ріст коренів рослин, підвищуючи таким чином її здатність отримувати вологу та стійкість. Ендофіти посилюють стійкість рослин до сольового стресу, впливаючи на експресію генів, що регулюють іонний баланс. В умовах антропогенного забруднення (особливо у зоні бойових дій) важливою є здатність ендофітів утворювати хелати для зв'язування з іонами металів, що ефективно обмежує токсичність катіонів кадмію. Шляхом активації окисно-відновних систем рослини-хазяїна ендофіти зменшують токсичну дію іонів марганцю на рослини.

Отже, ендофіти становлять важливий біотехнологічний ресурс для покращення стійкості рослин до стресових умов. Використання ендофітів у сільському та лісовому господарствах може підвищити стабільність екосистем, зменшити необхідність у застосуванні хімічних речовин та сприяти збереженню навколишнього середовища.

Ключові слова: ендофіти, абіотичні стресові умови, фітогормони, метаболіти, рістстимулювальна активність.

Постановка проблеми. Наразі застосування мікробних препаратів для стимуляції росту та підвищення стійкості рослин до стресів є актуальним напрямом біотехнології. Однак розвиток цього напрямку вимагає пошуку нових біотехнологічних агентів, що будуть відповідати сучасним викликам, які стоять перед рослинництвом. Одними із найбільш перспективних продуцентів є ендофітні бактерії.

Вперше про ендофітні мікроорганізми згадується в XIX ст., коли німецький ботанік Генріх Фрідріх Лінк у 1809 р. повідомив, що будь-який паразитичний

гриб, який живе всередині рослин, є ендоефітом. Визначення ендоефітів було пов'язане з грибковим паразитизмом, доки науковець Галіппе не заявив, що навіть бактерії, які мігрують з ґрунту, можуть колонізувати рослинну тканину та відігравати корисну роль у ній (Rutkowska, Drozdowski, Ryngajlo, & Marchut-Mikolajczyk, 2023). Німецький ботанік і мікробіолог Генріх Антон де Барі ввів поняття «ендоефіти рослин». Вчений вважав, що ендоефіти рослин — це мікроорганізми, що колонізують внутрішні тканини рослини і вступають у гармонійні відносини з рослиною-хазяїном. На сьогодні ендоефітними ми вважаємо симбіотичні мікроорганізми, які утворюють взаємовигідні асоціації з рослиною-хазяїном (Ааміг та ін., 2020).

Загалом, ендоефіти впливають на рослину-хазяїна завдяки колонізації, яка відбувається двома шляхами: вертикально (через насіння або вегетативні частини, наприклад, пагони) та горизонтально із ґрунту (через кореневу систему). Більшість ендоефітів проникають до хазяїна через коріння і поширюються по різних частинах рослини, взаємодіючи з її клітинами й тканинами, включаючи стебла, листя, квіти, насіння тощо (Kandasamy, & Kathirvel, 2023). Метаболічна активність і функціональна різноманітність ендоефітів дають змогу чинити їм сприятливий та позитивний вплив на ріст і розвиток рослин. Встановлені симбіотичні відносини сприяють фіксації азоту та солонізації фосфору рослиною. Крім того, ендоефіти стимулюють продукування необхідних фітогормонів (ауксинів, наприклад, індолоцтової кислоти — ІОК, цитокинінів, гіберелінових кислот тощо), які також сприяють росту і розвитку рослин (Алі та ін., 2021).

Ендоефіти відіграють важливу роль у регулюванні реакції рослин на стрес. Присутність ендоефітів впливає не тільки на рослину-хазяїна, але й на стабільність навколишньої екосистеми. Вони взаємодіють з іншими організмами (наприклад, з мікоризними грибами), що може покращувати загальний стан ґрунтової мікробіоти і, як наслідок, підвищувати родючість ґрунту та його стійкість до ерозії. Також ендоефіти сприяють покращенню циклу поживних речовин у ґрунті, роблячи їх більш доступними для рослин (Chaudhary, Agri, Chaudhary, Kumar, & Kumar, 2022; Мошинець, & Косаківська, 2010). Дослідження ендоефітів та їхнього впливу на рослини тривають багато десятиліть і залишаються актуальними та важливими, про що свідчить зростання інтересу наукової спільноти до цієї тематики. При аналізі досліджень у базі даних ScienceDirect за останні десять років було виявлено, що кількість публікацій зросла на 490% порівняно з попереднім десятиріччям. Це підтверджує значний науковий прогрес у біотехнологічній галузі та зростання вагомості ролі ендоефітів у функціонуванні екосистем.

Абіотичні стреси переважно зумовлені факторами навколишнього середовища, що впливають на ріст і розвиток рослин. Стресові фактори можуть порушувати фізіологічні процеси рослин (поглинання поживних речовин, фотосинтез тощо) та викликати незворотні наслідки (наприклад, в'янення листя, карликовість та уповільнення розвитку рослин), які можуть завдати шкоди здоров'ю людей і тварин через накопичення токсичних сполук, порушення обміну речовин, зниження врожайності та якості харчових продуктів (Gong та ін., 2020).

Ендоефітні мікроорганізми все частіше використовують як природні біоконтролюючі агенти (Пасічник, Гвоздяк, & Ходос, 2020). Проте механізми дії ендоефітів

у захисті від абіотичних стресів залишаються недостатньо вивченими. До сих пір залишаються дискусивними питання визначення критеріїв оцінки безпечності ендоефітних мікроорганізмів та їх потенціалу в стимулюванні росту та розвитку рослин (на зразок критеріїв пробіотиків).

Мета статті: аналіз та узагальнення даних щодо впливу ендоефітних мікроорганізмів та їх біологічно-активних метаболітів на стійкість рослин до абіотичних стресів, визначення механізмів їхньої дії та оцінка потенціалу застосування ендоефітів у рослинництві.

Матеріали і методи. Використані зарубіжні та українські наукові публікації у провідних періодичних і спеціалізованих світових виданнях, що стосуються дослідження взаємодії ендоефітів та рослин-хазяїнів в умовах абіотичних стресів. Для написання огляду аналізували дані відкритих джерел: статті, публікації, наукометричні бази даних (Google Scholar, PubMed та ScienceDirect).

Викладення основних результатів. Вплив ендоефітів на рослин-хазяїнів в умовах абіотичних стресів. Рослини в природному середовищі постійно піддаються абіотичним стресам. Серед основних абіотичних стресів досить інтенсивно досліджують тепловий і сольовий стрес, вплив важких металів, холодний стрес.

Тепловий стрес. Підвищення глобальної температури стало одним із факторів, що суттєво впливає на ріст рослин. Дослідження показало, що температура в усьому світі може піднятися в середньому на 2—5 °C до кінця ХХІ ст. (Heeter та ін., 2023).

Україна, як і більшість регіонів світу, «відчуває» підвищення середньорічної температури, що створює ризик частіших теплових хвиль і посух. Основні сільськогосподарські культури України (пшениця, кукурудза, соняшник тощо) є чутливими до теплового стресу, який знижує врожайність і якість продукції, а це негативно впливає на сільське господарство — ключову галузь економіки України (Мошинець, & Косаківська, 2010; Пасічник, Гвоздяк, & Ходос, 2020).

Тепловий стрес критично впливає на клітинні мембрани рослин (короткотривалий високотемпературний вплив може призвести до денатурації білка), швидкість біохімічних реакцій (може призвести до змін у метаболізмі) та поглинання рослинами різних поживних речовин. Допмагаючи рослині підтримувати баланс води, накопичувати поживні речовини і зберігати стійкість в умовах високотемпературного стресу, ендоефіти можуть сприяти збільшенню/зростанню:

- біологічної маси (загальної кількості тканин, включаючи воду);
- сухої маси (концентрації поживних речовин; тверді речовини: клітковина, білки, вуглеводи, мінерали та інші компоненти, що є маркерами харчової цінності рослини);
- вмісту хлорофілу;
- довжини коренів (Eid та ін., 2021; Pan, Cheng, & Sun, 2021; Shekhawat, Frohlich, Garcia-Ramirez, Trapp, & Hirt, 2022).

Під впливом теплового стресу ендоефіти можуть посилювати експресію білка теплового шоку (HSP90), активувати протеїнази YDA, MKK, MPK та впливати на фосфорилування SPCN для регулювання розміру проростків. Так, Waqas та ін. визначили, що в умовах теплового стресу ендоефіт *Paecilomyces formosus* LWL1

зменшує вміст фітогормонів/речовин, що сигналізують про стрес, зокрема абсцизової (АК) та жасмонової (ЖК) кислот (на 25,1% та 34,57% відповідно), і підвищує на 18,76%—33,22% вміст загального білка в клітинах рису посівного порівняно з контрольними зразками (Waqas та ін., 2015).

Вплив на збільшення вмісту фітогормонів (індолицтової кислоти) спостерігали при дослідженні теплового стресу в симбіотичних відносинах рослини-хазяїна *Parthenium hysterophorus* L. та ендofіту *Curvularia clavata* (Khan, Ali, Khan, Hamayun, & Moon, 2022).

Окрім впливу на синтез фітогормонів, ендofіти сприяють загальному росту і розвитку рослин як під дією високотемпературного стресу, так і за нормальних умов (ендofітні мікроорганізми впливають на покращення засвоєння поживних речовин, збільшення доступності мікроелементів, стимулювання синтезу вторинних метаболітів тощо). Порівняно з рослинами, що росли в нормальних умовах, під впливом теплового стресу та за інокуляції ендofітними мікроорганізмами *Aspergillus spp.* і *Meyerozyma guilliermondi* спостерігали збільшення довжини кореневої системи та сухої маси у соняшника звичайного *Helianthus annuus* (Maia та ін., 2024) і подовження пагона й кореня у *Carthamus oxycantha* (Javed та ін., 2022). Це свідчить про те, що ендofіти підтримують ріст рослини-хазяїна за умов стресу, стимулюючи подовження кореневої системи як адаптивного механізму для поглинання води та поживних речовин.

У більшості досліджень (Aswini та ін., 2023; De Marco та ін., 2022; Huang, Fan, Cui, Li, & Guo, 2022; Khan та ін., 2020) використання ендofітних мікроорганізмів, що стимулюють ріст рослин, є ключовим фактором підвищення здатності рослин-хазяїнів підтримувати свою продуктивність в умовах теплового (високотемпературного) стресу. Особливо це важливо для культурних рослин: пшениці, сої, соняшника.

Інформація щодо специфічного впливу ендofітів на рослини в умовах теплового стресу наведена нижче в табл. 1.

Таблиця 1. Вплив ендofітів на рослини-хазяїнів в умовах теплового стресу

Ендofіт		Рослина-хазяїн	Вплив	Джерело
Група	Вид			
Гриби	<i>Paecilomyces formosus</i> . LWL1	Рис посівний (<i>Oryza sativa</i>)	Збільшення вмісту фітогормонів — абсцизової та жасмонової кислот; підвищення загального вмісту білка	Waqas та ін., 2015
	<i>Curvularia clavata</i>	Гваюла (<i>Parthenium hysterophorus</i>)	Збільшення вмісту індолицтової кислоти, хлорофілу та білків	Khan, Ali, Khan, Hamayun, & Moon, 2022
	<i>Aspergillus flavus</i>	Соняшник звичайний (<i>Helianthus annuus</i>)	Збільшення вмісту хлорофілу; збільшення довжини кореневої системи та сухої ваги	Maia та ін., 2024
	<i>Meyerozyma guilliermondi</i>	Сафлор (<i>Carthamus oxycantha</i>)	Збільшення довжини пагона та кореня; збільшення загального вмісту хлорофілу та каротиноїдів	Javed та ін., 2022

Бактерії	<i>Bacillus cereus</i> SA1	Соя культурна (<i>Glycine max</i>)	Збільшення вмісту хлорофілу, каротиноїдів і білків	Aswini та ін., 2023
	<i>Enterobacter</i> sp. SA187	Пшениця м'яка (<i>Triticum aestivum</i>)	Збільшення вмісту фітогормонів: ауксинів і гіберелінів	De Marco та ін., 2022
	<i>Wheat seed endophytic bacteria</i> (WSEB)		Збільшення вмісту індолицтової кислоти та поживних речовин	Huang, Fan, Cui, Li, & Guo, 2022
	<i>Bacillus cereus</i> SA1	Соя культурна (<i>Glycine max</i>)	Підвищення вмісту саліцилової кислоти (СК) та глутатіону	Khan та ін., 2020

Наведені у табл. 1 дані свідчать про позитивний вплив ендоефітних мікроорганізмів на рослини в умовах теплового стресу: сприяють підвищенню стійкості рослин завдяки збільшенню вмісту фітогормонів, хлорофілу, каротиноїдів, білків та інших біологічно активних сполук. Це призводить до покращення росту, розвитку кореневої системи та збільшення загальної біомаси рослин, що дає змогу їм ефективніше адаптуватися до несприятливих умов.

Сольовий стрес. Дія сольового стресу призводить до пригнічення росту та розвитку рослин: знижується осмотичний тиск клітин коренів, клітинні мембрани піддаються перекисному окисненню, знижується здатність поглинати мінеральні елементи та воду, змінюється динамічний баланс іонів, пригнічується ферментативна активність тощо (Lu, Wei, Lou, Shu, & Chen, 2021).

Засолення може збільшити швидкість деградації хлорофілу хлорофілазою, що негативно вплине на фотосинтез і розвиток рослини. Murphy та інші дослідники визначили, що у хлоропластах і мітохондріях внаслідок засолення спостерігається підвищене продукування активних форм кисню (АФК), перекису водню (H_2O_2), пероксидних радикалів ($O_2^{\cdot-}$), вільного кисню (O_2) та гідроксильних аніонів ($OH^{\cdot-}$); ці продукти із сильною окислювальною властивістю можуть призвести до пошкодження рослинної тканини, мутацій ДНК, розриву клітинної мембрани, деградації ліпідів, білків і фотосинтетичних пігментів (Murphy та ін., 2022).

Під впливом сольового стресу деякі ендоефітні мікроорганізми (наприклад, *Azo-spirillum*, *Bacillus* і *Pseudomonas*) можуть індукувати секрецію абсцизової кислоти, яка зв'язується з рецептором PYL(PYR)/PP108 і протеїновою фосфатазою PP2C з утворенням комплексу PYL-ABA-PP2C, що спричинятиме зменшення вмісту АФК, а отже, сприятиме покращенню фотосинтетичних процесів і стимулюватиме ріст рослин (Liu, Mao, Yuan, Chu, & Duan, 2022).

За умов сольового стресу *Bacillus circulans* PK3-15 і PK3-109 можуть значно збільшити біомасу рослини на 50% (Bokhari та ін., 2019). Також встановлено, що бактерії *Enterobacter* sp. FN0603 значно підвищили стійкість рослин до сольового стресу, сприяючи накопиченню поживних речовин у ризосфері (грунтовій зоні навколо коренів) та посилюючи активність важливих ферментів у рослинах, що сприяє їх адаптації до стресового фактору (Xu та ін., 2022).

Ендоефітні бактерії *Bacillus*, *Salmonella*, *Kushneria*, *Micrococcus* і *Pseudomonas*, індукують зміни в активності рослинних антиоксидантних ферментів (аскорбат-пероксидази, каталази та супероксиддисмутази) та покращують стійкість рослин

до сольового стресу. Підвищення стресостійкості визначають шляхом порівняння фізіологічних, біохімічних і молекулярних показників інокульованих ендоефітами рослин із контрольними зразками. Аналізують зростання активності антиоксидантних ферментів, зниження рівня малонового діальдегіду (маркера оксидативного стресу), підтримання високого вмісту хлорофілу, балансу іонів натрію (Na^+) та калію (K^+), підвищення концентрації осмопротекторів (наприклад, проліну) тощо (Sofo, Scopa, Nuzzaci, & Vitti, 2015; Cui та ін., 2024; Mishra та ін., 2023; Gupta, та ін., 2023).

Дослідники Sabeem та ін. визначили, що підтримання балансу між іонами Na^+ і K^+ в клітинах є важливим механізмом, який забезпечує іонний гомеостаз і захищає клітини від токсичної дії надлишку іонів натрію. Також зазначено, що інокуляція рослини *Phoenix dactylifera* ендоефітними мікроорганізмами *Piriformospora indica* сприяє збільшенню транспортної активності Na^+/K^+ насоса та покращенню ефективності K^+ каналу. Це дає змогу підтримувати високий рівень катіонів калію в цитоплазмі та зменшувати накопичення катіонів натрію у вакуолях, що запобігає порушенню клітинних процесів і сприяє збереженню осмотичного потенціалу (Sabeem та ін., 2022; Zhang, та ін., 2008).

Інформація щодо важливого позитивного впливу ендоефітів на рослин-хазяїнів в умовах сольового стресу наведена в табл. 2.

Таблиця 2. Вплив ендоефітів на рослин-хазяїнів в умовах сольового стресу

Ендоефіт		Рослина-хазяїн	Функція/ефект	Джерело
Група	Вид			
Гриби	<i>Piriformospora indica</i>	Фінік їстівний (<i>Phoenix dactylifera</i>)	Підтримується гомеостаз іонів Na^+/K^+	Sabeem та ін., 2022
Гриби	<i>Trichoderma asperelloides</i> T203	Гусимка звичайна (<i>Arabidopsis thaliana</i>)	Посилюється експресія гена, що кодує монодегідроаскорбатредуктазу	Brotman та ін., 2013
	<i>Aspergillus flavus</i> CHS1	Лобода біла (<i>Chenopod. album</i>)	Підвищення вмісту хлорофілу, розчинення фосфату, продукування ІОК та галової кислоти	Lubna та ін., 2018
	<i>Meyerozyma caribbica</i>	Кукурудза (<i>Zea mays</i>)	Підвищення вмісту індолоцтової кислоти, фенолів і флавоноїдів	Jan та ін., 2019
Бактерії	<i>Bacillus safensis</i> BTL5	Рис посівний (<i>Oryza sativa</i>)	Синергія з мелатоніном, активація антиоксидантної системи та покращення осмотичного балансу	Gupta, Tiwari, Shukla, Singh, & Sahu, 2023
	<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> SQR9	Кукурудза (<i>Zea mays</i>)	Розподіл іонів Na^+ у везикулах для покращення перебігу циклу Na^+ від ґрунту до коренів	Chen, та ін., 2016

	<i>Azospirillum brasilense</i>	Ячмінь звичайний (<i>Hordeum vulgare</i>)	Регулюється експресія протеїну водного каналу плазматичної мембрани та підвищується провідність кореневої води	Zawoznik, Ameneiros, Benavides, Vazquez, & Groppa, 2011
Бактерії	<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> FZB42	Гусимка звичайна (<i>Arabidopsis thaliana</i>)	Продуктується фермент для синтезу проліну, що підвищує солестійкість рослин	Liu, та ін., 2017
	<i>Pseudomonas simiae</i>	Соя (<i>Glycine max</i>)	Продукуються білки для зберігання поживних речовин; накопичення азоту; підтримується активність кислої фосфатази та гомеостаз іонів Na ⁺	Vaishnav, Kumari, Jain, Varma, & Choudhary, 2015
	<i>Bacillus subtilis</i> (BERA 71)	Нут звичайний (<i>Cicer arietinum</i>)	Підвищення рівня активних форм кисню, перекисне окиснення ліпідів	Hashem та ін., 2019
	<i>Bacillus subtilis</i> NUU4; <i>Rhizobium ciceriic53</i>	Нут звичайний (<i>Cicer arietinum</i>)	Підвищення вмісту індолоцтової кислоти та флавоноїдів	Lastochkina, 2019
	<i>Pseudomonas spp.</i>	Гусимка звичайна (<i>Arabidopsis thaliana</i>)	Підвищення вмісту антиоксидантних ферментів і проліну	Fan, Subramanian & Smith, 2020

Дані табл. 2 вказують на існування різноманітних механізмів впливу ендоефітних мікроорганізмів на рослині-хазяїнів в умовах сольового стресу. Ендоефіти можуть посилювати стійкість рослин, впливаючи на експресію генів, що регулюють іонний баланс, окислювальні процеси, засвоєння поживних речовин і водний баланс. Завдяки цим механізмам ендоефіти допомагають рослинам підтримувати фізіологічні процеси в стресових умовах, що робить їх важливим елементом для біотехнологічних застосувань у важливих сферах господарств.

Важкі метали. Стрес, спричинений важкими металами, є актуальною проблемою екології, оскільки важкі метали можуть поєднуватися з органічними або неорганічними іонами в ґрунті, утворюючи більш стабільні комплекси, а їх накопичення та токсичність можуть не тільки зменшити кількість мікроорганізмів у ґрунті, але й негативно вплинути на ріст і розвиток рослин. Рослини піддаються впливу таких важких металів: кадмію (Cd), хрому (Cr), міді (Cu), свинцю (Pb), ртуті (Hg) тощо (Alengebawy, Abdelkhalek, Qureshi, & Wang, 2017; Navarro-Torre та ін., 2017).

Дослідження іонів кадмію (Cd²⁺) в екосистемах є актуальною проблемою для України через численні фактори: забруднення ґрунтів промисловими відходами, застосування хімічних добрив і забруднення водних ресурсів. Високий рівень кад-

мію у ґрунтах спостерігається в районах, що постраждали від важкої промислової (металургійної та хімічної заводи), у сільськогосподарських землях (де використовуються хімічні препарати) та в місцях бойових дій (джерелом забруднення можуть бути залишки вибухових речовин і техніка, в якій використовується кадмій у її компонентах або акумуляторах). Довготривале забруднення кадмієм може мати серйозні наслідки для аграрного сектору України, знижуючи родючість ґрунтів і погіршуючи якість сільськогосподарських культур, що, у свою чергу, впливає на продовольчу безпеку країни.

Катіон Cd^{2+} є одним з найбільш токсичних важких металів, період напіврозпаду якого в рослині може досягати 25—30 років. Токсичність кадмію перешкоджає поглинанню й транспортуванню рослинами необхідних іонів, що призводить до дефіциту поживних речовин. Іони Cd^{2+} пошкоджують структуру хлоропластів і можуть замінювати катіони Ca^{2+} в реакційному центрі фотосистеми II (PSII) рослин, знижуючи таким чином фотосинтетичну здатність рослин, що призводить до зменшення її біомаси (Sperdouli та ін., 2022).

Визначено, що для запобігання потраплянню надмірної кількості іонів кадмію в клітини та погіршенню функціональності клітин, ендофіти можуть сприяти або безпосередньо виділяти хелати для зв'язування з іонами металів, що ефективно обмежить токсичність Cd. Глутатіон ($\gamma\text{-glu-cys-gly}$), трипептидний небілковий тіол, який широко присутній у рослинних клітинах, вважається важливою сполукою для пом'якшення стресу від Cd, виконуючи функцію пептид-ліганду і антиоксиданту. Глутатіон перетворюється на фітохелатини (PCs) у реакціях, що каталізуються ферментом фітохелатинсинтазою, і кадмій, що надходить до коренів рослин, нейтралізується шляхом хелатування з PCs, утворюючи комплекси PCs-Cd, які переносяться та зберігаються у везикулах (Su та ін., 2021).

В ендофітних бактерій *Sphingomonas paucimobilis* ZJSH1, які виділені з коренів *Dendrobium officinale*, виявлено гени, що кодують активні речовини: фітогормони (ІОК, СК, АК, ЖК та зеаксантин), фосфатний цикл, антиоксидантні ферменти та полісахариди, які надали потенціал штаму протистояти впливу засолення, посухи та дії йонів кадмію (Li та ін., 2023).

Марганець (манган) є одним із важливих елементів для росту та розвитку рослин і відіграє значну фізіологічну роль у створенні структури хлоропластів, діючи як каталізатор фотолізу води та регулюючи окисно-відновні потенціали. Однак, коли рівень катіонів Mn^{2+} в ґрунті занадто високий, він проявляє токсичність щодо рослин і може серйозно вплинути на їхню фотосинтетичну систему, руйнуючи структуру цист і фотосинтетичний ланцюг транспортування електронів, що знижує фотосинтетичну ефективність і, зрештою, призводить до в'янення та некрозу листя. Ріст та розвиток первинних і бічних коренів рослини так само сильно пригнічується надмірною кількістю йонів марганцю (Alejandro, Holler, Meier, & Peiter, 2020).

Вивчення впливу іонів мангану (Mn^{2+}) в ґрунті є актуальною проблемою для України, зокрема в районах з підвищеним вмістом цього важкого металу: в місцях з кислими ґрунтами та регіонах, де використовуються високі дози мінеральних добрив або є природні джерела високого вмісту мангану. Токсичність мангану в ґрунті

може обмежити поглинання рослиною інших важливих елементів, наприклад, заліза, кальцію та магнію, що спричинить пошкодження кореневої системи та призведе до значних агрономічних та екологічних проблем.

Марганцевий стрес шкодить рослинам, зменшуючи вміст розчинних цукрів, руйнуючи структуру хлоропластів, утворюючи надмірну кількість активних форм кисню та пригнічуючи ріст коренів. Ендофіти допомагають рослинам пом'якшити Mn^{2+} -стрес головним чином шляхом запобігання прикріплення катіонів Mn^{2+} до клітинних стінок, регуляції антиоксидантної системи рослин, обмеження поглинання іонів Mn коренями та секреції органічних кислот для хелатування *in vitro* (Cui та ін., 2024).

Визначено, що ендофіт *Bacillus* sp. AP10 підвищив експресію специфічних генів, що сприяють поглинанню активних форм кисню і накопиченню антиоксидантних флавоноїдів, знижуючи токсичність марганцю (Wu та ін., 2023). Ендофітні бактерії *Bacillus megaterium* 1Y31 підвищують резистентність рослин до Mn^{2+} шляхом продукування ІОК, носіїв заліза та 1-аміноциклопропан-1-карбоксилат (АЦК) дезамінази, збільшуючи експресію білків, що пов'язані з фотосинтезом і виробництвом енергії, і знижуючи експресію білків, що пов'язані зі стресом. Також було визначено, що штам 1Y31 регулював відносний вміст індолоцтової кислоти та носіїв заліза у корені та листі, надаючи рослині більшу стійкість до впливу надлишкової кількості мангану (Zhang, He, Wang, & Sheng, 2015).

Отже, вченими та дослідниками визначено, що під впливом важких металів ендофітні мікроорганізми сприяють виділенню малих органічних молекул і позаклітинних полімерів з кореневої системи для зв'язування надмірної кількості металів і запобігання їх надходження у клітини рослин. Тому цей процес є критично важливим для екосистем в умовах фітостресу, викликаного впливом важких металів.

Холодовий стрес. Холодовий (низькотемпературний) стрес або стрес, спричинений впливом низьких температур, — це абіотичний стрес, який впливає на нормальний ріст і розвиток рослин. Ендофіти можуть зменшити шкоду низьких температур для рослин, регулюючи співвідношення фітогормонів (абсцизова кислота — гібереліни) та метаболізм цукрів (Cui та ін., 2024).

Деякі ендофіти активують молекулярні механізми мембранних рецепторів і сигнальні шляхи, пов'язані з G-білком, рецепторо-подібними кіназами, іонними каналами та гістидинкіназами, коли рослина-хазяїн піддається, окрім дії температури, ще й впливу солоності, посухи, токсичності важких металів тощо (Li та ін., 2022).

При активуючому впливі ендофітних мікроорганізмів *Piriformospora indica* на гусимку звичайну (*Arabidopsis thaliana*) виявлено підвищення синтезу рослинних метаболітів (проліну, аскорбінової та абсцизової кислот), які збільшують стійкість рослини до низькотемпературного (холодового) стресу та рівень транскрипції споріднених генів (Jiang та ін., 2020).

Інформація щодо впливу деяких ендофітів та їх біологічно активних метаболітів на стійкість рослини-хазяїна до абіотичних стресів (холодового, важких металів, інших абіотичних стресів, зокрема, посухи) наведена у табл. 3.

Визначено, що симбіотичні зв'язки між ендофітними мікроорганізмами та рослинами-хазяїнами впливають на фізіологічний стан рослин через серію сигнальних і метаболічних регуляцій. Аналізуючи дані, описані в табл. 1—3, виявлено,

що різноманітність ендоефітних угруповань та їх специфічна дія на рослини мають значний вплив на адаптивність рослини-хазяїна до навколишнього середовища. Дослідники визначили, що ендоефіти можуть мінімізувати шкоду, спричинену абіотичними стресами, і підвищити стресостійкість рослин, беручи участь в осморегуляції, фотосинтезі, покращуючи засвоєння поживних речовин рослинами, посилюючи антиоксидантні системи тощо.

Таблиця 3. Вплив ендоефітів та їх метаболітів на стійкість рослини-хазяїна до різних абіотичних стресів

Ендоефіт	Рослина-хазяїн	Біохімічний вплив	Вид стресостійкості	Джерело
<i>Fusarium</i> ; <i>Alternaria</i>	Соя культурна (<i>Glycine max</i>)	Підвищення вмісту тритерпеноїдів, фенолів та полісахаридів	Стійкий до кислот, лугів та інших абіотичних стресів	Xiao та ін., 2021
<i>Burkhold. cepacia</i> J62; <i>Microbact. JYC17</i>	Ріпак озимий (<i>Brassica napus</i>)	Підвищення вмісту не-ферментативних антиоксидантів: аскорбінової кислоти і глутатіон	Пригнічення стресу важких металів, поглинання міді, посилення антиоксидантної активності	Ren та ін., 2019
<i>Piriformosp. indica</i>	Полин (<i>Artemisia carvifolia</i>)	Підвищення вмісту флавоноїдів та амонійного білка	Стійкість до впливу миш'яку; покращення рівня транскрипції генів; біосинтез ізопренодіолу, терпену та флавоноїдів	Rahman, Khalid, Kayani, & Tang, 2020
<i>Sinorhizob. meliloti</i> CCNWSX0020	Люцерна хмелецвіта (<i>Medicago lupulina</i>)	Підвищення вмісту флавоноїдів та амонійного білка	Стійкість до впливу нікелю та кобальту	Li та ін., 2018
<i>Bacillus</i> sp.; <i>Arthrobact. sp.</i>	Перець чорний (<i>Piper nigrum</i>)	Накопичення проліну	Стійкість до посухи; посилення активності АЦК-дезамінази	Saikia та ін., 2018
<i>Bacillus megaterium</i> H3	Рис посівний (<i>Oryza sativa</i>)	Накопичення проліну	Стійкість до впливу миш'яку; покращення здатності протистояти бактеріальним патогенам	Cheng, Nie, Wang, He, & Sheng, 2020
<i>Bacillus megaterium</i> BM18-2	Слонова трава (<i>Pennisetum purpureum</i>)	Підвищення вмісту хлорофілу	Стійкість до впливу кадмію; покращення росту і розвитку рослин та відновлення складу ґрунту	Kamal, Liu, Qian, Wu, & Zhong, 2021
<i>P. indica</i>	Тютюн справжній (<i>Nicotiana tabacum</i>)	Підвищення вмісту глутатіону та пероксидаз	Знижується фітотоксичність кадмію, посилюється активність антиоксидантних ферментів	Su та ін., 2021

<i>Piriformosp. indica</i>	Гусимка звичайна (<i>Arabidops. thaliana</i>)	Підвищення вмісту проліну, аскорбінової та абсцизової кислот	Стійкість до холодового стресу; підвищення рівня транскрипції споріднених генів	Jiang та ін., 2020
<i>Bacillus subtilis</i>	Сололка уральська (<i>Glycyrrh. uralensis Fisch</i>)	Підвищення вмісту флавоноїдів, полісахаридів і гліциризинової кислоти	Стійкість до посухи; покращення експерсії генів	Xie, Chu, Zhang, Lang, & Zhang, 2019

Ендофіти мають великий потенціал реагувати на абіотичний стрес. Використання мікроорганізмів для стимулювання росту рослин в умовах абіотичних стресів може покращити стійкість рослин, зменшити потребу в хімічній обробці землі та сприяти захисту навколишнього середовища. Хоча дослідження ендофітів досягли значного прогресу, вони все ще невідомі щодо багатьох аспектів наукової цінності. На сьогодні раціональне застосування наукових підходів для повного розуміння взаємодії між ендофітами та їх хазяїнами є корисним для розширення вибору і можливостей у дослідженні цінності та практичного використання ендофітних мікроорганізмів. Майбутні дослідження можуть відкрити більше деталей про роль ендофітів в адаптації рослин і стратегіях їх виживання, надаючи більш повну перспективу для розвитку сталого сільського господарства й управління екосистемами.

Отже, ендофіти можуть ефективно регулювати стресостійкість рослин-хазяїнів до абіотичних стресів, і завдяки своїй природній функціональності предмет їх вивчення викликає зацікавленість у дослідників і вчених.

Висновки

У результаті проведених досліджень та аналізу встановлено, що ендофітні мікроорганізми мають значний потенціал у підвищенні стійкості рослин до різноманітних абіотичних стресів. Вплив ендофітів на рослини проявляється через різні механізми, включаючи регулювання фізіологічних процесів, покращення іонного балансу, осморегуляції, фотосинтезу та антиоксидантних систем. Ендофіти сприяють накопиченню біологічно активних речовин, що допомагають рослинам адаптуватися до стресових умов.

Ендофіти та їх біологічно активні метаболіти індукують різноманітні біохімічні процеси, які є важливими для росту та розвитку рослин. Ендофітні мікроорганізми продукують фітогормони, ароматичні сполуки, ліпопептиди, полісахариди та специфічні ферменти, які представляють вагомий потенціал у контролі екосистем.

Майбутні дослідження повинні зосередитися на оптимізації умов застосування ендофітів та вивченні їх взаємодії з різними видами рослин-хазяїнів, що дасть змогу розширити потенціал ендофітів у екологічному управлінні. Використання ендофітних мікроорганізмів може стати ключовим елементом у розробці нових біологічних засобів захисту та підвищенні стійкості рослин до стресів, що має важливе значення для забезпечення продовольчої безпеки та збереження екосистем.

Література

- Мошинець, О. В., & Косаківська, І. В. (2010). Екологія фітосфери: рослинно-мікробні взаємовідносини. 1. Структурно-функціональна характеристика ризо-, ендо- та філосфери. *Вісник ХНАУ*, 2(20), 19—35.
- Пасічник, Л. А., Гвоздяк, Р. І., & Ходос, С. Ф. (2005). Епіфітна і ендофітна мікрофлора здорового зерна та вегетуючих рослин пшениці. *Вісник ДАУ*, 2(15), 141—148.
- Aamir, M., Rai, K. K., Andleeb Z., Kumar, S., Yadav, M., Shukla, V., & Upadhyay, R. S. (2020). Fungal endophytes: Classification, diversity, ecological role, and their relevance in sustainable agriculture. *Microbial Endophytes*, 291—323. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818734-0.00012-7>.
- Alejandro, S., Holler, S., Meier, B., & Peiter, E. (2020). Manganese in plants: from acquisition to subcellular allocation. *Frontiers in Plant Science*, 11, 300. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00300>.
- Alengebawry, A., Abdelkhalek, S. T., Qureshi, S. R., & Wang, M. Q. (2021). Heavy metals and pesticides toxicity in agricultural soil and plants: ecological risks and human health implications. *Toxics*, 9(3), 42. <https://doi.org/10.3390/toxics9030042>.
- Ali, M., Ali, Q., Sohail M. A., Ashraf, M. F., Saleem, M. H., Hussain, S., & Zhou, L. (2021). Diversity and taxonomic distribution of endophytic bacterial community in the rice plant and its prospective. *International Journal of Molecular Sciences*, 22 (18), 10165. <https://doi.org/10.3390/ijms221810165>.
- Aswini, K., Suman, A., Sharma, P., Singh, P. K., Gond, S., & Pathak, D. (2023). Seed endophytic bacterial profiling from wheat varieties of contrasting heat sensitivity. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1101818. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1101818>.
- Bokhari, A., Essack, M., Lafi, F. F., Andres-Barrao, C., Jalal, R., Alamoudi, S., ..., Saad, M. M. (2019). Bioprospecting desert plant *Bacillus* endophytic strains for their potential to enhance plant stress tolerance. *Scientific Reports*, 9(1), 18154. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54685-y>.
- Brotman, Y., Landau, U., Cuadros-Inostroza, A., Tohge, T., Fernie, A. R., Chet, I., ..., Willmitzer, L. (2013). Trichoderma-plant root colonization: escaping early plant defense responses and activation of the antioxidant machinery for saline stress tolerance. *PLOS Pathogens*, 9(3), e1003221. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1003221>.
- Chaudhary, P., Agri, U., Chaudhary, A., Kumar, A., & Kumar, G. (2022). Endophytes and their potential in biotic stress management and crop production. *Frontiers in Microbiology*, 13, 933017. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.933017>.
- Chen, L., Liu, Y., Wu, G., Njeri, K. V., Shen, Q., Zhang, N., & Zhang, R. (2016). Induced maize salt tolerance by rhizosphere inoculation of *Bacillus amyloliquefaciens* SQR9. *Plant Physiology*, 158(1), 34—44. <https://doi.org/10.1111/ppl.12441>.
- Cheng, C., Nie, Z. W., Wang, R., He, L. Y., & Sheng, X. F. (2020). Metal(loid)-resistant *Bacillus megaterium* H3 reduces arsenic uptake in rice (*Oryza sativa* Nanjing 5055) at different growth stages in arsenic-contaminated soil. *Geoderma*, 375, 114510. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114510>.
- Cui, J., Nie, F., Zhao, Y., Zhang, D., Zhou, D., Wu, J., ..., Liu, L. (2024). A review on plant endophytes in response to abiotic stress. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 36(1), <http://dx.doi.org/10.1080/26395940.2024.2323123>.
- De Marco, A., Sicard, P., Feng, Z., Agathokleous, E., Alonso, R., Araminiene, V., ..., Paoletti, E. (2022). Strategic roadmap to assess forest vulnerability under air pollution and climate change. *Global Change Biology*, 28(17), 5062—5085. <https://doi.org/10.1111/gcb.16278>.
- Eid, A. M., Fouda, A., Abdel-Rahman, M. A., Salem, S. S., Elsaied, A., Oelmuller, R., ..., Hassan, S. E. D. (2021). Harnessing bacterial endophytes for promotion of plant growth and biotechnological applications: an overview. *Plants*, 10(5), 935. <https://doi.org/10.3390/plants10050935>.
- Fan, D., Subramanian, S., & Smith, D. L. (2020). Plant endophytes promote growth and alleviate salt stress in *Arabidopsis thaliana*. *Scientific Reports*, 10, 12740. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69713-5>.
- Fatemi, H., Zaghdoud, C., Nortes, P. A., Carvajal, M., & Martinez-Ballesta, M. (2020). Differential aquaporin response to distinct effects of two Zn concentrations after foliar application in Pak Choi (*Brassica rapa* L.) plants. *Agronomy*, 10(3), 450. <http://dx.doi.org/10.3390/agronomy10030450>.

- Gong, Z., Xiong, L., Shi, H., Yang, S., Herrera-Estrella, L. R., Xu, G., ..., Zhu, J. K. (2020). Plant abiotic stress response and nutrient use efficiency. *Science China Life Sciences*, 63(5), 635—674. <https://doi.org/10.1007/s11427-020-1683-x>.
- Gupta, A., Singh, A. N., Tiwari, R. K., Sahu, P. K., Yadav, J., Srivastava, A. K., & Kumar, S. (2023). Salinity alleviation and reduction in oxidative stress by Endophytic and rhizospheric microbes in two rice cultivars. *Plants*, 12(5), 976. <https://doi.org/10.3390/plants12050976>.
- Gupta, A., Tiwari, R. K., Shukla, R., Singh, A. N., & Sahu, P. K. (2023). Salinity alleviator bacteria in rice (*Oryza sativa* L.), their colonization efficacy, and synergism with melatonin. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1060287. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1060287>.
- Hashem, A., Kumar, A., Al-Dbass, A. M., Alqarawi, A. A., Al-Arjani, A. B. F., Singh, G., ..., Abd Allah, E. F. (2019). Arbuscular mycorrhizal fungi and biochar improves drought tolerance in chickpea. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 26, 614—624. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2018.11.005>.
- Heeter, K. J., Harley, G. L., Abatzoglou, J. T., Anchukaitis, K. J., Cook, E. R., Coulthard, B. L., ..., Homfeld, I. K. (2023). Unprecedented 21st century heat across the Pacific Northwest of North America. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 6(1), 5. <http://dx.doi.org/10.1038/s41612-023-00340-3>.
- Huang, B., Fan, Y., Cui, L., Li, C., & Guo C. (2022). Cold stress response mechanisms in another development. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(1), 30. <https://doi.org/10.3390/ijms24010030>.
- Inbaraj, P., & Krishnaswamy, M. (2021). The effect of zinc stress combined with high irradiance stress on membrane damage and antioxidative response in bean seedlings. *Environmental and Experimental Botany*, 74, 171—177. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2011.05.016>.
- Jan, F. G., Hamayun, M., Hussain, A., Iqbal, A., Jan, G., Khan, S. A., ..., Lee, I. J. (2019). A promising growth promoting *Meyerozyma caribbica* from *Solanum xanthocarpum* alleviated stress in maize plants. *Bioscience Reports*, 39, BSR20190290. <https://doi.org/10.1042/bsr20190290>.
- Javed, J., Rauf, M., Arif, M., Hamayun, M., Gul, H., Ud-Din, A., ..., Lee, I. J. (2022). Endophytic fungal consortia enhance basal drought-tolerance in *Moringa oleifera* by upregulating the antioxidant enzyme (APX) through heat shock factors. *Antioxidants*, 11(9), 1669. <https://doi.org/10.3390/antiox11091669>.
- Jiang, W., Pan, R., Wu, C., Le Xu, Abdelaziz, M. E., Oelmuller, R., & Zhang, W. (2020). *Piriformospora indica* enhances freezing tolerance and post-thaw recovery in *Arabidopsis* by stimulating the expression of CBF genes. *Plant Signaling and Behavior*, 15, 1745472. <https://doi.org/10.1080/15592324.2020.1745472>.
- Kamal, N., Liu, Z., Qian, C., Wu, J., & Zhong, X. (2021). Improving hybrid Pennisetum growth and cadmium phytoremediation potential by using *Bacillus megaterium* BM18-2 spores as biofertilizer. *Microbiological Research*, 242, 126594. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126594>.
- Kandasamy, G. D., & Kathirvel, P. (2023). A review: insights into bacterial endophytic diversity and isolation with a focus on their potential applications. *Microbiological Research*, 266, 127256. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2022.127256>.
- Khan, A., Ali, S., Khan, M., Hamayun, M., & Moon, Y. S. (2022). *Parthenium hysterophorus*'s endophytes: the second layer of defense against biotic and abiotic stresses. *Microorganisms*, 10(11), 2217. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10112217>.
- Khan, M. A., Asaf, S., Khan, A. L., Jan, R., Kang, S. M., Kim, K. M., & Lee, I. J. (2020). Thermotolerance effect of plant growth-promoting *Bacillus cereus* SA1 on soybean during heat stress. *BMC Microbiology*, 20(1), 175. <https://doi.org/10.1186/s12866-020-01822-7>.
- Lastochkina, O. V. (2019). *Bacillus subtilis*-mediated abiotic stress tolerance in plants. *Bacilli and Agrobiotechnology: Phytostimulation and Biocontrol*, 97—133. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-15175-1_6.
- Li, Z., Song, X., Wang, J., Bai, X., Gao, E., & Wei, G. (2018). Nickel and cobalt resistance properties of *Sinorhizobium meliloti* isolated from *Medicago lupulina* growing in gold mine tailing. *PeerJ*, 6, e5202. <https://doi.org/10.7717/peerj.5202>.
- Li, Z., Wen, W., Qin, M., He, Y., Xu, D., & Li, L. (2022). Biosynthetic mechanisms of secondary metabolites promoted by the interaction between endophytes and plant hosts. *Frontiers in Microbiology*, 13, 928967. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.928967>.

- Li, J., Wu, H., Pu, Q., Zhang, C., Chen, Y., Lin, Z., ..., Li, O. (2023). Complete genome of *Sphingomonas paucimobilis* ZJSH1, an endophytic bacterium from *dendrobium officinale* with stress resistance and growth promotion potential. *Archives of Microbiology*, 205(4), 132. <https://doi.org/10.1007/s00203-023-03459-2>.
- Liu, S., Hao, H., Lu, X., Zhao, X., Wang, Y., Zhang, Y., ..., Wang, R. (2017). Transcriptome profiling of genes involved in induced systemic salt tolerance conferred by *Bacillus amyloliquefaciens* FZB42 in *Arabidopsis thaliana*. *Scientific Reports*, 7(1), 10795. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11308-8>.
- Liu, C., Mao, B., Yuan, D., Chu, C., & Duan, M. (2022). Salt tolerance in rice: physiological responses and molecular mechanisms. *Crop Journal*, 10(1), 13–25. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2021.02.010>.
- Lu, H., Wei, T., Lou, H., Shu, X., & Chen, O. (2021). A critical review on communication mechanism within plant-endophytic fungi interactions to cope with biotic and abiotic stresses. *Journal of Fungi*, 7(9), 719. <https://doi.org/10.3390/jof7090719>.
- Lubna, Asaf, S., Hamayun, M., Khan, A. L., Waqas, M., Khan, M. A., ..., Hussain, A. (2018). Salt tolerance of *Glycine max*.L induced by endophytic fungus *Aspergillus flavus* CSH1, via regulating its endogenous hormones and antioxidative system. *Plant Physiology and Biochemistry*, 128, 13–23. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.05.007>.
- Maia, R. A., Barbosa, M., Franco, A. C., Oki, Y., Romano, M. C. C., Siqueira-Silva, A. I., & Fernandes, G. W. (2024). The role of *Aspergillus flavus* in modulating the physiological adjustments of sunflower to elevated CO₂ and temperature. *Environmental and Experimental Botany*, 228(A), 105992. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2024.105992>.
- Mishra, N., Jiang, C., Chen, L., Paul, A., Chatterjee, A., & Shen, G. (2023). Achieving abiotic stress tolerance in plants through antioxidative defense mechanisms. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1110622>.
- Murphy, M. P., Bayir, H., Belousov, V., Chang, C. J., Davies, K. J. A., Davies, M. J., ..., Halliwell, B. (2022). Guidelines for measuring reactive oxygen species and oxidative damage in cells and *in vivo*. *Nature Metabolism*, 4(6), 651–662. <https://doi.org/10.1038/s42255-022-00591-z>.
- Navarro-Torre, S., Barcia-Piedras, J. M., Caviedes, M. A., Pajuelo, E., Redondo-Gomez, S., Rodriguez-Llorente, I. D., & Mateos-Naranjo, E. (2017). Bioaugmentation with bacteria selected from the microbiome enhances arthrocnemum macrostachyum metal accumulation and tolerance. *Marine Pollution Bulletin*, 117(1–2), 340–347. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.02.008>.
- Pan, Y., Cheng, J. H., & Sun, D. W. (2021). Metabolomic analyses on microbial primary and secondary oxidative stress responses. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(6), 5675–5697. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12835>.
- Rahman, S. U., Khalid, M., Kayani, S. I., & Tang, K. (2020). The ameliorative effects of exogenous inoculation of *Piriformospora indica* on molecular, biochemical and physiological parameters of *Artemisia annua* L. under arsenic stress condition. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 206, 111202. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111202>.
- Ren, X. M., Guo, S. J., Tian, W., Chen, Y., Han, H., Chen, E., ..., Chen, Z. J. (2019). Effects of plant growth-promoting bacteria (PGPB) inoculation on the growth, antioxidant activity, Cu uptake, and bacterial community structure of rape (*Brassica napus* L.) grown in Cu-contaminated Agricultural Soil. *Frontiers in Microbiology*, 10, 1455. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01455>.
- Rutkowska, N., Drozdowski, P., Ryngajlo, M., & Marchut-Mikolajczyk, O. (2023). Plants as the extended phenotype of endophytes — the actual source of bioactive compounds. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(12), 10096. <https://doi.org/10.3390/ijms241210096>.
- Sabeem, M., Abdul Aziz, M., Mullath, S. K., Brini, F., Rouached, H., & Masmoudi, K. (2022). Enhancing growth and salinity stress tolerance of date palm using *Piriformospora indica*. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1037273. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1037273>.
- Saikia, J., Sarma, R. K., Dhandia, R., Yadav, A., Bharalim, R., Gupta, V. K., & Saikia, R. (2018). Alleviation of drought stress in pulse crops with ACC deaminase producing rhizobacteria isolated from acidic soil of Northeast India. *Scientific Reports*, 8, 3560. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21921-w>.

Shekhawat, K., Frohlich, K., Garcia-Ramirez, G. X., Trapp, M. A., & Hirt, H. (2022). Ethylene: a master regulator of plant-microbe interactions under abiotic stresses. *Cells*, 12(1), 31. <https://doi.org/10.3390/cells12010031>.

Sofo, A., Scopa, A., Nuzzaci, M., & Vitti, A. (2015). Ascorbate peroxidase and catalase activities and their genetic regulation in plants subjected to drought and salinity stresses. *International Journal of Molecular Sciences*, 16(6), 13561—13578. <https://doi.org/10.3390/ijms160613561>.

Sperdoui, I., Adamakis, I. S., Dobrikova, A., Apostolova, E., Hanc, A., & Moustakas, M. (2022). Excess zinc supply reduces cadmium uptake and mitigates cadmium toxicity effects on chloroplast structure, oxidative stress, and photosystem II photochemical efficiency in *Salvia sclarea* plants. *Toxics*, 10(1), 36. <https://doi.org/10.3390/toxics10010036>.

Su, Z., Zeng, Y., Li, X., Perumal, A. B., Zhu, J., Lu, X., ..., Lin, L. (2021). The endophytic fungus *piriformospora indica*-assisted alleviation of cadmium in tobacco. *Journal of Fungi*, 7(8), 675. <https://doi.org/10.3390/jof7080675>.

Vaishnav, A., Kumari, S., Jain, S., Varma, A., & Choudhary, D. K. (2015). Putative bacterial volatile-mediated growth in soybean (*Glycine max* L. Merrill) and expression of induced proteins under salt stress. *Journal of Applied Microbiology*, 119(2), 539—551. <https://doi.org/10.1111/jam.12866>.

Waqas, M., Khan, A. L., Shahzad, R., Ullah, I., Khan, A. R., & Lee, I. J. (2015). Mutualistic fungal endophytes produce phytohormones and organic acids that promote japonica rice plant growth under prolonged heat stress. *Journal of Zhejiang University*, 16(12), 1011—1018. <https://doi.org/10.1631/jzus.b1500081>.

Wu, Q., Lin, X., Li, S., Liang, Z., Wang, H., & Tang, T. (2023). Endophytic *Bacillus* sp. AP10 harboured in *Arabidopsis thaliana* mediates plant growth promotion and manganese detoxification. *Ecotoxicology and environmental safety*, 262, 115170. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115170>.

Xiao, J. L., Sun, J. G., Pang, B., Zhou, X., Gong, Y., Jiang, L., ..., Yin, J. (2021). Isolation and screening of stress-resistant endophytic fungus strains from wild and cultivated soybeans in cold region of China. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 105, 755—768. <https://doi.org/10.1007/s00253-020-11048-2>.

Xie, Z., Chu, Y., Zhang, W., Lang, D., & Zhang, X. (2019). *Bacillus pumilus* alleviates drought stress and increases metabolite accumulation in *Glycyrrhiza uralensis* Fisch. *Environmental and Experimental Botany*, 158, 99—106. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.11.021>.

Xu, F., Liang, Y., Wang, X., Guo, Y., Tang, K., & Feng, F. (2022). Synergic mitigation of saline-alkaline stress in wheat plant by silicon and *Enterobacter* sp. FN0603. *Frontiers in Microbiology*, 13, 1100232. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1100232>.

Yan, J., Pan, Y., He, J., Pang, X., Shao, W., Wang C., ..., Dong, S. (2023). Toxic vascular effects of polystyrene microplastic exposure. *Science of the Total Environment*, 905, 167215. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167215>.

Zawoznik, M. S., Ameneiros, M., Benavides, M. P., Vazquez, S. C., & Groppa, M. D. (2011). Response to saline stress and aquaporin expression in *Azospirillum*-inoculated barley seedlings. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 90(4), 1389—1397. <http://dx.doi.org/10.1007/s00253-011-3162-1>.

Zhang, W. H., He, L. Y., Wang, Q., & Sheng, X. F. (2015). Inoculation with endophytic *Bacillus megaterium* 1Y31 increases Mn accumulation and induces the growth and energy metabolism-related differentially-expressed proteome in Mn hyperaccumulator hybrid pennisetum. *Journal of hazardous materials*, 300, 513—521. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.07.049>.

Zhang, H., Kim, M. S., Sun, Y., Dowd, S. E., Shi, H., & Pare, P. W. (2008). Soil bacteria confer plant salt tolerance by tissue-specific regulation of the sodium transporter HKT1. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 21(6), 737—744. <https://doi.org/10.1094/mpmi-21-6-0737>.

THEORETICAL ANALYSIS OF THE CREATION OF RIBOFLAVIN OVERPRODUCERS THROUGH REGULATION OF ISOCITRATE LYASE ACTIVITY IN ASCOMYCETES OF THE GENUS *EREMOTHECIUM*

Z. Shopova, V. Polishchuk, O. Dugan

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Key words:

Eremothecium gossypii
Eremothecium ashbyi
Riboflavin
Itaconate
Mutagenesis
Antimetabolite

Article history:

Received 06.01.2025
Received in revised form
21.01.2025
Accepted 07.02.2025

Corresponding author:

Z. Shopova
E-mail:
zsshopova@gmail.com

Citation: Шопова З. С.,
Поліщук В. Ю., Дуган О. М.
(2025). Теоретичний аналіз
створення надпродуцентів
рибофлавіну шляхом регуляції
активності ізоцитратліази у
аскомицетів роду *Eremothecium*.
Наукові праці НУХТ,
31(1), 37—56.
DOI: 10.24263/2225-
2924-2025-31-1-5

ABSTRACT

The global market size for riboflavin is valued at \$451.57 million USD as of 2024. To further develop this sector in Ukraine, it is necessary to implement new methods of optimizing the enzymatic production of vitamin B₂ that would be more economically and environmentally feasible compared to existing methods worldwide.

Eremothecium gossypii and *Eremothecium ashbyi* are filamentous fungi that parasitize cotton plants and are known for their ability to produce significant amounts of riboflavin, a precursor to coenzymes in redox reactions and a substance with antioxidant properties in living organisms.

The objective of the research was to analyze the efficiency of the selection process for high-yielding vitamin B₂ producers among natural producers *E. gossypii* and *E. ashbyi*, as well as to compare the riboflavin output as a result of this selection process.

An experimental approach using itaconic acid as an inhibitor of the enzyme isocitrate lyase was examined in the article. Mutant strains of *E. gossypii* and *E. ashbyi*, resistant to itaconate, demonstrated a 25-fold increase in riboflavin yield and a 15% increase in specific isocitrate lyase activity compared to the wild strain when grown in media containing vegetable oil as the sole carbon source. This result was achieved by redirecting the carbon flow towards riboflavin biosynthesis through the glyoxylate shunt.

The results indicated the key role of isocitrate lyase in increasing riboflavin production when using media with high vegetable oil content, which stimulates vitamin biosynthesis. The addition of antimetabolites, such as itaconate or oxalate, to the growth media allowed for the selection of microorganism colonies with enhanced riboflavin production capabilities. This research direction opens new possibilities for metabolic engineering in optimizing vitamin B₂ production at an industrial level.

ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ СТВОРЕННЯ НАДПРОДУЦЕНТІВ РИБОФЛАВІНУ ШЛЯХОМ РЕГУЛЯЦІЇ АКТИВНОСТІ ІЗОЦИТРАТЛІАЗИ В АСКОМІЦЕТІВ РОДУ *EREMOTHECIUM*

З. С. Шопова, В. Ю. Поліщук, О. М. Дуган

Національний технічний університет України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського»

Розмір світового ринку рибофлавіну становить 451,57 млн дол. США станом на 2024 рік. Для розвитку галузі в Україні необхідно впроваджувати нові методи оптимізації ферментативного способу отримання вітаміну B₂, які були б економічно та екологічно більш доцільними за існуючі у світі.

Eremothecium gossypii та *Eremothecium ashbyi* є міцеліальними грибами-паразитами бавовнику, відомими своєю здатністю продукувати значні кількості рибофлавіну, який є прекурсором коферментів в окисно-відновних реакціях і володіє антиоксидантними властивостями в живих організмів.

Метою дослідження є аналіз ефективності процесу відбору надпродуцентів вітаміну B₂ серед природних продуцентів *E. gossypii* та *E. ashbyi*, а також порівняння виходу рибофлавіну внаслідок проведення цього відбору.

Проаналізовано експериментальний підхід з використанням ітаконової кислоти як інгібітора ферменту ізоцитратліази. Мутантні штами *E. gossypii* і *E. Ashbyi*, стійкі до ітаконату, продемонстрували 25-кратне збільшення виходу рибофлавіну, а також збільшення специфічної активності ізоцитратліази на 15% порівняно з диким штамом при вирощуванні на середовищі з рослинною олією як єдиним джерелом карбону. Цей результат був досягнутий завдяки перенаправленню потоку карбону на біосинтез рибофлавіну через гліоксилатний шунт.

Отримані результати свідчать про ключову роль ізоцитратліази у збільшенні продукції рибофлавіну при використанні середовищ з високим вмістом рослинних олій, які стимулюють біосинтез вітаміну. Внесення антиметаболітів, таких як ітаконат чи оксалат, до складу поживного середовища дає змогу виділяти колонії мікроорганізмів з підвищеною здатністю продукувати рибофлавін. Такий напрямок досліджень відкриває нові можливості для метаболічної інженерії в оптимізації виробництва вітаміну B₂ на промисловому рівні.

Ключові слова: *Eremothecium gossypii*, *Eremothecium ashbyi*, рибофлавін, ітаконат, мутагенез, антиметаболіт.

Постановка проблеми. Міцеліальний гриб *Eremothecium gossypii* відомий своєю здатністю продукувати значні кількості водорозчинного вітаміну B₂, який також називається рибофлавіном (Averianova та ін. 2020). Безумовна необхідність рибофлавіну для живих організмів полягає в нейтралізації вільних радикалів, які утворюються під час ультрафіолетового випромінювання за рахунок взаємодії електромагнітних хвиль з біологічними молекулами, особливо ДНК (Silva та ін. 2018). Окрім антиоксидантної активності, яка допомагає грибу захищати спори

від шкідливої дії ультрафіолету, вітамін B₂ бере участь в окисно-відновних реакціях як прекурсор флавокоензимів флавінмононуклеотиду (ФМН) та флавінадегидрогенази (ФАД), що функціонують як міцно зв'язані простетичні групи дегідрогеназ. У таких біохімічних реакціях ізоалоксазинове кільце рибофлавіну стає проміжним переносником атомів H⁺, які відщеплюються від молекули субстрату. Рибофлавін займає важливе місце в реакціях бета-окиснення жирних кислот, дезамінування амінокислот, а отже, є необхідним складовим у ліпідному, вуглеводному та білковому обміні. Також вітамін B₂ має вирішальне значення для перетворення триптофану в ніацин — ще один життєво необхідний вітамін групи В — вітамін B₃ (Shastak, & Pelletier, 2024). Звідси випливає, що вітамін B₂ є надважливим фактором росту та розвитку еукаріотів.

Світовий ринок вітаміну B₂ становив близько 109 тис. тонн у 2023 р., причому очікується зростання на 5,4% протягом 2025—2034 рр., що становитиме, ймовірно, майже 200 тис. тонн. Це пов'язано з його активним використанням у харчовій, фармацевтичній промисловостях (Vitamin B₂ market size, share, growth & forecast, 2024), як пігменту (Choudhury, 2023) та кормової добавки для тварин (Vitamin B₂ market size, share, growth & forecast, 2024). Дані EFSA підтверджують, що рибофлавін, отриманий за допомогою штамів *E. ashbyi*, не має генотоксичних ефектів, оскільки дослідження та тести токсичності не виявили негативного впливу при дозах до 240,000 мг/кг корму (Villa та ін., 2024). Застосування рибофлавіну ускладнюється через чутливість до світла та нестабільність у шлунково-кишковому тракті організмів. Нанокapsулювання за допомогою наночастинок на основі хітозану та полімолочно-гліколевої кислоти значно покращує його стабільність і забезпечує контрольоване вивільнення, підвищуючи біодоступність рибофлавіну порівняно з його вільною формою. Використання метаболічної інженерії для створення високопродуктивних штамів *E. gossypii* та *E. ashbyi* у поєднанні з нанокapsулюванням стабілізує рибофлавін і покращує його зберігання і транспортування. Такий підхід збільшує ефективність використання рибофлавіну у харчовій промисловості та нутрицевтиці (Sathiansathaporn та ін., 2024). З іншого боку, попередня обробка рибофлавіном паростків рису зменшує негативний вплив солей шляхом покращення стійкості до окисидативного стресу, оскільки підвищена концентрація вітаміну B₂ діє як неферментативний антиоксидант, а також шляхом підвищення стійкості до іонного стресу, тому що попередня обробка обмежує накопичення іонів Na⁺ в листі і підтримує сприятливий натрій-калієвий баланс (Jiadkong та ін., 2023). Аналогічно, обробка рибофлавіном покращує антиоксидантну систему, посилюючи активності каталази, аскорбатпероксидази і глутатіонредуктази, пригнічуючи перекисне окислення мембран у полуниці при тривалому зберіганні (Zhang та ін. 2023).

Проте удосконалення технології отримання та підвищення виходу рибофлавіну є актуальним завданням на сьогодні, оскільки порівняно з хімічним методом, ферментація є більш екологічним та економічним способом отримання вітаміну B₂ за рахунок відсутності складних стадій синтезу за використанням агресивних реагентів і жорстких умов проведення реакції в хімічному синтезі (Liu, 2020).

Наразі ферментаційне виробництво рибофлавіну є більш доцільним, з чим пов'язують повне витіснення хімічного синтезу на ринку (Averianova та ін. 2020).

Розмір ринку рибофлавіну оцінюється в 451,57 млн дол. США в 2024 р., і очікується, що він досягне 623,06 млн дол. США до 2029 р., забезпечуючи ріст на 6,65% CAGR (Compound Annual Growth Rate) протягом прогнозованого періоду (2024—2029 pp.) (Riboflavin Market Size & Share Analysis — Growth Trends & Forecasts, 2024). Дослідження Future Market Insights показує, що ринок рибофлавіну в ЄС складав понад 215 млн дол. США у 2021 р., що становить приблизно 26,7% світового ринку цього вітаміну. Очікується, що протягом прогнозованого періоду ринок буде рости на рівні 7,3%. У 2021 р. дохід Німеччини склав 24,2 млн дол. США, за нею йде Франція з 22,6 млн дол. США (Choudhury, 2023).

Проте в другому кварталі 2024 р. на ринку ЄС спостерігалось масове зниження цін на рибофлавін, що пояснюється низьким попитом і надлишком пропозиції від основних експортерів поруч з обмеженістю пропозицій та збоями у поставках сировини і готового продукту. Така негативна динаміка яскраво продемонстрована у випадку німецького виробництва вітаміну: нестабільність фармацевтичного та нутрицевтичного ринку закупівель та збуту знижує баланс попиту та пропозиції на цей продукт, що, у свою чергу, посилювалось великим внеском дешевого рибофлавіну з китайського ринку. Як наслідок, відбувся значний вплив на стратегії ціноутворення. Ціни на вітамін B₂ знизились на 18% порівняно з другим кварталом 2023 р. та на 4%, якщо порівняти з першим кварталом 2024 р. (Vitamin B₂ Prices, News, Monitor, Market Analysis, & Demand, 2024).

Такі світові виробники, як BASF (Німеччина), DSM (раніше Roche, Нідерланди), Hubei Guangji Pharmaceuticals і Shanghai Acebright Pharmaceuticals (раніше Desano, Китай), отримують рибофлавін з клітин промислових мікробних штамів *Ashbya gossypii*, *Candida famata* var. *flarer* та *Bacillus subtilis*, досягаючи титру до 15, 20 та 14 г/л відповідно (Averianova та ін. 2020; Lim та ін. 2001; Vandamme, & Revuelta, 2016). Генетично модифікований штам термофільної *Bacillus methanolicus* MGA3 здатний надмірно синтезувати рибофлавін на рівні 523 мг/л при періодичному ферментуванні з додаванням до поживного середовища метанолу (Klein та ін. 2023).

З іншого боку, серед населення спостерігається тенденція до підвищення піклування про здоров'я, збільшення популярності прийому вітамінів та інших нутрієнтів (Riboflavin Market Size, & Share Analysis — Growth Trends & Forecasts, 2024). Тобто зміщення балансу між попитом та пропозицією можна пояснити не з точки зору перенасиченості ринку рибофлавіном в принципі, а через відсутність більш економічно доступних варіантів. Цілком логічною є побудова стратегії виробництва дешевого рибофлавіну за рахунок інноваційних підходів і нових способів створення надпродуцентів вітаміну B₂, які б не вимагали великих витрат на дослідження та впровадження генетичної модифікації штамів і зменшення виходу додаткових вторинних метаболітів.

На сьогодні в Україні немає вітчизняного виробництва рибофлавіну. Так, наприклад, ЗАТ «Київський вітамінний завод», м. Київ, займається виготовленням готових лікарських форм вітаміну на основі рибофлавіну Shanghai Desano Vitamins Co. Ltd, КНР. Серед інших дистриб'юторів на українському ринку АТ «Лекхім», м. Харків, ЗАТ ФК «Дарниця», м. Київ, ТОВ «Астрафарм», м. Вишневе, Київська обл., ПАТ «Вітаміни», м. Умань, Черкаська обл. та інші.

У 1975 р. вченими було проілюстровано важливість рибофлавіну в енергетичному метаболізмі мітохондрій і доведено, що нестача вітаміну В₂ призводить до порушення функції мітохондрій (Hoppel, & Tandler, 1975). На відміну від мишей, геном людини містить близько 90 генів, що кодують флавінзалежні білки, утворюючи флавопротеом людини (Lienhart та ін., 2013). Флавоферменти активно беруть участь у ліпідному та білковому обміні, наприклад, сім мітохондріальних ацил-КоА-дегідрогеназ і три пероксисомні ацил-КоА-оксидази беруть участь у катаболізмі ліпідів. Інші флавоензими задіяні у десатурації жирних кислот і метаболізмі холестерину в ендоплазматичному ретикулумі та в синтезі ефірних ліпідів у пероксисомах (Lienhart та ін., 2013; Pinto, & Cooper, 2014), мітохондріальному катаболізмі амінокислот, а холіндегідрогеназа, диметилгліциндегідрогеназа і саркозиндегідрогеназа відповідають за реакції перетворення холіну в мітохондріях. Флавоферменти також відповідають за окислювальне згортання білків в ендоплазматичному ретикулумі (Lienhart та ін., 2013; Kodali, & Thorpe, 2010). Рибофлавін має вирішальне значення для злагодженої роботи мітохондріального електротранспортного ланцюга: комплекс I і комплекс II містять ФМН, ФАД і мітохондріальну гліцерол-3-фосфатдегідрогеназу, сульфідхіноноксидоредуктазу, та інші флавопротеїни переносу електронів, наприклад, убіхіноноксидоредуктазу (Lienhart та ін., 2013). Флавіни, зокрема рибофлавін, є основою для утворення коферментів ФМН і ФАД, які залучені до понад 100 метаболічних процесів, включно з енергетичним обміном і окисно-відновними реакціями. У клітинах *E. gossypii* флавопротеїни беруть участь у контролі рівнів активних форм кисню, що впливають на продукцію рибофлавіну. Наявність достатнього рівня ФАД стабілізує ферментативну активність ізоцитратліази та інших ключових ферментів циклу гліюксилату, сприяючи підвищенню продуктивності рибофлавіну. У харчовій промисловості оптимізація метаболічних шляхів із залученням флавопротеїнів відкриває нові можливості для стабільного виробництва вітаміну В₂ (Schrier та ін., 2025).

Глутатіонредуктаза є флавоензимом, який каталізує відновлення дисульфід у глутатіону до глутатіону, основного клітинного антиоксидантного пептиду (Couto та ін., 2016). Фактор індукції апоптозу є мітохондріальним флавоензимом, який під час апоптозу переміщується в ядро, де включається в комплекс руйнування хроматину, що викликає загибель клітини (Bano, & Prehn, 2018). Апоптоз-індукуючий фактор — гомологічний мітохондріально-асоційований індуктор смерті (цитозольний флавофермент), який бере участь у каспазо-незалежному апоптозі, також є флавозалежним ферментом (Marshall та ін., 2005). Важливо зазначити, що мітохондріальні і мікросомальні цитохроми Р450 беруть участь у процесі передачі електронів від флавоферментів (Guengerich, 2003), які відповідають за метаболізм ліків у клітинах організму. До того ж, наприклад, завдяки такому впливу на цитохроми, прийом добавок з вітаміном може слугувати профілактикою мігрень при дефіциті мітохондріального комплексу. Препарати з рибофлавіном радять вживати для стимулювання біосинтезу колагену та покращення стану волосся, нігтів, лікування катаракти, глаукоми та кератоконусу для підвищення міцності рогівки ока, зниження рівня гомоцистеїну та артеріального тиску, і, відповідно, для профілактики ішемічної хвороби серця, інсульту (Mahabadi та ін., 2024). Отже, для забезпечення зростаючих потреб людства у вітамінах необхідно шукати нові спосо-

би виробництва рибофлавіну, які могли б конкурувати з азійським ринком і забезпечувати потреби місцевого населення у вигляді доступної харчової чи кормової добавки для тварин. Одним із таких методів є створення надпродуцентів рибофлавіну серед представників родини *Eremothecium* шляхом створення стійких до антиметаболіту ізоцитратліази, зокрема ітаконової кислоти, штамів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останні десятиліття проводились дослідження синтезу рибофлавіну серед бактеріальних і грибних культур за використанням методів метаболічної інженерії: *Escherichia coli*, *Bacillus subtilis*, *Corynebacterium ammoniagenes* та *Candida spp* (табл. 1) (Vandamme, & Revuelta, 2016).

Таблиця 1. Мікроорганізми-продуценти рибофлавіну (Averianova та ін., 2020)

Штам	Спосіб отримання штаму	Вихід рибофлавіну, г/л
<i>C. acetobutylicum</i> 4259	Дикий тип	0,097
<i>B. subtilis</i> PRF93	Генетична інженерія	0,08
<i>B. subtilis</i> RB50:(pRF69)6o(Ade+)	Генетична інженерія	4—15
<i>B. subtilis</i> ATCC 6051	Дикий тип	0,00385
<i>B. subtilis</i> AJ12644	Направлений мутагенез	1,05
<i>B. subtilis</i> KCCM 10445	Направлений мутагенез	26,8
<i>B. subtilis</i> KCCM 10446	Направлений мутагенез	26,5
<i>B. subtilis</i> VKPM-B 6797	Генетична інженерія	12,4
<i>B. subtilis</i> RH44	Генетична інженерія	16,36
<i>B. subtilis</i> X42	Генетична інженерія	7,9
<i>C. ammoniagenes</i> pFM76	Генетична інженерія	15,3
<i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>Cremoris</i> NZ9000	Генетична інженерія	0,024
<i>Lactobacillus fermentum</i> KTLF1	Генетична інженерія	0,00236
<i>Corynebacterium glutamicum</i> KCCM11223P	Генетична інженерія	0,245
<i>E. coli</i> RF05S-M40	Генетична інженерія	2,7028
<i>E. gossypii</i> AgOXA50	Дикий тип	5,2
<i>E. gossypii</i> ZP4	Направлений мутагенез	8,7
<i>E. gossypii</i> NRRL Y-1056	Дикий тип	0,03
<i>E. gossypii</i> W 122032	Генетична інженерія	13,7
<i>E. gossypii</i> ATCC 10895	Дикий тип	2,5
<i>E. ashbyi</i> NRRL 1363	Дикий тип	2,85
<i>C. famata</i> ATCC 20849; 20850	Направлений мутагенез	20
<i>C. famata</i> ATCC 20755; 20756	Направлений мутагенез	7,5
<i>Candida</i> sp. LEB 130	Дикий тип	$1,25 \cdot 10^{-2}$
<i>P. guilliermondii</i> NRRL Y-488	Дикий тип	$3—4,5 \cdot 10^{-3}$
<i>P. guilliermondii</i> XS-3	Генетична інженерія	0,003

<i>P. guilliermondii</i> DM 644	Дикий тип	0,01912
<i>Pichia pastoris</i> X-33 ScRIB1	Генетична інженерія	0,175
<i>S. cerevisiae</i> NH-268	Направлений мутагенез	3,4

Ці підходи здебільшого направлені на стимулювання надмірної експресії структурних і регуляторних генів, які беруть участь у синтезі рибофлавіну та/або його попередників. Це призвело до покращення продуктивності штамів і збільшення виходу рибофлавіну в промислових умовах (Vandamme, & Revuelta, 2016).

З комерційною метою рибофлавін було вперше виділено в 1946 р. шляхом ацетон-бутанолового бродіння з бактерій *Clostridium acetobutylicum*, проте в цьому разі вітамін B₂ утворювався як побічний продукт (Leviton, 1946). У подальшому було виявлено, що гриби *Eremothecium ashbyi*, *Eremothecium gossypii*, *Pichia guilliermondii*, *Pichia caribbica*, *Candida famata*, *Candida oleophila*, *Candida boidinii*, *Schwanniomyces occidentalis*, *Aspergillus terreus* і *Hansenula polymorpha* синтезують рибофлавін з попередників рибулозо-5-фосфату та гуанозинтрифосфату, що робить їх потенційними продуцентами цільової сполуки. Втім вони не здатні покривати потреби у масштабах виробництва через низький рівень накопичення та концентрацій вітаміну за природних умов (Sabry та ін., 1993; Leathers, & Gupta, 1997; Suryadi та ін., 2000; Babyak та ін., 2002; Abbas, & Sibirny, 2011; Ohara та ін., 2016).

У промисловості для отримання рибофлавіну, зазвичай, використовують штамми *E. gossypii* та *B. subtilis*, і більшість досліджень синтезу рибофлавіну проводиться саме на цих двох мікроорганізмах відповідно. *E. gossypii* та *B. subtilis* мають два загальні попередники для синтезу рибофлавіну: гуанозинтрифосфат (ГТФ) з пуринового шляху синтезу і рибулозо-5-фосфат з пентозофосфатного шляху (Bacher та ін., 2000). Проте регуляторний механізм синтезу рибофлавіну значно відрізняється серед різних видів (You та ін., 2021).

У багатьох інших штамів, таких як певні гриби роду *Candida*, спостерігаються деякі недоліки щодо продукції рибофлавіну. У випадку *C. famata* ATCC 20849, наприклад, якому властивий високий потенціал біосинтезу, спостерігається надмірна чутливість до наявності заліза, що ускладнює процес ферментації. Навіть за умов дефіциту феруму максимальні кількості рибофлавіну, які виробляє дріжджовий штам *C. famata*, становлять від 560 мг/л до 7,5 г/л (Heefner та ін., 1993). Аналогічно у штаму *Pichia guilliermondii* біосинтез вітаміну B₂ індукується зниженням вмісту заліза в середовищі (Abbas, & Sibirny, 2011). При внесенні плазміди, яка містить 6 генів, що відповідають за біосинтез рибофлавіну, до штаму *E. Coli* BL21 спостерігався вихід рибофлавіну на рівні 657,38±47,48 мг/л (Fu та ін., 2024).

Штами *B. subtilis*, в тому числі *B. subtilis* KU559874, *Bacillus tequilensis* KU559876, і *B. subtilis* VKPM-B 6797, демонструють високий потенціал для виробництва рибофлавіну за рахунок біосинтезу прекурсорів рибофлавіну, але підвищення продукції рибофлавіну досягається лише за умови отримання мутантів з надмірною експресією окремих генів та стійкістю до пуринових аналогів (Perkins та ін., 1999; Lee та ін., 2004; Paracchini та ін., 2017). Штам *B. subtilis* VKPM-B 6797,

до прикладу, був отриманий з мутантного *B. subtilis* RK6121, стійкого до 8-азагуаніну, метіонін сульфоксиду, діацетилу та психофураніну, що містив додатково плазмиду з мутованим опероном рибофлавіну (Perkins та ін., 1999). Це вимагає додаткових витрат для створення штаму з необхідними характеристиками та значно затягує виробничий процес, що може завдавати компанії збитків.

Комерційне ферментативне виробництво рибофлавіну природним чином здійснюється флавіногенними аскоміцетами, такими як *E. ashbyi* та *E. gossypii*. Обидва мікроорганізми накопичують вітамін B₂ наприкінці фази росту в міцелії, надаючи їй яскраво-жовтого забарвлення (Aguilar та ін., 2002). Серед переваг наведених штамів варто виділити те, що *E. gossypii* є більш стабільним у здатності продукувати високі рівні рибофлавіну, в той час як *E. ashbyi* характеризується надмірним біосинтезом ФАД (Kalingan, & Liao, 2002), що робить цей штам конкурентоспроможним на ринку фармацевтичної продукції (Shimizu, 2001; Abbas, & Sibirny, 2011). Окрім того, штами *E. gossypii* можуть бути використані для біосинтезу промислово значущих метаболітів, таких як фолати, біоліпіди та монотерпени завдяки бродінню на відходах агропромисловості, які використовуються як джерело вуглецю (Muñoz-Fernández та ін., 2024).

Порівняно з іншими мікроорганізмами, які потенційно можуть бути використані для виробництва рибофлавіну, *E. gossypii* та *E. ashbyi* володіють набагато кращими параметрами. Наприклад, *E. gossypii* може виробляти рибофлавін у концентраціях більше 13 г/л (Lee та ін., 2004), а у *E. ashbyi* вихід рибофлавіну можна збільшити до 5 г/л шляхом генетичної модифікації та оптимізації поживного середовища.

У флавіногенних організмах для синтезу однієї молекули рибофлавіну необхідні одна молекула гуанозинтрифосфату (ГТФ) та дві молекули рибулозо-5-фосфату. Шлях біосинтезу рибофлавіну починається з ГТФ, що піддається перетворенню ферментом ГТФ-циклогідролазою II. На цьому етапі відбувається розкриття імідазольного кільця та гідролітичне вивільнення неорганічного пірофосфату з бічного ланцюга рибозної частини ГТФ. Реакція закінчується утворенням 2,5-діаміно-6-рибозиламіно-4(3Н)-піримідинон 5'-фосфату (рис. 1) (Zhang та ін., 2021).

2,5-Діаміно-6-рибозиламіно-4(3Н)-піримідинон-5'-фосфат (ДАРПФ) перетворюється на 5-аміно-6-рибітіламіно-2,4(1Н, 3Н)-піримідиндіон-5'-фосфат через дві послідовні реакції: відновлення та дезамінування. Послідовність цих реакцій відрізняється серед мікроорганізмів: у грибів рибозильний ланцюг ДАРПФ спочатку відновлюється до рибітілового ланцюга, після чого йде етап дезамінування. В еубактерій ДАРПФ спочатку дезамінується до 5-аміно-6-рибозиламіно-2,4(1Н, 3Н)-піримідиндіон 5'-фосфату, а рибофуранозна частина проміжного продукту відновлюється. Отже, порядок реакцій відновлення та де-замінування протилежний у грибів і бактерій (Zhang та ін., 2021).

Подальші реакції включають дефосфорилювання до 5-аміно-6-рибітіламіно-2,4(1Н, 3Н)-піримідиндіону за допомогою неспецифічної фосфатази. Нещодавно виявлено, що галогенацидгалогеназа каталізує це дефосфорилювання у *B. subtilis*, *E. coli* та *Bacteroides thetaiotaomicron* (London, 2015), виконуючи функцію неспецифічної фосфатази. Інший субстрат (рибулозо-5-фосфат) може бути перетворений на 3,4-дигідрокси-2-бутанон-4-фосфат (ДГБФ) шляхом перебудови карбонового скелета під час дії ДГБФ-синтази (Zhang та ін., 2021).

Лумазинсинтаза, або β -ланцюг рибофлавінсинтази, каталізує конденсацію АрП з ДГБФ з утворенням 6,7-диметил-8-рибітіламазину, який може бути остаточно перетворений на рибофлавін та АрПФ через дисмутацію, каталізовану рибофлавінсинтазою. Продукт АрПФ може бути повторно використаний для біосинтезу іншої молекули рибофлавіну (Zhang та ін., 2021; Bacher та ін., 2000).

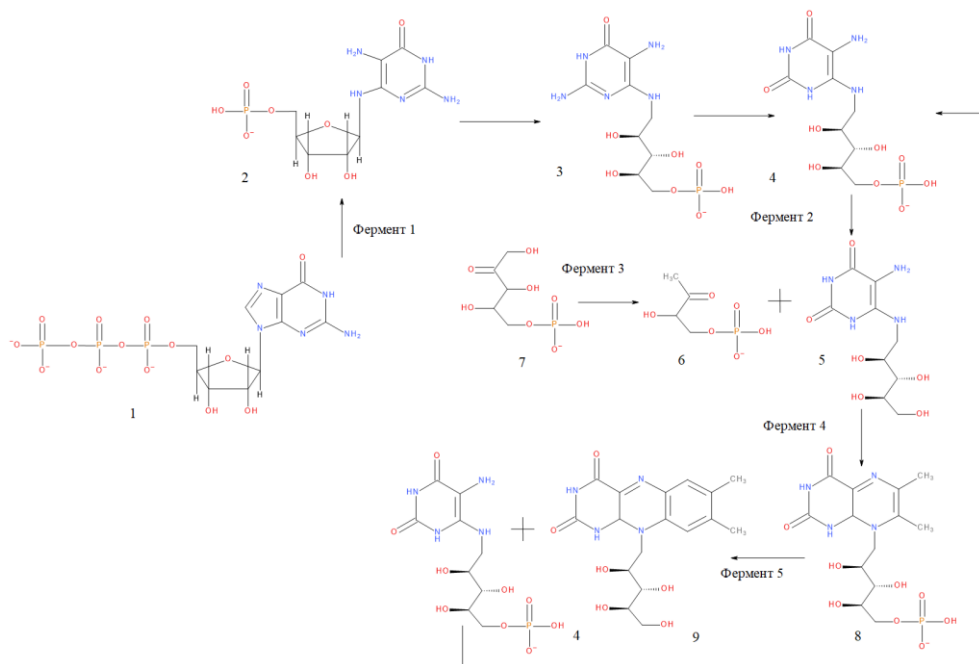


Рис. 1. Біосинтетичний шлях рибофлавіну у грибів. Сполуки: 1 — гуанозинтрифосфат (ГТФ); 2 — 2,5-діаміно-6-рибозиламіно-4(3Н)-піримідин-5'-фосфат (ДАРПФ); 3 — 2,5-діаміно-5-рибітіламіно-4(3Н)-піримідин-5'-фосфат; 4 — 5-аміно-6-рибітіламіно-2,4(1Н,3Н)-піримідинедіон-5'-фосфат (АрПФ); 5 — 5-аміно-6-рибітіламіно-2,4(1Н,3Н)-піримідинедіон (АрП); 6 — рибулоз-5-фосфат; 7 — 3,4-дигідрокси-2-бутанон-4-фосфат (ДГБФ); 8 — 6,7-диметил-8-рибітіллімазин; 9 — рибофлавін. Ферменти: 1 — ГТФ-циклогідролаза II; 2 — неспецифічна фосфатаза; 3 — ДГБФ-синтаза; 4 — лумазинсинтаза; 5 — рибофлавінсинтаза (сформовано на основі (Zhang та ін., 2021))

Особливості бактеріальних метаболічних шляхів біосинтезу рибофлавіну між *B. subtilis*, *C. acetobutylicum* та *E. coli*: у *B. subtilis* біосинтез рибофлавіну контролюється рибофлавін-біосинтетичним опероном (rib опероном), що містить п'ять генів (ribGBANT), які кодують ферменти, необхідні для біосинтезу рибофлавіну. Регуляція біосинтезу рибофлавіну відбувається за участю регуляторних областей, таких як *ribC*, *ribR* та *ribO*, а також регуляторних послідовностей на опероні. Рациональна модифікація шляху глюконеогенезу спрямована на збільшення доступності прекурсорів для біосинтезу рибофлавіну (Mironov та ін., 1994; Srivastava та ін., 2018; Kil та ін., 1992); у *C. acetobutylicum* (хоча механізм біосинтезу рибофлавіну ще не настільки детально вивчений) додаткове джерело сировини, таке як

натрієва сіль оцтової кислоти (NaAc), може стимулювати продукцію рибофлавіну (Zhao та ін., 2016); у *E. coli* генетичні модифікації спрямовані на збільшення експресії генів, які кодують ферменти, необхідні для біосинтезу рибофлавіну (Lin та ін., 2014).

Промисловий біосинтез рибофлавіну в аскоміцетів є складним процесом як всередині, так і за межами клітини: багатокомпартментний біосинтез, що охоплює β -окислення жирних кислот у пероксисомах через цикл трикарбонових кислот (ЦТК) у мітохондріях до термінального біосинтезу рибофлавіну в цитозолі, може відбуватись тільки за рахунок багатого на поживні речовини середовища, що містить рослинну олію, дріжджовий екстракт, а також додатково гліцин і глутамат (Schwechheimer та ін., 2018).

Біосинтез вітаміну B₂ у *E. gossypii* відомий тим, що починається під час стаціонарної фази одночасно зі споруляцією, коли швидкість росту знижується (Kalingan, & Liao, 2002). Як правило, схожа кінетика виробництва спостерігається під час мікробного синтезу вторинних метаболітів, але не первинних. Тому рибофлавін у *E. gossypii* вважається псевдовторинним метаболітом. Флавіногенна активність *E. gossypii* значно залежить від температури культивування, знижуючись при 38 °C. Існує припущення, що при підвищених температурах активується специфічний репресор біосинтезу рибофлавіну, хоча прямих доказів наразі немає (Demail, 1972). У *E. ashbyi* перехід від фази росту до фази біосинтезу вітаміну B₂ супроводжується дерепресією ГТФ-циклогідролази II і ФАД-синтетази, тоді як активність рибофлавінсинтази майже не змінюється (Koltun та ін., 1984). У *E. gossypii* фаза біосинтезу характеризується сильним збільшенням транскрипції кількох генів, відповідальних за продукцію рибофлавіну (rib3, rib4 і rib5, але не rib2 і rib7), а також багатьох інших генів, залучених до транскрипції, трансляції, мембранного транспорту, архітектури клітини та метаболізму (Abbas, & Sibirny, 2011). Механізми, що беруть участь у переході від фази росту до фази виробництва та в індукції синтезу вітаміну, а також природа індукторів надсинтезу залишаються невідомими. Було висунуто гіпотезу, що деякі стресові фактори, які накопичуються під час припинення росту, сприяють активації транскрипції та виробництву рибофлавіну (Schlösser та ін., 2007).

Рибофлавін синтезується *de novo* з гуанозин-5-трифосфату та рибулозо-5-фосфату. Надмірне продукування рибофлавіну викликається впливом стресових факторів навколишнього середовища, таких як харчовий та оксидативний стрес. Поряд з індукцією надпродукції та секреції рибофлавіну, оксидативний стрес також індукує активність ферментів, які беруть участь у детоксикації реактивних форм кисню, наприклад, каталази та супероксиддисмутази (Kalingan, & Liao, 2002).

Було висунуто припущення, що секреція великих кількостей рибофлавіну може функціонувати як можливий захисний механізм проти вільних радикалів. AgYap1p, транскрипційний фактор, який відіграє головну роль у спрямуванні клітинних відповідей на різні стреси, регулює експресію гена ribR і опосередковує залежне від AgYap1p збільшення виробництва рибофлавіну під час впливу реактивних форм кисню. AgYap1p також регулює експресію ribC та gsh1 (гена, що кодує γ -глутамілцистеїнову синтазу, фермент, що обмежує швидкість у біосинтезі глутатіону, який бере участь в антиоксидантному захисті), які також показали підвищену експресію у відповідь на оксидативний стрес (Kalingan, & Liao, 2002).

Ці докази свідчать про те, що надпродукція рибофлавіну в аскоміцетів пов'язана з регуляторними механізмами, а не з метаболічними можливостями.

З іншого боку, ізоцитратліаза — перший фермент, унікальний для гліоксилатного метаболічного шляху (який дає змогу використовувати рослинну олію як джерело карбону), каталізує розщеплення ізоцитрату до гліоксилату та сукцинату, відводячи ізоцитрат через шлях збереження вуглецю і, отже, минаючи його утилізацію в окислювальному трикарбоновому циклі. Кінцевим результатом його анаплеротичної дії (Kalingan, & Liao, 2002; Stahmann та ін., 2000) є чисте перетворення жирів на вуглеводи. Оскільки попередники рибофлавіну, ГТФ і рибулозо-5-фосфат походять від метаболізму вуглеводів, гліоксилатний цикл відіграє важливу роль у зростанні та синтезі рибофлавіну гриба з використанням рослинної олії як єдиного джерела вуглецю.

Проте для підвищення ефективності створення надпродуцента варто проводити додатковий мутагенез для змін властивостей диких штамів. Ультрафіолетове випромінювання є ефективним засобом для створення мутантних надпродуцентів рибофлавіну через його здатність викликати мутації в ДНК мікроорганізмів. Ці мутації можуть змінювати активність генів, що контролюють біосинтез рибофлавіну, і таким чином збільшувати його виробництво. УФ-обробка сприяє підвищенню генетичної різноманітності штамів, що є важливим для селекції штамів з бажаними характеристиками, а також може допомогти відбирати штами, які є стійкими до стресових умов і більш продуктивними в промислових умовах. Мутантні штами, отримані в результаті УФ-обробки, можуть мати оптимізовані метаболічні шляхи, що дає змогу ефективніше використовувати доступні ресурси для синтезу рибофлавіну, знижуючи витрати на виробництво та підвищуючи його рентабельність.

Ізоцитратліаза КФ 4.1.3.1 — фермент, що відноситься до класу ліаз. Відповідає за розщеплення проміжного продукту циклу трикарбонових кислот ізоцитрату на сукцинат і гліоксилат (рис. 2).

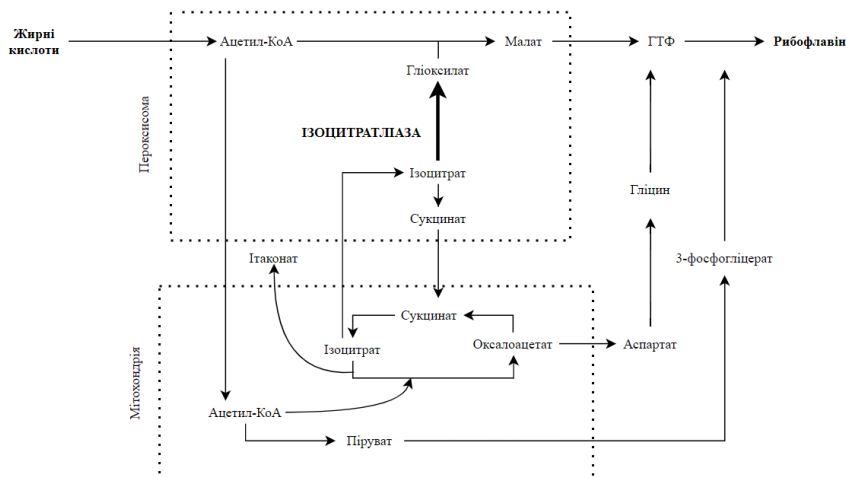


Рис. 2. Один з можливих варіантів впливу ізоцитратліази на біосинтез рибофлавіну (сформовано авторами на основі (Kanamasa та ін., 2007))

Антиметаболіти ізоцитратліази, зокрема таконат та оксалат, здатні інгібувати її активність, а мутанти, стійкі до ітаконату, виробляють підвищені рівні рибофлавіну завдяки перенаправленню потоку карбону з циклу Кребса через гліоксилатний шунт. Цей перерозподіл стає можливим завдяки використанню рослинної олії як єдиного джерела вуглецю. Ізоцитратліаза здатна каталізувати розщеплення ізоцитрату до гліоксалату та сукцинату, що забезпечує відведення ізоцитрату через карбон-зберігаючий шлях і, відповідно, захищає його від використання у циклі Кребса. Оскільки попередниками рибофлавіну є ГТФ (рис. 3), гліоксилатний шунт відіграє важливу роль у біосинтезі вітаміну В₂ через виведення продуктів діяльності ізоцитратліази з циклів перетворення вуглеводів.

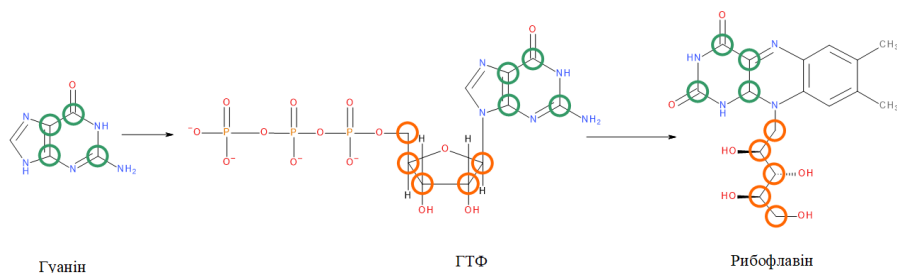


Рис. 3. Структура рибофлавіну, ГТФ і гуаніну. ГТФ є донором дев'яти з десяти атомів вуглецю; гуанін повністю входить в склад рибофлавіну (через ГТФ). Тільки ксиленове кільце складається з вуглецю іншого від ГТФ походження (сформовано авторами на основі (Schwechheimer та ін., 2018))

Метою статті є аналіз ефективності відбору надпродуцентів рибофлавіну серед диких штамів аскоміцетів *E. gossypii* та *E. ashbyi* та порівняльна оцінка виходу рибофлавіну в результаті цього відбору.

Матеріали і методи. Аналіз проводився на основі опублікованих наукових праць у сфері створення надпродуцентів рибофлавіну *E. gossypii* та *E. ashbyi* шляхом вирощування диких штамів на поживних середовищах з додаванням антиметаболітів ферменту ізоцитратліази. Для пошуку наукової літератури використовувався системний підхід, який включав декілька етапів: формулювання ключових слів і запитів, таких як «*Eremothecium gossypii* riboflavin overproduction», «*Eremothecium ashbyi* metabolic engineering», «isocitrate lyase inhibitors», «riboflavin biosynthesis pathways», «industrial microbiology of flavins». Основними джерелами інформації були бази даних PubMed Central®, NCBI, Microbiology Society, SpringerLink та Elsevier ScienceDirect. Зібрані статті проходили скринінг за критеріями актуальності, новизни та відповідності темі дослідження. Публікації обиралися за наявністю детального опису метаболічних шляхів біосинтезу рибофлавіну, експериментальних даних, цитування. Обрані матеріали групувалися за темами і надалі інформація з них подавалась у пропонованій статті з відповідними посиланнями. Проведений пошук літератури дав змогу провести глибокий аналіз метаболічних процесів і перспектив інженерії штамів *Eremothecium*, спрямованих на створення надпродуцентів рибофлавіну.

Викладення основних результатів дослідження. Регуляція метаболічних шляхів через внесення антиметаболітів — структурних аналогів природних метаболітів, що пригнічують метаболічні реакції, використовується для пошуку лімітуючих етапів біосинтезу та методів їх подолання за рахунок розвитку стійкості штамів до антиметаболітів (Schmidt та ін., 1996; Park та ін., 2007; Tajima та ін., 2009). Антиметаболіти, такі як туберцидин, який блокує біосинтез пурину в *S. famata*, а ітаконат і оксалат, що інгібує ізоцитратліазу у *E. gossypii*, використовуються для відбору надпроцентів серед аскоміцетів *Ermothecium* (Stahmann та ін., 2000; Park та ін., 2007; Tajima та ін., 2009; Aguiar та ін., 2015). Отже, резистентність до оксалатів знижує експресію альдозоредуктази та метіонінсинтази, що дає змогу штаму внутрішньоклітинно накопичувати гліцин. Надмірна експресія малатсинтази з генетично немодифікованого стійкого до оксалатів штаму AgOXA50 *E. gossypii* на середовищі з оксалатом збільшила вихід рибофлавіну в п'ять разів (Sugimoto та ін., 2009). Мутантні штами, які давали яскраво-жовтий колір при вирощуванні на середовищі з ітаконатом, здатні продукувати на 15% більше ферменту та в 25 разів більше рибофлавіну (Sanchez, & Demain, 2008).

Початок створення мутантних штамів включає дію на спори ультрафіолетового випромінювання або хімічних мутагенів, після чого проводиться посів на спеціально підготовлені агаризовані середовища з додаванням ітаконату. Утворені колонії, які мають характерне жовте забарвлення, свідчать про продукцію рибофлавіну, і вони далі піддаються культивуванню на середовищі з високим вмістом ліпідів за умов лімітування джерелу карбону, внаслідок чого відбувається підвищений синтез рибофлавіну.

Сучасні підходи, що включають генетичні маніпуляції та додавання спеціальних компонентів до середовища, призвели до значного підвищення продукції рибофлавіну в цих організмах. Таким чином було досягнуто збільшення виходу рибофлавіну до 135% (3,8 г/л) у *E. gossypii* порівняно з немодифікованим штамом (Althofer, & Revuelta, 2005). Додавання гліцину та гіпоксантину, які є попередниками ГТФ, також призвело до підвищення виробництва рибофлавіну у *E. gossypii* дикого типу (Monschau та ін., 1998). Для збільшення виходу рибофлавіну втричі, було використано оброблені ультрафіолетовим випромінюванням спори *E. gossypii*. Додавання активованої відбілюючої землі, яка містила 75 г/л ріпакової олії, та збагаченого киснем повітря, до культури мутованого штаму *E. gossypii* ZP4 підвищило концентрацію рибофлавіну до 8,7 г/л після 5 днів культивування (Park та ін., 2007). Використання генетичних методів та оптимізація поживного середовища дали змогу отримати штами *E. gossypii* з продукцією рибофлавіну на рівні 13,7 г/л (Park та ін., 2011).

Метод створення надпродуцента вітаміну B₂ у дослідженні з *E. gossypii* при культивуванні стійкого до ітаконату мутанта на соєвій олії, підвищив специфічну активність ферменту ізоцитратліази на 15% та збільшив вихід рибофлавіну в 25 разів порівняно з диким штамом. З іншого боку, експерименти з ростом на глюкозі призвели до восьмикратного збільшення виходу рибофлавіну, але показали зменшення специфічної активності ізоцитратліази на 33%. Ці результати підтверджують, що ізоцитратліаза займає одне з ключових місць при надсинтезі рибофлавіну продуцентом *E. gossypii*, коли як субстрат використовується рослинна олія (Schmidt

та ін., 1996). Інокуляти *E. gossypii* ATCC 10895 вирощували на рідкому середовищі, що складалось з 10 г/л дріжджового екстракту і 10 г/л соєвої олії або 10 г/л глюкози відповідно, інкубували при 28 °C на ротаційному шейкері при 120 об/хв, при чому перед автоклавуванням рН середовища доводили до 6,0 за допомогою 1 М HCl. Після вирощування на аналогічному середовищі з додаванням агару, міцелій на 6—8 день культивування покривали розчином 10 мг/мл Novozym 234 (Novo Enzyme Products) та інкубували протягом 1 год за кімнатної температури. Культуральну рідину центрифугували, а осад ресуспендували у воді з подальшим внесенням парафіну для виділення спор, які потім піддавали впливу УФ-випромінювання ($\lambda=260$ нм) протягом 30 с на відстані 20 см від УФ-лампи. Для скринінгу мутантів використовували середовище з додаванням ітаконату такого складу: 10 г/л дріжджового екстракту, 0,05% олеїнової кислоти, 50 мМ ітаконату та 20 г/л агару, вирощували культуру при 30 °C протягом трьох днів. Колонії з жовтим забарвленням далі використовували для оцінки виходу рибофлавіну (Schmidt та ін., 1996).

При дослідженні штаму *E. gossypii* ATCC 10895, що був оброблений N-метил-N'-нітро-N-нітрозогуанідином та мав підвищену активність каталази і стійкість до перекису водню, було визначено, що активність ізоцитратліази в мутантного штаму була вищою в 2,6 раза порівняно з диким штамом. Це свідчить про більш ефективне використання вуглецевого потоку від циклу трикарбонових кислот до гліюксилантного, що призводить до підвищеного виробництва рибофлавіну. Крім того, мутант проявив ушестеро вищу специфічну активність каталази всередині клітин після трьох діб культивування. У присутності 40 мМ пероксиду водню виробництво рибофлавіну зменшилося лише на 16% для мутанта, тоді як для дикого штаму воно спадало на 56% (Tajima та ін., 2009). У цьому дослідженні тижневу культуру, вирощену на середовищі зі складом 30 г/л кукурудзяного екстракту, 10 г/л дріжджового екстракту, 15 г/л ріпакової олії з рН 6,8, було ізольовано та оброблено розчином Зимоласи 20Т з *Arthrobacter luteus* (Seikagaku Co., Токіо, Японія; 15 мг/мл) протягом 30 хв при 37 °C. Отриману суспензію центрифугували, а осад ресуспендували у дистильованій воді з 0,03% розчином Triton X-100. Отримані спори обробляли 1 мг/л N-метил-N'-нітро-N-нітрозогуанідином (MNNG) у буфері ТМ (200 мМ 2-аміно-2 гідроксиметил-1,3-пропандіолу, 170 мМ малеїнової кислоти та 0,03% Triton X-100, рН 8,0) протягом 2 год при 28 °C. Спори промивали і ресуспендували у 5 мл стерильному сольовому розчині. Спори, оброблені MNNG, вирощували на середовищі з 10 г/л дріжджового екстракту та 10 г/л ріпакової олії при 28 °C протягом 6—14 днів. Отримані жовті колонії далі вирощували з метою визначення концентрації виробленого рибофлавіну (Tajima та ін., 2009).

Окисидативний стрес, спричинений підвищенням кількості активних форм кисню (ROS), активує антиоксидантні системи, такі як глутатіонредуктаза, що стабілізує метаболізм клітини. Підвищений рівень ROS у мутантних штаммах корелює зі збільшенням активності ключових ферментів, зокрема ацетолактатсинтази, активність якої більша у 25 разів порівняно з дикими штамми. З іншого боку, ацетолактатсинтаза є чутливою до зворотного інгібування валіном, наприклад, додавання валіну до середовища знижує ріст *E. gossypii* і синтез рибофлавіну на 50%. Це відбувається через блокування ферментативної активності ацетолактатсинтази, яка відповідає за синтез валіну, лейцину та ізолейцину шляхом каталізу кон-

денсації двох молекул пірувату (для валіну та лейцину) або однієї молекули пірувату з α -кетобутиратом (для ізолейцину), утворюючи відповідно 2-ацетолактат і 2-ацето-2-гідроксибутират. Це підтверджує важливість балансу даних амінокислот у середовищі: додавання валіну, лейцину та ізолейцину разом підвищує синтез рибофлавіну в мутантному штамі у 2,5 рази (Kato, та ін., 2023).

В іншому дослідженні стійкий до оксалату штам гриба *E. gossypii* був природно виявлений серед спор, вирощених на середовищі з додаванням оксалату на оптимізованому для підвищеного виробництва рибофлавіну. Виробництво рибофлавіну стійким до антиметаболіту штамом було втричі вище, ніж у дикого при культивуванні в колбах. Після оптимізації складу середовища вихід рибофлавіну збільшився до 5 г/л, що в п'ять разів вище, ніж у дикого штаму (Sugimoto та ін., 2009b). Культуру засівали на агаризованому середовищі зі складом 10 г/л дріжджового екстракту та 10 г/л глюкози, інкубували при 28 °C протягом тижня. Міцелій суспендували в дистильованій воді, після чого руйнували клітинну стінку додаванням 0,2% зимолази 20T і витримували 30 хв при 37 °C. Після центрифугування суспензії осаджені клітини висівали на середовище з аналогічним складом, але з додаванням 50 мМ оксалату натрію. Отримані яскраво-жовті колонії, стійкі до дії оксалату, далі пересівали на середовища з кукурудзяним і дріжджовим екстрактами та рапсовою олією (Sugimoto та ін., 2009b).

У випадку пригнічення інших ферментів, що беруть участь у гліоксилатному циклі, наприклад, малатсинтази, спостерігається зниження виробництва рибофлавіну в 10 разів, а споживання рослинної олії — вдвічі. Навпаки, стимуляція гену ACR268C, що кодує малатсинтезу, призводить до вищої активності ферменту і до збільшення виходу вітаміну B₂ в 1,7 рази. Результати в цьому випадку досягались за рахунок введення *E. gossypii* плазмиди з геном ACR268C і геном стійкості до канаміцину. Як наслідок, спостерігалось як збільшення активності малатсинтази, так і підвищений біосинтез рибофлавіну (Sugimoto та ін., 2009).

Результати досліджень свідчать про ефективність використання регуляції активності ізоцитратліази шляхом вирощування продуцента *E. gossypii* на середовищі з додаванням ітаконату або оксалату для збільшення виходу рибофлавіну до 25 разів через перенаправлення вуглецевого потоку з циклів обміну вуглеводів до біосинтезу вітаміну B₂. Метаболічна регуляція біосинтезу рибофлавіну у *E. ashbyi* наразі недостатньо досліджена. Більшість модифікацій стосуються оптимізації поживного середовища, що призводить до збільшення виходу на 18% при вирощуванні з додаванням арахісової макухи (Kalingan, & Liao, 2002); на середовищі з внесенням соняшникового шроту вихід рибофлавіну збільшується в 4 рази порівняно з вихідним штамом (Stetsenko та ін., 2021). Також спостерігалась тенденція використовувати генетичну інженерію для внесення генів *rib1* і *rib3*, що були сконструйовані з використанням геномної бібліотеки *E. gossypii*, що призвело до збільшення виходу рибофлавіну в 2,44 рази (Sengupta та ін., 2012). Отже, розробка методу метаболічної регуляції шляхом вирощування стійких до антиметаболітів колоній, зважаючи на успіх експериментів у культури *E. gossypii*, для штамів *E. Ashbyi* залишається актуальною і сьогодні.

Висновки

Метаболічні шляхи синтезу рибофлавіну у флавіногенних організмах виявляють суттєві відмінності. У грибів і дріжджів шлях синтезу рибофлавіну включає використання вуглеводів та амінокислот, що знаходяться у середовищі, тоді як у бактерій *E. coli* та *B. subtilis* біосинтез рибофлавіну контролюється генетичними шляхами, що залежать від доступності прекурсорів і регуляторних механізмів. Виробництво рибофлавіну у штамів грибів, зокрема у *E. gossypii* та *E. ashbyi*, є найефективнішим, з виходом понад 15 г/л, порівняно з іншими мікроорганізмами.

Рослинна олія та дріжджовий екстракт є головними донорами карбону та азоту для біосинтезу рибофлавіну у грибів роду *Eremothecium*. Рослинна олія слугує основним джерелом вуглецю завдяки вуглецевому потоку через шляхи β -окиснення жирних кислот і циклу трикарбонових кислот. Водночас дріжджовий екстракт, який містить протеїни, нуклеотиди та цукри, слугує важливим джерелом нітрогену та вуглецю для синтезу рибофлавіну. Це підтверджується дослідями з міченим карбоном, де демонструється використання його компонентів для формування рибофлавіну на ранніх стадіях накопичення вітаміну. Деякі атоми вуглецю у рибофлавіні були взяті з ГТФ, нуклеотидної складової дріжджового екстракту. Крім того, існує імовірність, що частина вуглецю рибофлавіну може походити від CO_2 , утвореного під час декарбоксилування складових поживного середовища.

Результати описаних досліджень надають можливість вважати перспективним використання мутантних штамів *E. gossypii* та *E. ashbyi* для промислового виробництва рибофлавіну. Штами, отримані при обробці фізичними або хімічними мутагенами, які стійкі до впливу ітаконату або оксалату, мають більший вихід вітаміну B_2 за рахунок перенаправлення потоку карбону з циклу трикарбонових кислот через гліоксилатний шунт. Так досягається збільшення кількості отриманого рибофлавіну до 25 разів, коли субстратом була рослинна олія. При використанні оксалату як метаболіту концентрація рибофлавіну порівняно з диким штамом зросла в 5 разів і досягла значення 5 г/л. Важливим залишається використання розглянутих методів створення надпродуцентів рибофлавіну для другого комерційного штаму — *E. ashbyi*, який здебільшого використовується у фармацевтичній галузі для біосинтезу ФАД.

Література

- Abbas, C. A., & Sibirny, A. A. (2011). Genetic control of biosynthesis and transport of riboflavin and flavin nucleotides and construction of robust biotechnological producers. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 75(2), 321—360. <https://doi.org/10.1128/mbr.00030-10>.
- Aguiar, T. Q., Silva, R., & Domingues, L. (2015). *Ashbya gossypii* beyond industrial riboflavin production: A historical perspective and emerging biotechnological applications. *Biotechnology Advances*, 33(8), 1774—1786. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.10.001>.
- Althofer, H., Revuelta Doval, J. L. (2005). Genetic strain optimization for improving the production of riboflavin (Patent US2005/0239161A1).
- Averianova, L. A., Balabanova, L. A., Son, O. M., Podvolotskaya, A. B., & Tekutyeva, L. A. (2020). Production of vitamin B_2 (riboflavin) by microorganisms: An overview. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.570828>.
- Babyak, L. Y., Bacher, A., Boretskyy, Y. R., Demchyshyn, V. V., Eberhardt, S., & Fedorovych, D. (2002). *Riboflavin Production* (Patent № US6376222).

- Bacher, A., Eberhardt, S., Fischer, M., Kis, K., & Richter, G. (2000). Biosynthesis of vitamin B₂ (riboflavin). *Annual Review of Nutrition*, 20(1), 153—167. <https://doi.org/10.1146/annurev.nutr.20.1.153>.
- Bano, D., & Prehn, J. H. M. (2018). Apoptosis-Inducing Factor (AIF) in Physiology and Disease: The Tale of a Repented Natural Born Killer. *EBioMedicine*, 30, 29—37. <https://doi.org/10.1016/j.ebiom.2018.03.016>.
- Choudhury, N. R. (2023). Riboflavin pigment market size, share & outlook by 2033 | FMI. Future Market Insights Inc. https://www-futuremarketinsights-com.translate.goog/reports/riboflavin-pigment-market?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=ru&_x_tr_hl=ru&_x_tr_pto=sc.
- Couto, N., Wood, J., & Barber, J. (2016). The role of glutathione reductase and related enzymes on cellular redox homeostasis network. *Free Radical Biology and Medicine*, 95, 27—42. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2016.02.028>.
- Demain, A. L. (1972). Riboflavin Oversynthesis. *Annual Review of Microbiology*, 26(1), 369—388. <https://doi.org/10.1146/annurev.mi.26.100172.002101>.
- Fu, B., Chen, M., Bao, X., Lu, J., Zhu, Z., Guan, F., Yan, C., Wang, P., Fu, L., & Yu, P. (2024). Site-directed mutagenesis of bifunctional riboflavin kinase/FMN adenylyltransferase via CRISPR/Cas9 to enhance riboflavin production. *Synthetic and Systems Biotechnology*, 9(3), 503—512. <https://doi.org/10.1016/j.synbio.2024.04.011>.
- Guengerich, F. P. (2003). Cytochromes P450, drugs, and diseases. *Molecular Interventions*, 3(4), 194—204. <https://doi.org/10.1124/mi.3.4.194>.
- Heefner, D. L., Boyts, A., Burdzinski, L., Yarus, M. (1993). *Efficient Riboflavin Production With Yeast*. (Patent US5231007).
- Hoppel, C. L., & Tandler, B. (1975). Riboflavin and mouse hepatic cell structure and function. mitochondrial oxidative metabolism in severe deficiency states. *The Journal of Nutrition*, 105(5), 562—570. <https://doi.org/10.1093/jn/105.5.562>.
- Jiadhong, K., Fauzia, A. N., Yamaguchi, N., & Ueda, A. (2023). Exogenous riboflavin (vitamin B₂) application enhances salinity tolerance through the activation of its biosynthesis in rice seedlings under salinity stress. *Plant Science*, 111929. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2023.111929>.
- Kalingan, A. E., & Liao, C.-M. (2002). Influence of type and concentration of flavinogenic factors on production of riboflavin by *Eremothecium ashbyii* NRRL 1363. *Bioresource Technology*, 82(3), 219—224. [https://doi.org/10.1016/s0960-8524\(01\)00194-8](https://doi.org/10.1016/s0960-8524(01)00194-8).
- Kanamasa, S., Tajima, S., & Park, E. Y. (2007). Isocitrate dehydrogenase and isocitrate lyase are essential enzymes for riboflavin production in *Ashbya gossypii*. *Biotechnology and Bioengineering*, 12(2), 92—99. <https://doi.org/10.1007/bf03028632>.
- Kato, T., Kano, M., Yokomori, A., Azegami, J., El Enshasy, H. A., & Park, E. Y. (2023). Involvement of a flavoprotein, acetohydroxyacid synthase, in growth and riboflavin production in riboflavin-overproducing *Ashbya gossypii* mutant. *Microbial Cell Factories*, 22(1). <https://doi.org/10.1186/s12934-023-02114-1>.
- Kil, Y. V., Mironovi, V. N., Gorishin, I. Y., Kreneva, R. A., & Perumov, D. A. (1992). Riboflavin operon of *Bacillus subtilis*: Unusual symmetric arrangement of the regulatory region. *Molecular and General Genetics MGG*, 233(3), 483—486. <https://doi.org/10.1007/bf00265448>.
- Klein, V. J., Brito, L. F., Perez-Garcia, F., Brautaset, T., & Irla, M. (2023). Metabolic engineering of thermophilic *Bacillus methanolicus* for riboflavin overproduction from methanol. *Microbial Biotechnology*. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.14239>.
- Kodali, V. K., & Thorpe, C. (2010). Oxidative protein folding and the quiescin-sulfhydryl oxidase family of flavoproteins. *Antioxidants & Redox Signaling*, 13(8), 1217—1230. <https://doi.org/10.1089/ars.2010.3098>.
- Koltun, L. V., Shavlovskii, G. M., Kashchenko, V. E., & Trach, V. M. (1984). Changes in the enzyme activity of flavinogenesis in the process of culturing the fungus *Eremothecium ashbyii*. *Mikrobiologiya*, 53(1), 43—47.
- Leathers, T. D., & Gupta, S. C. (1997). Xylitol and riboflavin accumulation in xylose-grown cultures of *Pichia guilliermondii*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 47(1), 58—61. <https://doi.org/10.1007/s002530050888>.

- Lee, K. H., Park, Y. H., Han, J. K., Park, J. H., Lee, K. H., Choi, H. (2004). *Microorganisms and Process for the Production of Riboflavin by Fermentation* (Patent EP1426450A1).
- Leviton, L. (1946). *Microbiological Production of Riboflavin*. (Patent US2477812).
- Lienhart, W.-D., Gudipati, V., & Macheroux, P. (2013). The human flavoproteome. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 535(2), 150—162. <https://doi.org/10.1016/j.abb.2013.02.015>.
- Lim, S. H., Choi, J. S., & Park, E. Y. (2001). Microbial production of riboflavin using riboflavin overproducers, *Ashbya gossypii*, *Bacillus subtilis*, and *Candida famate*: An overview. *Biotechnology and Bioengineering*, 6(2), 75—88. <https://doi.org/10.1007/bf02931951>.
- Lin, Z., Xu, Z., Li, Y., Wang, Z., Chen, T., & Zhao, X. (2014). Metabolic engineering of *Escherichia coli* for the production of riboflavin. *Microbial Cell Factories*, 13(1). <https://doi.org/10.1186/s12934-014-0104-5>.
- Liu, S., Hu, W., Wang, Z., & Chen, T. (2020). Production of riboflavin and related cofactors by biotechnological processes. *Microbial Cell Factories*, 19(1). <https://doi.org/10.1186/s12934-020-01302-7>.
- London, N., Farelli, J. D., Brown, S. D., Liu, C., Huang, H., Korczynska, M., Al-Obaidi, N. F., Bab-bitt, P. C., Almo, S. C., Allen, K. N., & Shoichet, B. K. (2015). Covalent docking predicts substrates for haloalkanoate dehalogenase superfamily phosphatases. *Biochemistry*, 54(2), 528—537. <https://doi.org/10.1021/bi501140k>.
- Mahabadi, N., Bhusal, A., & Banks, S. W. (2024). Riboflavin deficiency. *StatPearls Publishing*.
- Marshall, K. R., Gong, M., Wodke, L., Lamb, J. H., Jones, D. J. L., Farmer, P. B., Scrutton, N. S., & Munro, A. W. (2005). The human apoptosis-inducing protein AMID is an oxidoreductase with a modified flavin cofactor and DNA binding activity. *Journal of Biological Chemistry*, 280(35), 30735—30740. <https://doi.org/10.1074/jbc.m414018200>.
- Mironov, V. N., Kraev, A. S., Chikindas, M. L., Chernov, B. K., Stepanov, A. I., & Skryabin, K. G. (1994). Functional organization of the riboflavin biosynthesis operon from *Bacillus subtilis* SHgw. *Molecular and General Genetics MGG*, 242(2), 201—208. <https://doi.org/10.1007/bf00391014>.
- Monschau, N., Sahm, H., & Stahmann, K. P. (1998). Threonine aldolase overexpression plus threo-nine supplementation enhanced riboflavin production in *Ashbya gossypii*. *Applied and Environmental Microbiology*, 64(11), 4283—4290. <https://doi.org/10.1128/aem.64.11.4283-4290.1998>.
- Muñoz-Fernández, G., Montero-Bullón, J.-F., Martínez, J. L., Buey, R. M., & Jiménez, A. (2024). *Ashbya gossypii* as a versatile platform to produce sabinene from agro-industrial wastes. *Fungal Biology and Biotechnology*, 11(1). <https://doi.org/10.1186/s40694-024-00186-1>.
- Ohara, A., Benjamim Silva, E., Paula Menezes Barbosa, P., Angelis, D., & Alves Macedo, G. (2016). Yeasts bioproducts prospection from different brazilian biomes. *BAOJ Microbiology*, 2(8).
- Paracchini, V., Petrillo, M., Reiting, R., Angers-Loustau, A., Wahler, D., Stolz, A., Schöning, B., Matthies, A., Bendiek, J., Meinel, D. M., Pecoraro, S., Busch, U., Patak, A., Kreysa, J., & Grohmann, L. (2017). Molecular characterization of an unauthorized genetically modified *Bacillus subtilis* production strain identified in a vitamin B₂ feed additive. *Food Chemistry*, 230, 681—689. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.03.042>.
- Park, E. Y., Ito, Y., Nariyama, M., Sugimoto, T., Lies, D., & Kato, T. (2011). The improvement of riboflavin production in *Ashbya gossypii* via disparity mutagenesis and DNA microarray analysis. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 91(5), 1315—1326. <https://doi.org/10.1007/s00253-011-3325-0>.
- Park, E. Y., Zhang, J. H., Tajima, S., & Dwiarti, L. (2007). Isolation of *Ashbya gossypii* mutant for an improved riboflavin production targeting for biorefinery technology. *Journal of Applied Microbiology*, 103(2), 468—476. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2006.03264.x>.
- Perkins, J. B., Sloma, A., Hermann, T., Theriault, K., Zachgo, E., Erdenberger, T., Hannett, N., Chatterjee, N. P., Williams II, V., Jr, G. R., Hatch, R., & Pero, J. (1999). Genetic engineering of *Bacillus subtilis* for the commercial production of riboflavin. *Journal of Industrial Microbiology and Bio-technology*, 22(1), 8—18. <https://doi.org/10.1038/sj.jim.2900587>.
- Pinto, J. T., & Cooper, A. J. L. (2014). From cholesterologenesis to steroidogenesis: Role of ribofla-vin and flavoenzymes in the biosynthesis of vitamin D. *Advances in Nutrition*, 5(2), 144—163. <https://doi.org/10.3945/an.113.005181>.

Riboflavin Market Size & Share Analysis — Growth Trends & Forecasts. (2024). Market Research Company — Mordor Intelligence™. <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/riboflavin-market>.

Sabry, S. A., Ghanem, K. M., & Ghazlan, H. A. (1993). Riboflavin production by *Aspergillus terreus* from beet-molasses. *Microbiologia*, 9(2), 118—124.

Sanchez, S., & Demain, A. L. (2008). Metabolic regulation and overproduction of primary metabolites. *Microbial Biotechnology*, 1(4), 283—319. <https://doi.org/10.1111/j.1751-7915.2007.00015.x>.

Sathiansathaporn, S., Solé-Porta, A., Baowan, D., Pissuwan, D., Wongtrakongate, P., Roig, A., & Katewongsa, K. P. (2024). Nanoencapsulation of vitamin B₂ using chitosan-modified poly(lactic-co-glycolic acid) nanoparticles: Synthesis, characterization, and in vitro studies on simulated gastrointestinal stability and delivery. *Journal of Food Science*. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.17631>.

Schlösser, T., Wiesenburg, A., Gätgens, C., Funke, A., Viets, U., Vijayalakshmi, S., Nieland, S., & Stahmann, K. P. (2007). Growth stress triggers riboflavin overproduction in *Ashbya gossypii*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 76(3), 569—578. <https://doi.org/10.1007/s00253-007-1075-9>.

Schmidt, G., Stahmann, K. P., Kaesler, B., & Sahn, H. (1996). Correlation of isocitrate lyase activity and riboflavin formation in the riboflavin overproducer *Ashbya gossypii*. *Microbiology*, 142(2), 419—426. <https://doi.org/10.1099/13500872-142-2-419>.

Schrier, M., Smirnova, M., Nemeth, D., Deth, R., & Quan, N. (2025). Flavins and Flavoproteins in the Neuroimmune Landscape of Stress Sensitization and Major Depressive Disorder. *Journal of Inflammation Research*, 18, 681—699. <https://doi.org/10.2147/jir.s501652>.

Schwechheimer, S. K., Becker, J., Peyriga, L., Portais, J.-C., & Wittmann, C. (2018). Metabolic flux analysis in *Ashbya gossypii* using ¹³C-labeled yeast extract: Industrial riboflavin production under complex nutrient conditions. *Microbial Cell Factories*, 17(1). <https://doi.org/10.1186/s12934-018-1003-y>.

Sengupta, S., Kaufmann, A., & Chandra, T. S. (2012). Development of fluorescent reporter tagged RIB gene cassettes for replicative transformation, early expression, and enhanced riboflavin production in *Eremothecium ashbyi*. *Fungal Biology*, 116(10), 1042—1051. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2012.07.008>.

Shastak, Y., Pelletier, W. (2024). Exploring the role of riboflavin in swine well-being: a literature review. *Porcine Health Management*, 10(46). <https://doi.org/10.1186/s40813-024-00399-1>.

Shimizu, S. (2001). Vitamins and related compounds: Microbial production. Y. H. J. Rehm, & G. Reed (ed.), *Biotechnology set* (2 ed., 322—326). Wiley-VCH, Weinheim.

Silva, R., Aguiar, T. Q., Oliveira, R., & Domingues, L. (2018). Light exposure during growth increases riboflavin production, ROS accumulation and DNA damage in *Ashbya gossypii* riboflavin-overproducing strains. *FEMS Yeast Research*. <https://doi.org/10.1093/femsyr/foy114>.

Srivastava, R., Kaur, A., Sharma, C., & Karthikeyan, S. (2018). Structural characterization of ribT from *Bacillus subtilis* reveals it as a GCN5-related N-acetyltransferase. *Journal of Structural Biology*, 202(1), 70—81. <https://doi.org/10.1016/j.jsb.2017.12.006>.

Stahmann, K. P., Revuelta, J. L., & Seulberger, H. (2000). Three biotechnical processes using *Ashbya gossypii*, *Candida famata*, or *Bacillus subtilis* compete with chemical riboflavin production. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 53(5), 509—516. <https://doi.org/10.1007/s002530051649>.

Stetsenko, N., Polishchuk, V., & Dugan, O. (2021). Development of nutrient medium for riboflavin biosynthesis by *Eremothecium ashbyi* ascomycetes. *Technology Audit and Production Reserves*, 6(3(62)), 53—56. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.247266>.

Sugimoto, T., Kanamasa, S., Kato, T., & Park, E. Y. (2009). Importance of malate synthase in the glyoxylate cycle of *Ashbya gossypii* for the efficient production of riboflavin. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 83(3), 529—539. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-1972-1>.

Sugimoto, T., Morimoto, A., Nariyama, M., Kato, T., & Park, E. Y. (2009b). Isolation of an oxalate-resistant *Ashbya gossypii* strain and its improved riboflavin production. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 37(1), 57—64. <https://doi.org/10.1007/s10295-009-0647-3>.

Suryadi, H., Yoshida, N., Yamada-Onodera, K., Katsuragi, T., & Tani, Y. (2000). Characterization of a flavinogenic mutant of methanol yeast *Candida boidinii* and its extracellular secretion of riboflavin.

Journal of Bioscience and Bioengineering, 90(1), 52—56. [https://doi.org/10.1016/s1389-1723\(00\)80033-x](https://doi.org/10.1016/s1389-1723(00)80033-x).

Tajima, S., Itoh, Y., Sugimoto, T., Kato, T., & Park, E. Y. (2009). Increased riboflavin production from activated bleaching earth by a mutant strain of *Ashbya gossypii*. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 108(4), 325—329. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2009.04.021>.

Vandamme, E. J., & Revuelta, J. L. (Ред.). (2016b). *Industrial Biotechnology of Vitamins, Biopigments, and Antioxidants*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. <https://doi.org/10.1002/9783527681754>.

Villa, R. E., Azimonti, G., Bonos, E., Christensen, H., Durjava, M., Dusemund, B., Gehring, R., Glan-dorf, B., Kouba, M., López-Alonso, M., Marcon, F., Nebbia, C., Pechová, A., Prieto-Maradona, M., Rö-he, I., Theodoridou, K., Aquilina, G., Svensson, K., Želježić, D., Pizzo, F. (2024). Safety of a feed ad-ditive consisting of vitamin B₂/riboflavin produced with *Eremothecium ashbyi* CCTCCM 2019833 for all animal species (Hubei Guangji Pharmaceutical Co., Ltd). *EFSA Journal*, 22(11). <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2024.9073>.

Vitamin B₂ market size, share, growth & forecast. (2024). Global Chemical and Petrochemicals, Specialty Chemicals, Elastomer and Rubber, Fertilizer and Feedstock — Latest Chemical Prices, News and Market Analysis | ChemAnalyst. <https://www.chemanalyst.com/industry-report/vitamin-b2-market-3105>.

Vitamin B₂ Prices, News, Monitor, Market Analysis & Demand. (2024). Global Chemical and Petrochemicals, Specialty Chemicals, Elastomer and Rubber, Fertilizer and Feedstock — Latest Chemical Prices, News and Market Analysis | ChemAnalyst. <https://www.chemanalyst.com/Pricing-data/vitamin-b2-1261>.

You, J., Pan, X., Yang, C., Du, Y., Osire, T., Yang, T., Zhang, X., Xu, M., Xu, G., & Rao, Z. (2021). Microbial production of riboflavin: Biotechnological advances and perspectives. *Metabolic Engineering*, 68, 46—58. <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2021.08.009>.

Zhang, J.-R., Ge, Y.-Y., Liu, P.-H., Wu, D.-T., Liu, H.-Y., Li, H.-B., Corke, H., & Gan, R.-Y. (2021). Biotechnological strategies of riboflavin biosynthesis in microbes. *Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.03.018>.

Zhang, X., Wang, M., Gan, C., Ren, Y., Zhao, X., & Yuan, Z. (2023). Riboflavin application delays senescence and relieves decay in harvested strawberries during cold storage by improving antioxidant system. *LWT*, 114810. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114810>.

Zhao, X., Condruz, S., Chen, J., & Jolicoeur, M. (2016). A quantitative metabolomics study of high sodium response in *Clostridium acetobutylicum* ATCC 824 acetone-butanol-ethanol (ABE) fermentation. *Scientific Reports*, 6(1). <https://doi.org/10.1038/srep28307>.

OUTSOURCING AS A TOOL FOR ENHANCING EFFICIENCY IN THE FOOD INDUSTRY ENTERPRISES

D. Simkin, O. Pietukhova

National University of Food Technologies

Key words:

*Outsourcing
Business process
outsourcing
Outsourcing services
Outsourcing activities
Competitiveness
Food industry enterprises*

Article history:

Received 07.01.2025
Received in revised form
23.01.2025
Accepted 13.02.2025

Corresponding author:

O. Pietukhova

E-mail:

ompetukhova@ukr.net

Citation: Сімкін Д. О., Петухова О. М. (2025). Аутсорсинг як інструмент підвищення ефективності діяльності підприємств харчової промисловості. *Наукові праці НУХТ*, 31(1), 57—69.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-1-6

ABSTRACT

The relevance of researching the use of outsourcing lies in the potential to enhance the competitiveness of business entities by optimizing production activities, reducing costs, and focusing on the core functions and activities of the enterprise. The study was conducted to identify the advantages and disadvantages of outsourcing, as well as the effectiveness of transferring certain functions of a food industry enterprise to outsourcing.

The most common forms of outsourcing used by domestic food industry enterprises include outsourcing functions such as the production of certain product components, raw material processing, packaging; ensuring food product quality control, accounting; legal support for enterprise activities; information technology; marketing functions; cleaning and maintenance; and logistics support.

The object of the research was the Ukrainian company PJSC "Lviv Confectionery Factory "Svitoch", one of the largest companies in Ukraine's food industry. The analysis of Svitoch's operations indicates that the most effective use of outsourcing for food industry enterprises includes the production of certain types of food products, the transfer of logistics functions, accounting, marketing activities, and the creation of a network of sales intermediaries to improve product distribution efficiency.

The use of outsourcing services offers significant advantages, including the optimization of production costs for food products, access to specialized laboratories with expensive equipment, and the freeing up of internal resources for the core activities of the enterprise. These benefits enable cost savings, allowing the company to allocate more time and resources to the production of its primary products.

To analyze the effectiveness of outsourcing, a comparison of the company's actual performance metrics before and after its implementation was conducted based on quantitative and qualitative parameters. Specifically, parameters such as the timeliness and completeness of work performed by the outsourcer, the cost-effectiveness of outsourcing, and an integrated efficiency indicator were analyzed. After calculating these parameters, their values were assessed using Harrington's effectiveness scale. The results of the analysis demonstrated the high effectiveness of outsourcing, significantly enhancing the company's competitiveness.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-1-6

АУТСОРСИНГ ЯК ІНСТРУМЕНТ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДІЯЛЬНОСТІ ПІДПРИЄМСТВ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Д. О. Сімкін, О. М. Петухова

Національний університет харчових технологій

Актуальність дослідження використання аутсорсингу обумовлена можливістю підвищити конкурентоспроможність суб'єктів господарювання за рахунок раціоналізації виробничої діяльності, зниження витрат, а також зосередження уваги на головних функціях діяльності підприємства.

Дослідження проводилось з метою визначення переваг і недоліків застосування аутсорсингу, а також ефективності передачі певних функцій підприємства харчової промисловості на аутсорсинг.

Найбільш поширеними формами використання аутсорсингу вітчизняними підприємствами харчової промисловості є передача на аутсорсинг таких функцій, як виробництво певних складових продукції, переробка сировини, її пакування; забезпечення контролю якості харчової продукції; бухгалтерський облік; юридичне забезпечення діяльності підприємства; інформаційних технологій; маркетингових функцій; прибирання і обслуговування; логістичного забезпечення.

Як об'єкт дослідження була обрана українська компанія ПАТ «Львівська кондитерська фабрика «Світоч»», яка є однією із найбільших в Україні компаній у галузі харчової промисловості. Проведений аналіз діяльності компанії «Світоч» свідчить, що для підприємств харчової промисловості найбільш ефективним використанням аутсорсингу є виробництво деяких видів харчової продукції, передача логістичних функцій, ведення бухгалтерського обліку, маркетингова діяльність, створення мережі торговельних посередників для підвищення ефективності збуту продукції.

Використання послуг аутсорсингових організацій надає значні переваги, зокрема забезпечує оптимізацію витрат на виробництво харчової продукції, використання спеціалізованих лабораторій з дорогим обладнанням, вивільнення внутрішніх ресурсів підприємства для основних видів діяльності. Ці переваги дають змогу заощаджувати на витратах, завдяки чому можна виділити більше часу і ресурсів для виробництва основної продукції підприємства.

Аналіз ефективності використання аутсорсингу проводився через порівняння фактичних показників діяльності підприємства до і після впровадження аутсорсингу на основі обраних кількісних та якісних параметрів. Аналізувалися такі параметри, як своєчасність і повнота виконання робіт аутсорсером, економічність аутсорсингу, інтегрований показник ефективності. Після проведення розрахунків значення параметрів аналізувалися за шкалою результативності Харрінгтона. За результатами проведеного аналізу переваг і оцінки ефективності застосування аутсорсингу було доведено його високу ефективність, що значно підвищує конкурентоспроможність підприємства.

Ключові слова: аутсорсинг, аутсорсинг бізнес-процесів, аутсорсингові послуги, аутсорсингова діяльність, конкурентоспроможність, підприємства харчової промисловості.

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвитку вітчизняної економіки українські підприємства намагаються ефективно конкурувати на регіональному, національному та міжнародних ринках. Це змушує впроваджувати нові напрями господарської діяльності та переходити до сучасних бізнес-стратегій.

Для забезпечення успішного господарювання перед українськими підприємствами, зокрема і в харчовій промисловості, виникають проблеми пошуку нових шляхів підвищення ефективності своєї роботи, які відповідатимуть вимогам сучасної ринкової економіки. Одним із таких шляхів є використання аутсорсингу, який може забезпечити підприємству зростання конкурентних переваг. Аутсорсинг дає змогу позбавитися від неголовних для підприємства функцій і процесів, знизити витрати, підвищити прибутковість і зосередитися на пріоритетних видах своєї діяльності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Огляд наукових здобутків зарубіжних вчених з питання оцінки доцільності використання аутсорсингових компаній у сфері харчової промисловості переконливо доводить ефективність аутсорсингу. У наукових дослідженнях зарубіжних вчених наголошується на важливості використання аутсорсингу як одного з найбільш дієвих інструментів підвищення ефективності ведення господарської діяльності для будь-якого підприємства. Особливості використання аутсорсингу провідними міжнародними компаніями та їхні підходи у наданні оцінки доцільності використання аутсорсингових компаній досліджувалися такими зарубіжними науковцями, як Д. Галлімор (Gallimore, 2022), Т. Фрідман (Friedman, 2005), Д. Хейвуд (Хейвуд, 2002) та іншими. Так, Д. Галлімор (Gallimore, 2022) у своїх наукових працях охарактеризував особливості використання аутсорсингу, а також головні переваги і недоліки його використання провідними міжнародними компаніями. У свою чергу Д. Хейвуд (Хейвуд, 2002) проводив дослідження щодо отримання конкурентних переваг на ринку через використання аутсорсингу.

Одним із дискусійних питань, яке піднімалося зарубіжними науковцями, було оцінювання ефективності здійснення аутсорсингових функцій на підприємствах.

Огляд вітчизняної наукової літератури свідчить про недостатнє дослідження проблеми оцінювання ефективності використання аутсорсингу, а також показників ефективності, які впливають на зменшення витрат, зростання обсягів виробництва та реалізації продукції, зростання прибутку, покращення якості продукції тощо. Зокрема, О. Зозульов досліджував вплив аутсорсингу на конкурентоспроможність вітчизняного бізнесу (Зозульов, 2009). С. Цимбалюк дослідив використання аутсорсингових послуг у сфері захисту інформації (Цимбалюк, 2009).

Водночас огляд української наукової літератури свідчить також про недостатнє вивчення проблеми об'єктивного оцінювання ефективності використання послуг аутсорсингових компаній підприємствами харчової промисловості України. Також недостатньо досліджені показники ефективності використання аутсорсингу, які впливають на зменшення витрат, зростання обсягів виробництва та реалізації продукції, зростання прибутку та покращення якості продукції.

Дослідження, проведені багатьма науковцями щодо проблеми сутності аутсорсингу та його ролі у веденні ефективної господарської діяльності, доводить доцільність та ефективність використання надання послуг сторонніми організаціями

непрофільних функцій підприємства (Баранюк, 2020). Однак на сьогодні теоретичні і практичні аспекти використання аутсорсингу на підприємствах, зокрема у сфері харчової промисловості, потребують більш поглибленого вивчення.

На нинішній стадії розвитку вітчизняної економіки ринок аутсорсингових послуг поки що перебуває на етапі формування, тому актуальною проблемою сьогодення є проведення системного аналізу переваг і недоліків, а також надання оцінки використанню аутсорсингових послуг в роботі підприємств харчової промисловості.

Дослідження доцільності використання аутсорсингу слід проводити в розрізі таких основних напрямів, як маркетингова діяльність (маркетинговий аутсорсинг), управління проєктами (проєктний аутсорсинг), управління персоналом (кадровий аутсорсинг), ведення обліку та бухгалтерської звітності (бухгалтерський аутсорсинг), транспортні послуги й технічне обслуговування транспорту (транспортний аутсорсинг), аутсорсинг інформаційних технологій.

Метою статті є проведення аналізу переваг і недоліків застосування аутсорсингу, визначення доцільності й ефективності передачі певних функцій підприємств, що працюють у харчовій промисловості, на аутсорсинг. За результатами проведеного аналізу визначено найбільш значимі переваги і недоліки використання аутсорсингу підприємствами харчової промисловості.

Матеріали і методи. Використовувалися методи теоретичного аналізу, статистичних досліджень, методи експертних оцінок з питання ефективного використання аутсорсингу провідними підприємствами харчової промисловості за період з 2010 по 2023 роки. В результаті проведеного дослідження встановлено головні переваги та недоліки, а також показники оцінки ефективності використання аутсорсингу на підприємствах харчової промисловості.

Дослідження проводилось у такому порядку: розгляд системи недоліків і переваг використання аутсорсингу, які притаманні для підприємств харчової промисловості; аналіз і систематизація показників оцінювання ефективності використання аутсорсингу на підприємстві харчової промисловості.

Для систематизації показників оцінювання ефективності використання аутсорсингу було застосовано метод системного аналізу статистичних даних, а також метод експертних оцінок щодо ефективного використання аутсорсингу провідними підприємствами харчової промисловості.

Викладення основних результатів дослідження. Значимість досліджень у сфері застосування аутсорсингу обумовлена широким використанням аутсорсингових послуг міжнародними суб'єктами господарювання, адже аутсорсинг сприяє раціоналізації управлінської та виробничої діяльності, дає змогу підвищити конкурентоспроможність підприємств, знизити витрати, а також зосередити увагу на головних функціях діяльності підприємства. Головною метою застосування аутсорсингу є підвищення рівня конкурентоспроможності суб'єкта господарювання на основі використання нових технологій, оптимізації виробничих процесів та удосконалення менеджменту компанії. Світовий досвід використання аутсорсингу доводить можливість отримання суттєвих переваг підприємствами, що забезпечує високий рівень конкурентоспроможності та ефективності діяльності.

Визначено, що найбільш поширеними формами використання аутсорсингу підприємствами харчової промисловості є передача таких функцій, як бухгалтерський облік, розрахунок податків, юридичне забезпечення діяльності підприємства, інформаційні системи і керування базами даних, маркетингові комунікації та зв'язки з громадськістю, прибирання й обслуговування, логістичне забезпечення.

Поняття аутсорсингу не є абсолютно новим явищем у світовій економіці. Більшість дослідників стверджують, що аутсорсинг є однією з сучасних форм промислової кооперації, який набув поширення і стрімко розвивається з другої половини XX століття. Так, у Японії у 80-ті роки минулого сторіччя частка підприємств малого та середнього бізнесу, які використовували аутсорсинг, складала до 86% (Зозульов, 2009).

На початок XX століття в країнах Європи аутсорсинг використовували більше 350 тис. підприємств. Загальний обсяг продукції, виробленої аутсорсинговими компаніями лише у 1999 р., перевищив 35 млрд євро, що становило близько 15% усього обсягу продукції, яка випускалася європейськими країнами (Хейвуд, 2002).

Консалтингова компанія Pricewaterhouse Coopers у своєму щорічному дослідженні «The 19th Annual Global CEO Survey» акцентувала увагу на тому, що ключовою причиною швидкого зростання ринку є використання аутсорсингу (The 19th Annual Global CEO Survey, 2016).

Використання послуг аутсорсингових компаній у практичній діяльності підприємств останнім часом дуже поширилось серед багатьох підприємств світу, і причиною цього є не лише зниження витрат, а й низка інших вагомих факторів. За допомогою аутсорсингу можна вирішити проблему кадрового забезпечення, зокрема браку професіоналів, оскільки виникає можливість передавання певних спеціалізованих функцій та/або бізнес-процесів компаніям-аутсорсерам, що спеціалізуються на певних видах діяльності. Така організація діяльності підприємства дає змогу швидше реагувати на турбулентні зміни у бізнес-середовищі, пристосовуватися до них і сконцентрувати власну корпоративну увагу на основних видах діяльності та головних проблемах бізнесу, приділивши більшу увагу інноваційному розвитку, управлінні брендом, кінцевому виробництву продукту компанії.

У найбільш загальному розумінні аутсорсинг полягає у передачі неосновних функцій та/або бізнес-процесів (у т. ч. пов'язаних з ними активів) певного суб'єкта господарювання іншій спеціалізованій фірмі чи професійному підряднику. Більшість вітчизняних і зарубіжних науковців розглядають аутсорсинг як передачу на виконання окремих (як правило, допоміжних) функцій або певних бізнес-процесів іншому підприємству (організації), що спеціалізується на певних видах робіт чи у певній сфері. Тобто основоположним моментом тлумачення використання аутсорсингу є розуміння передачі функцій та/або бізнес-процесів від одного суб'єкта господарювання до іншого.

Економічна сутність та ефективність використання аутсорсингу забезпечується через можливість концентрації всіх ресурсів підприємства (організації) на основному виді діяльності, тоді як другорядні функції перекладаються на аутсорсингові фірми, що спеціалізуються на професійному виконанні тих чи інших робіт. Водночас слід зазначити, що аутсорсинг передбачає передачу аутсорсинговим фірмам не лише певних обов'язків, але й відповідальності, що пов'язана з наданням задекларованих послуг.

У господарстві кожної країни виробництво харчових продуктів відіграє важливу роль для її економіки. Оскільки підприємства харчової промисловості України на сьогодні здійснюють свою діяльність в умовах нестабільності економічної ситуації в країні, а також з огляду на проведення військової агресії росії проти нашої держави, виробництво харчової продукції стає одним із найважливіших питань для вітчизняної економіки, тому для забезпечення підвищення ефективності ведення господарської діяльності українськими підприємствами харчової промисловості актуальним питання є впровадження аутсорсингу. Аутсорсинг є дієвим інструментом в управлінні підприємствами харчової промисловості через високу складність і специфіку, які пов'язані з виробничим процесом і вимагають високу якість готової продукції.

Аутсорсинг на підприємствах харчової промисловості може використовуватися у таких напрямках:

1. Виробництво певних складових асортименту продукції, переробка сировини, пакування продукції тощо.

2. Розширення діяльності підприємства, пов'язаної із закупівлею обладнання, орендою нових приміщень, збільшенням штату працівників.

3. Аутсорсинг логістичних послуг, який може суттєво зменшити витрати на транспортування продукції від складів до пунктів продажу.

4. Аутсорсинг маркетингових функцій підприємства, який надає можливість впровадження ефективних маркетингових стратегій з метою подальшого збільшення продажів і залучення нових клієнтів. Маркетинговий аутсорсинг дає змогу якісно проводити маркетингові дослідження, налагоджувати ефективні маркетингові комунікації, формувати маркетингові стратегії розвитку підприємств.

5. Аутсорсинг бухгалтерських і фінансових послуг, який забезпечує зниження витрат на управління й оподаткування, зокрема у сфері обліку та фінансів, проведення внутрішнього аудиту тощо.

6. Аутсорсинг у сфері ІТ-технологій, що дає змогу зекономити кошти, не створюючи власний ІТ-відділ чи службу, що вимагало б значних фінансових витрат на закупівлю дороговартісного комп'ютерного обладнання й коштовного програмного забезпечення, а також витрат на заробітну плату висококваліфікованих працівників-спеціалістів у ІТ-сфері.

7. Аутсорсинг послуг щодо забезпечення контролю якості харчової продукції підприємства. При цьому підприємства харчової промисловості доручають перевірку безпеки харчових продуктів стороннім лабораторіям, які спеціалізуються на тестуванні якості продукції.

Застосування аутсорсингу підприємствами харчової промисловості доцільно у разі наявних значних виробничих витрат, неможливості забезпечення необхідної якості (що особливо важливо для харчових продуктів), труднощів у закупівлі спеціалізованого виробничого обладнання через його значну вартість, неефективної роботи відділу логістики. Водночас недоцільно використовувати аутсорсинг у разі відсутності надійних аутсорсингових компаній або зниження нижче необхідного рівня оперативності надання послуг компанією-аутсорсером.

Незважаючи на численні переваги, використання аутсорсингу підприємствами харчової промисловості пов'язане з можливістю виникнення цілої низки ризиків, серед яких:

- потенційна можливість зниження ефективності роботи власного персоналу підприємства, ризик втрати необхідного рівня знань і досвіду виконання тих функцій, що були передані фірмі-аутсорсеру. Слід врахувати, що при необхідності відновлення цих функцій можуть бути потрібні значні фінансові, людські і часові затрати;

- ризик банкрутства або недобросовісної діяльності компанії-аутсорсера може спричинити суттєві фінансові втрати, пов'язані з терміновим пошуком нових фірм-аутсорсерів або рішенням взагалі відмовитися від використання аутсорсингу. Це, у свою чергу, потребуватиме додаткових часових витрат на відновлення функцій, які були передані на аутсорсинг через втрату необхідних знань і досвіду власних спеціалістів;

- ризик загрози інформаційній безпеці підприємства. Якщо на аутсорсинг передаються критично важливі для підприємства функції, виникає ймовірність можливого витоку інформації. Такий вид ризику можна знизити шляхом диверсифікації, але разом із тим замовлення аутсорсингу різним фірмам може спричинити зростання витрат;

- ймовірність зниження або втрати контролю над власними ресурсами підприємства через надмірний аутсорсинг;

- ризик зростання вартості та/або зниження якості послуг компаній-аутсорсерів, наслідком чого може виявитись перевищення собівартості переданої на аутсорсинг функції чи відмови від співпраці з даною компанією.

Отже, приймаючи рішення щодо використання аутсорсингу, підприємствам харчової промисловості важливо пам'ятати про необхідність зниження ризиків і ретельно добирати компанії-аутсорсери та чітко прописувати функції, що передаються на аутсорсинг, при укладанні відповідних контрактів. При цьому важливо також приділити увагу зобов'язанням компанії-аутсорсера щодо відповідної якості і своєчасності виконання робіт (надання послуг), а також умовам, при яких можливе дострокове розірвання договорів та угод.

Щодо визначення переваг аутсорсингу, що притаманні для підприємств харчової промисловості, то на основі аналізу міжнародного досвіду використання послуг компаній-аутсорсерів, можна виділити такі:

- оптимізація витрат на виробництво харчової продукції за рахунок передачі на аутсорсинг таких функцій як пакування продукції, зменшити витрат на оплату праці найманих працівників тощо;

- доступ до передових та інноваційних технологій виробництва, зокрема при виробництві складних видів харчової продукції, де необхідно залучення до виробництва спеціалізованих лабораторій;

- вивільнення частини внутрішніх ресурсів, що можуть бути використані для досягнення інших цілей діяльності підприємств харчової промисловості;

- фокусування уваги на основному виді діяльності підприємств при передачі на аутсорсинг таких функцій як логістичне забезпечення, організація і проведення рекламних кампаній, ведення бухгалтерського обліку та сплати податків тощо;

- звільнення підприємств від необхідності придбання, обслуговування та зберігання устаткування й технологій, що забезпечують створення нових видів харчової продукції.

Перед проведенням аналізу ефективності використання аутсорсингу потрібно створити основу для відбору компанії-аутсорсера серед інших аутсорсерів. Потрібну аутсорсингову компанію обирають за певними критеріями, які можуть бути такими:

- рівень якості надання послуг та виконання функцій, які надає аутсорсер;
- надання гарантій інформаційної безпеки аутсорсинговою компанією;
- наявність конкурентних переваг визначеного аутсорсера серед інших аналогічних організацій;
- мінімізація фінансових ризиків, пов'язаних з використанням послуг певної аутсорсингової компанії;
- гарантування безперервного виконання функцій, що передаються на аутсорсинг;
- оцінка загальної вартості наданих послуг компанією-аутсорсером.

Серед зазначених вище критеріїв виділяються ті, які мають найбільшу вагу для певного підприємства харчової промисловості. Водночас, якщо хоча б один з цих критеріїв вказує на неможливість використання аутсорсингу, то така компанія-аутсорсер підприємством-замовником не розглядається взагалі. Найчастіше таким важливим критерієм виявляється інформаційна безпека і безперервність виконання функцій компанією-аутсорсером.

Для проведення аналізу ефективності співпраці з аутсорсинговими фірмами потрібно порівняти показники діяльності підприємства станом до і після використання аутсорсингових послуг. Важливим аспектом при цьому є вибір показників для здійснення такої оцінки. Загалом аналізувати ефективність використання аутсорсингу можна на основі як кількісних, так і якісних параметрів. Кількісні параметри, як правило, відображають вартісні показники діяльності підприємства. Їх прийнято поділяти на абсолютні, за допомогою яких можна проаналізувати відхилення фактичних значень (доходів, прибутку, витрат тощо) від базових величин і відносні, які надають можливість оцінити ефективність використання ресурсів підприємства, його основних засобів, що формує економічний потенціал підприємства. Якісні параметри надають можливість оцінити рівень удосконалення діяльності підприємства, наслідком чого є зростання попиту з боку споживачів і прибутковість підприємства. Отже, ефективність використання аутсорсингу підприємством можна оцінювати на основі таких якісних показників, як покращення технології процесу виробництва продукції, підвищення якості виробленої продукції, зниження частки браку, оптимізація організаційної структури і процесу виробництва тощо.

Аналіз використання аутсорсингу підприємствами харчової промисловості засвідчив значний рівень застосування аутсорсингу переважною більшістю таких компаній. Заслугує на увагу досвід використання аутсорсингу українською компанією ПАТ «Львівська кондитерська фабрика «Світоч»», яка є однією із найбільших в Україні компаній у галузі харчової промисловості. Компанія «Світоч» займається виробництвом кондитерських виробів, зокрема сухого печива, тортів і тістечок тривалого зберігання, какао, шоколаду, цукрових кондитерських виробів, а також чаю та кави. Контрольним пакетом акцій ПАТ «Львівська кондитерська фабрика «Світоч»» володіє швейцарська корпорація «Nestlé».



Рис.1. Система показників оцінки ефективності використання аутсорсингу
(систематизовано авторами на основі (Żeliński, 2008))

Компанія «Світоч» використовує аутсорсинг для виробництва деяких видів своєї харчової продукції на основі укладених угод з пекарнями-аутсорсерами та кондитерськими фабриками-аутсорсерами. Крім того, компанія «Світоч» використовує послуги аутсорсерів щодо забезпечення постачання какао-бобів для виробництва своїх шоколадних виробів, практикує передачу ведення бухгалтерського обліку та виконання деяких фінансових послуг до спільних центрів обслуговування. Це дає змогу компанії «Світоч» зосередитися на основних аспектах бізнесу, таких як розробка основних видів продукції, маркетингова діяльність, розширення виробництва, ведення власної технології виробництва окремих видів кондитерської нової продукції (Гірна, 2021).

Оскільки спеціалізовані логістичні фірми здатні виконувати широкий спектр логістичних функцій значно ефективніше, керівництвом компанії було прийняте рішення щодо передачі функцій логістики на аутсорсинг. Для компанії «Світоч» передача на аутсорсинг функції транспортування є досить ефективною. Це дає змогу за рахунок аутсорсингової транспортної компанії отримати оптимальні логістичні рішення транспортування, планування руху транспортних потоків, зростання продуктивності всієї логістичної інфраструктури компанії, підвищення якості транспортного обслуговування, зниження витрат на перевезення, технічний огляд

та обслуговування, ремонт, закупівлю запасних частин та пального. Водночас процедура передачі логістичних функцій на аутсорсинг потребує обов'язкового проведення тендеру, тому важливо конкретизувати процедуру проведення тендеру і чітко визначати цілі його проведення.

Останнім часом фахівці ПАТ «Львівська кондитерська фабрика «Світоч»» також активно здійснюють пошук нових торгових посередників. Слід зазначити, що в окремих випадках підприємство надає торговельним посередникам ексклюзивні права на продаж своєї продукції на певній території. Надання ексклюзивних прав створює позитивний ефект — отримання зацікавленого посередника й активізація просування власної торговельної марки. Таке рішення сприяє досягненню також низки інших цілей:

- швидкий розвиток компанії;
- просування своєї продукції здійснюється на всій території країни;
- скорочення витрат через відсутність додаткових власних складських приміщень, регіональних офісів, значної кількості власного персоналу;
- отримання доступу до відсутніх ресурсів;
- отримання доступу до нових потенційних клієнтів.

Оцінюючи використання аутсорсингу, доцільно застосовувати методику, що базується на таких показниках діяльності аутсорсингової компанії:

1. Коефіцієнт часу надання певних послуг, що характеризує своєчасність виконання робіт/надання послуг згідно з умовами договору аутсорсингу:

$$E_{\text{час}} = Tt/Tt_0, \quad (1)$$

де Tt — фактичний час виконання робіт/надання певних послуг; Tt_0 — запланований згідно з договором час виконання робіт/надання послуг.

Значення цього коефіцієнта відображає рівень відхилення фактичного часу виконання робіт/надання послуг від запланованого.

2. Коефіцієнт обсягу виконання робіт/надання послуг, який характеризує повноту надання послуг (виконання робіт) згідно з умовами договору аутсорсингу:

$$E_{\text{обсяг}} = Qf/Qn, \quad (2)$$

де Qf — обсяг фактично виконаних робіт/наданих послуг за певний проміжок часу; Qn — обсяг запланованих робіт/послуг за цей же проміжок часу згідно договору.

3. Коефіцієнт економічності аутсорсингу, що обчислюється через порівняння фактичних і запланованих згідно з договором витрат на аутсорсинг.

$$E_{\text{економ}} = Cf/Cдог, \quad (3)$$

де Cf — фактичні витрати на оплату аутсорсингу; $Cдог$ — сума передбачених договором витрат.

Для розрахунку інтегрованого показника ефективності аутсорсингу для кожного із зазначених критеріїв береться свій коефіцієнт вагомості:

$$E_{\text{інтегр}} = E_{\text{час}} x \times E_{\text{обсяг}} y \times E_{\text{економ}} z, \quad (4)$$

де x, y, z — вагомість коефіцієнтів $E_{\text{час}}, E_{\text{обсяг}}, E_{\text{економ}}$ відповідно.

Збільшення інтегрованого критерію свідчить про підвищення якості обслуговування. Відповідно, при вирішенні питання подальшої співпраці можна скористатися шкалою результативності Харрінгтона, яка характеризує значення критеріїв (Фролова, 2015).

Таблиця 1. Шкала оцінювання ефективності використання аутсорсингу (складено авторами на основі (Фролова, 2015))

Значення	Ефективність	Управлінські рішення
0,80—1,0	Дуже висока	Використання аутсорсингу ефективне, але бажано розробити систему превентивних заходів щодо запобігання відхиленням
0,63—0,80	Висока	Необхідне розроблення системи незначних коригувальних заходів
0,37—0,63	Середня	Цілі та завдання аутсорсингу частково досягнуті, необхідні значні коригувальні заходи
0,20—0,37	Низька	Використання аутсорсингу нерезультативне, необхідні суттєві коригувальні заходи
0,00—0,20	Дуже низька	Цілі та завдання аутсорсингу не досягнуто, використання аутсорсингу не ефективне

У табл. 1 наведено модифіковану шкалу Харрінгтона, яка визначає ефективність дій щодо використання аутсорсингу. Залежно від отриманих результатів використання аутсорсингу можливі такі варіанти дій:

1. При незначних відхиленнях (0,63—1) не виникає необхідності суттєвих змін моделі аутсорсингу.

2. У разі значних відхилень (від 0 до 0,63) потрібні суттєві коригувальні дії, необхідні для відновлення ефективності.

Надаючи оцінку ефективності використання аутсорсингових послуг, треба враховувати те, що різні види аутсорсингу характеризуються певними особливостями, що впливає на вибір параметрів оцінювання.

Проаналізувавши основні показники оцінки ефективності використання аутсорсингу підприємствами харчової промисловості, можна зробити висновок, що ефективність використання аутсорсингу можна проводити як за видами аутсорсингу, так і за допомогою узагальнених показників діяльності підприємства. При цьому слід обирати параметри залежно від поставлених завдань і обраних для аналізу напрямів діяльності підприємства харчової промисловості. Також потрібно аналізувати не лише кількісну, але і якісну складові діяльності підприємства. Загалом, оцінювання ефективності використання аутсорсингу повинно мати комплексний характер і враховувати всі види витрат і доходів, а також рівень потенційних ризиків і переваг, що пов'язані із аутсорсингом.

Висновки

Використання аутсорсингу підприємствами харчової промисловості може суттєво підвищити рівень їх конкурентоспроможності та ефективності роботи. За результатами проведеного аналізу переваг і недоліків застосування аутсорсингу провідними підприємствами харчової промисловості доведено його високу ефек-

тивність. Проте існують процеси і функції підприємств, які не слід доручати компаніям-аутсорсерам. Для ефективного використання аутсорсингу підприємствам харчової промисловості потрібно провести системний аналіз ризиків і визначити економічну ефективність від його використання. При цьому слід враховувати рівень взаємодії і встановлення взаємодовіри між аутсорсинговими організаціями та підприємством-замовником. Проведення системного аналізу переваг і недоліків та ефективності аутсорсингової діяльності надає можливість комплексно оцінити отримані результати, визначити основні напрями покращення господарської діяльності підприємств харчової промисловості, а також приймати управлінські рішення щодо продовження або припинення співробітництва з компанією-аутсорсером.

Хоча вітчизняний ринок аутсорсингових послуг поки що знаходиться на початковому етапі свого розвитку, українські підприємства харчової промисловості все ширше вдаються до впровадження передового досвіду провідних міжнародних компаній у цій сфері, що, безумовно, є позитивним. Основним мотивом впровадження аутсорсингових послуг є підвищення ефективності і конкурентоспроможності діяльності вітчизняного підприємства харчової промисловості.

Література

Ачкасова, О. В. (2014). Організаційні та правові аспекти здійснення аутсорсингу в Україні, *Проблеми економіки*, 2, 95—99. Взято з https://www.problecon.com/export_pdf/problems-of-economy-2014-2_0-pages-95_99.pdf.

Баранюк, Х. О. (2020). *Забезпечення конкурентоспроможності підприємств малого бізнесу в харчовій промисловості* (дис. канд. економ. наук). Одеська національна академія харчових технологій, Одеса. Взято з <https://uacademic.info/ua/document/0820U100589#>.

Безручук, С. Л., Лайчук, С. М. (2008). Аутсорсинг, лізинг персоналу або послуги з бухгалтерського обліку: критична оцінка термінів. *Міжнародний збірник наукових праць*, 3, 41—60. Взято з https://scholar.google.com.ua/citations?view_op=view_citation&hl=ru&user=IYa9kgMAAAAJ&citation_for_view=IYa9kgMAAAAJ:u5HHmVD_uO8C.

Гавриленко К. (2009). Аутсорсинг як інструмент зниження витрат у системі стратегічного управління, *Актуальні проблеми економіки*, 1(91), 104—109. Взято з <https://opac.library.pl.ua/bib/2324970>.

Загородній, А. Г. (2009). Аутсорсинг та його вплив на витрати підприємства. *Фінанси України*, 9(166), 87—97. Взято з http://nbuv.gov.ua/UJRN/Fu_2009_9_10.

Зозульов, О. (2009). Аутсорсинг як інструмент підвищення конкурентоспроможності вітчизняних підприємств в умовах глобалізації. *Економіка України*, 8, 16—24. Взято з <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37012>.

Купріна, Н. М. (2019). *Забезпечення конкурентоспроможності харчової промисловості України: теорія і практика*. Одеса: Видавничий дім «Гельветика». Взято з <https://oldiplus.ua/zabezpechennya-konkurentospromozhnosti-harchovoyi-promyslovosti-ukrayiny-teoriya-i-praktyka/>.

Лігоненко, Л. О. (2016). Антикризове управління підприємством: теоретико-методологічні засади та практичний інструментарій. *Економічний форум*, 1, 161—170. Взято з http://nbuv.gov.ua/UJRN/ecfor_2016_1_25.

Лисенко, Т. І. (2010). Передумови виникнення та перспективи застосування аутсорсингу як інструменту підвищення конкурентоспроможності підприємства, *Економічний вісник університету*, 14, 85—92. Взято з https://scholar.google.com.ua/citations?view_op=view_citation&hl=ru&user=R7m0fmAAAAAJ&citation_for_view=R7m0fmAAAAAJ:7PzIFSSx8tAC.

Манойленко, О. В. (2006). Аутсорсинг як інструмент підвищення ефективності антикризового управління. *Вісник Міжнародного Слов'янського університету*, 1, 8—12. Взято з http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=UJRN&P21DBN=

UJRN&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=JUJ_all&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=IJ=&S21COLORTERMS=1&S21STR=%D0%9616622:%D0%B5%D0%BA%D0%BE%D0%BD.

Фролова, В. Ю. (2015). Ефективність використання аутсорсингу бізнес-процесів на підприємстві. *Вісник Бердянського університету менеджменту і бізнесу*, 3(31), 61—63. Взято з http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=JUJ_all&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=IJ=&S21COLORTERMS=1&S21STR=%D0%9673543.

Хейвуд, Дж. (2002). *Аутсорсинг. У пошуках конкурентних переваг*. Київ. Williams. Взято з https://kniga.biz.ua/book-autsorsing-v-poiskakh-konkurentnykh-preimushchestv-027608.html?srsltid=AfmBOoqvs5c6KkmQ0nMe5RwDbVyJ_663eg_FC4ZgRaOelbI2JA7tgVzvL.

Цимбалюк, С. О. (2009). *Технології управління персоналом*. Київ, ДВНЗ «Київський національний університет імені Вадима Гетьмана». Взято з <https://ir.kneu.edu.ua/items/3f06ad9e-9a1b-4950-8228-29fbe2d9f1b4>.

The 19th Annual Global CEO Survey (2016). *Redefining business success in a changing world*. Взято з <https://www.pwc.com/gx/en/ceo-survey/2016/landing-page/pwc-19th-annual-global-ceo-survey.pdf>.

Żeliński, J. A. (2008). *Outsourcing doradstwa podatkowego i rachunkowości w malej firmie*, Warszawa, ABC a Walters Kluwer. Взято з <https://www.empik.com/outsourcing-doradztwa-podatkowego-i-rachunkowosci-w-malej-firmie-zielinski-jacek,prod740019,ksiazka-p>.

Friedman, T. L. (2005). *The world is flat: A brief history of the twenty-first century*. Douglas and McIntyre Взято з https://books.google.com.ua/books/about/The_World_Is_Flat.html?id=cFqJ0biC89YC&redir_esc=y.

Derek Gallimore (2022). *Inside Outsourcing: How Remote Work, Offshoring & Global Employment is Changing the World*. Outsource Accelerator Взято з <https://www.getabstract.com/es/resumen/inside-outsourcing/46522?st=RELATED&si=4190>.

УДК 621.039.5

INNOVATIVE APPROACHES TO ENSURING STABLE ELECTRICITY SUPPLY AND PREVENT POWER OUTAGES: UKRAINIAN EXPERIENCE

V. Teptya, N. Ostra, Yu. Malohulko, O. Sikorska, K. Povstyanko
Vinnytsia National Technical University

Key words:

*Electrical networks
Power automation system
Renewable energy
sources
Flexible load management
Power outage*

Article history:

Received 03.01.2025
Received in revised form
20.01.2025
Accepted 10.02.2025

Corresponding author:

Yu. Malohulko

E-mail:

juliya_malogulko@ukr.net

Citation: Тєптя В. В., Остра Н. В., Малогулко Ю. В., Сікорська О. В., Повстянко К. О. (2025). Інноваційні підходи для запобігання відключення і стабільного електропостачання: український досвід. *Наукові праці НУХТ*, 31(1), 70—86.
DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-1-7

ABSTRACT

In connection with the increase in damage to power grids and more frequent interruptions in power supply, the study of technical solutions to prevent power outages in the Ukrainian power system has become extremely important and relevant. This study was aimed at analyzing technical approaches that increase the stability of the energy system of Ukraine and prevent outages, ensuring reliable electricity supply for the population. The methods used include analytical, classification, functional, statistical, synthesis, etc. As part of the study, a detailed analysis of modern technical solutions for strengthening the energy infrastructure of Ukraine was carried out. The main emphasis was on the evaluation of new technologies for the construction of power transmission lines with improved characteristics. An important part of the work was the study of automation systems for effective monitoring and management of the energy network. The significance of the use of energy storage, the development of renewable energy sources and the improvement of electricity consumption forecasting systems were also investigated. Flexible workload management and improving cyber security were identified as critical challenges. The implementation of the electricity supply project for certain districts was considered a key step for improving the living conditions of the population and the development of the local economy. In addition, the use of generators will help reduce the negative impact of outages and ensure the stability of electricity supply in all sectors of the economy. The general conclusion of the study was that the implementation of these technical solutions will significantly increase the stability of the energy system of Ukraine. This will contribute to the effective avoidance of outages and stable electricity supply to the population, which will help energy companies and state institutions to optimize resource management and make informed decisions for the stable operation of the power system in conditions of the risk of outages.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-1-7

ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАБІЛЬНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ І ЗАПОБІГАННЯ ВІДКЛЮЧЕННЯМ: УКРАЇНСЬКИЙ ДОСВІД

В. В. Тептя, Н. В. Остра, Ю. В. Малогулко, О. В. Сікорська, К. О. Повстанко
Вінницький національний технічний університет

Через пошкодження електромереж і часті перебої в електропостачанні дослідження технічних рішень щодо запобігання відключенням електроенергії в українській енергосистемі стало надзвичайно важливим і актуальним. Це дослідження спрямоване на аналіз технічних підходів, що підвищують стійкість енергетичної системи України та запобігають відключенням, забезпечуючи надійне електропостачання для населення. Використані методи включають аналітичний, класифікаційний, функціональний, статистичний, метод синтезу тощо.

Здійснено детальний аналіз сучасних технічних рішень для зміцнення енергетичної інфраструктури України. Основний акцент зроблено на оцінюванні нових технологій для будівництва ліній електропередачі з покращеними характеристиками. Важливою частиною дослідження стало вивчення систем автоматизації для ефективного моніторингу та управління енергетичною мережею. Також великого значення набуває використання енергетичних сховищ, розвиток відновлюваних джерел енергії та удосконалення систем прогнозування споживання електроенергії. Гнучке керування навантаженням і поліпшення кібербезпеки визначено критичними завданнями. Реалізація проєкту постачання електроенергії для окремих районів розглядається як ключовий крок для покращання умов життя населення та розвитку місцевої економіки. Окрім того, використання генераторів сприятиме зменшенню негативного впливу відключень і забезпечить стабільність електропостачання в усіх секторах економіки. Загальний висновок дослідження полягає в тому, що впровадження цих технічних рішень дасть змогу суттєво підвищити стійкість енергосистеми України. Це сприятиме ефективному уникненню перерв в електропостачанні і стабільному забезпеченню електроенергією населення, що допоможе енергокомпаніям і державним установам оптимізувати управління ресурсами та приймати обґрунтовані рішення для стабільної роботи енергосистеми в умовах ризику перерв у електропостачанні.

Ключові слова: *електричні мережі, система автоматизації, відновлювані джерела енергії, гнучке керування навантаженням, відключення електричної енергії.*

Постановка проблеми. Зважаючи на негативний вплив широкомасштабного вторгнення росії на енергетику України, дослідження технічних рішень для забезпечення стабільності електропостачання та стійкості енергетичних систем набуває особливого значення. Воєнні дії підкреслюють необхідність модернізації технологій для ефективного управління та захисту енергетичних мереж, особливо в

умовах підвищених загроз і ризиків, що виникають під час воєнного стану. Збільшене навантаження на електромережі та потенційні атаки на критичну інфраструктуру створюють серйозні виклики для енергетичної безпеки України. Забезпечення стійкості та надійності енергетичних систем є стратегічно важливим для підтримки економічної стабільності та якості життя населення. Технічні аспекти, такі як захист від кіберзагроз, посилення кібербезпеки та оперативне реагування, стають ключовими елементами в стратегії енергетичної безпеки в умовах воєнних загроз.

Завдання цього дослідження полягає в розробці та реалізації ефективних технічних рішень для запобігання перерв в електропостачанні, особливо в умовах сучасної України. Створення стабільної та надійної енергетичної інфраструктури є ключовим завданням, адже відключення електроенергії можуть мати серйозні наслідки для функціонування суспільства, економіки та важливих інфраструктурних об'єктів. Це дослідження спрямоване на вдосконалення систем моніторингу, управління попитом, інтеграцію відновлюваних джерел енергії, розвиток резервного живлення та інших технічних рішень для мінімізації ризиків і наслідків енергетичних аварій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У праці (Shchelkunov та ін., 2023) йдеться про важливість впровадження нових технічних рішень для підвищення стійкості української енергетичної системи. Автор наголошує на важливості модернізації інфраструктури та застосуванні інноваційних методів автоматизації й контролю. Як відзначається, дослідження не розглядає вплив енергетичних систем на екологічні аспекти та можливість покращення енергетичної ефективності, враховуючи екологічні вимоги.

Автори статті (Vashchenko, & Korduba, 2023) відзначають, що ефективність енергопостачання набуває особливої ваги в умовах зростання навантаження на електромережі та непередбачуваності споживання електроенергії, що може призвести до серйозних проблем. Проте в цьому дослідженні не розглянуто глибше взаємозв'язок між гнучким керуванням навантаження і зменшенням викидів, що може виявитися ключовим в оцінюванні екологічного впливу.

У праці (Myrutenko, & Listovshchik, 2022) показано, що використання накопичувачів енергії та просування в розвитку відновлювальних джерел є ключовими елементами стратегії для підвищення стійкості енергетичної системи. Та все ж слід зауважити, що питання вивчення можливостей використання гібридних енергетичних систем для максимізації використання відновлювальних джерел і підвищення стійкості енергетичної інфраструктури не розглядається.

У (Stezhko, & Fitsa, 2021) відзначається важливість впровадження гнучкого керування навантаженням і вдосконалення систем, спрямованих на забезпечення стійкості та захист від потенційних кіберзагроз. Проте слід зауважити, що увага дослідників не зосереджена на конкретних технологіях і стратегіях кіберзахисту, що може відзначитися впливом на ефективність заходів у протидії кіберзагрозам.

У статті (Polukhin, Mykhaylova, Semenyshina, & Chernyavskiy, 2023) особливу увагу приділено аналізу поточних технічних рішень та їх впливу на підвищення стійкості української енергетичної системи. Проте важливо відзначити, що не приділено відповідну увагу динаміці змін у споживанні електроенергії та їх можливому впливу на стабільність енергетичних систем у майбутньому.

У (Hryshchenko, 2022) розкривається важливе питання ефективного прогнозування споживання електроенергії, яке є ключовим елементом удосконалення систем прогнозування й оптимізації використання ресурсів. Зазначимо, що дослідження розглядає важливість впровадження інтелектуальних систем прогнозування, що враховують соціально-економічні фактори та зміни у споживанні.

За результатами останніх досліджень S. Kalantar вивчення поведінкового потенціалу споживачів відіграє важливу роль у розробленні ефективних рішень для запобігання кризі відключення електроенергії. Розуміння та аналіз характеру споживання електроенергії може визначити характер споживачів і допомогти в розробці стратегій для оптимізації енергоспоживання. Застосування технологій штучного інтелекту й аналітики даних для вивчення звичок споживання електроенергії може надати цінний інсайт щодо того, як ефективно регулювати навантаження та генерування. Важливим аспектом у запобіганні кризі енергопостачання є також розвиток і використання сонячної енергії. Збільшення потужності сонячних електростанцій може зробити систему енергетики більш стійкою та менш залежною від традиційних джерел. Застосування сонячних технологій не лише зменшить відповідальність за емісії CO₂, але й забезпечить стабільність в енергопостачанні, навіть у випадку кризових ситуацій (Kalantar, Saifoddin, Hajinezhad, & Ahmadi, 2021).

Поєднання аналізу поведінкового потенціалу й активного розвитку сонячних технологій може сприяти створенню більш стійкої та сталої енергетичної системи, забезпечуючи необхідні резерви та джерела енергії для непередбачуваних обставин.

За визначенням N. Sharma, великі відключення електроенергії є серйозною проблемою, яка може мати значний вплив на суспільство та економіку. Однією з основних причин таких відключень є застарілість енергетичних систем та інфраструктури, яка не завжди в змозі витримати навантаження під час стрімких змін або надзвичайних ситуацій. Технічні невдачі, несправності у мережевому обладнанні та недостатність профілактичних заходів також призводять до виникнення великих відключень. Для запобігання таким ситуаціям важливо розглядати рекомендації щодо модернізації енергетичних систем. Це може включати вдосконалення інфраструктури, використання новітніх технологій, таких як системи моніторингу та дистанційного управління, а також посилення заходів з технічного обслуговування. Проте на шляху до вдосконалення енергетичної стійкості можуть виникати ряд проблем, таких як фінансові витрати на модернізацію, труднощі у впровадженні новітніх технологій і вирішення питань щодо координації між різними суб'єктами енергетичного сектору (Sharma та ін., 2021).

Варто зазначити, що вирішення проблеми великих відключень електроенергії вимагатиме комплексного підходу, об'єднуючи технічні інновації, стратегії модернізації та виважені рішення для підвищення стійкості енергетичних систем.

Готовність системи кризового управління у Польщі відіграє ключову роль у вирішенні довгострокових і великомасштабних проблем, пов'язаних із нестачею електроенергії та можливими відключеннями електроенергії. Ця готовність визначається ефективністю та координацією заходів, спрямованих на забезпечення стійкості енергетичної системи під час великих труднощів. Важливим аспектом є роз-

робка стратегій управління кризами, які передбачають великомасштабні відключення електроенергії. Це включає в себе не лише технічні аспекти, а й плани евакуації, забезпечення життєвого середовища для населення та підтримку критичних інфраструктур. Системи екстреного реагування повинні бути готовими негайно вживати заходи для запобігання гуманітарній кризі та забезпечення безпеки громадян. Окрім того, ефективність системи кризового управління визначається рівнем взаємодії між різними ланками влади, місцевими органами, енергетичними компаніями та іншими зацікавленими сторонами. Важливо мати механізми комунікації та обміну інформацією для швидкого реагування на будь-які виклики, які можуть виникнути в результаті довгострокової нестачі електроенергії (Majchrzak, Michalski, & Reginia-Zacharski, 2021).

Ці результати підтверджують наведене вище дослідження, оскільки у польській системі кризового управління слід розглядати і підтримку заходів з підвищення ефективності та гнучкості енергетичної інфраструктури, таких як розвиток систем накопичення енергії та використання відновлювальних джерел. Враховуючи ці аспекти, можна створити більш стійку та готову до кризових ситуацій систему електропостачання в Україні.

Створення енергетичних спільнот є стратегічним кроком для забезпечення територіальної стійкості та мінімізації ризиків відключення електроенергії. Однією з ключових переваг енергетичних спільнот є їхня здатність впроваджувати інноваційні технології та ефективно координувати роботу системи електропостачання на локальному рівні. Це створює можливість для розподілення навантаження та використання місцевих джерел відновлювальної енергії. Міра ризику відключення електроенергії стає важливим інструментом для енергетичних спільнот у визначенні стратегій реагування та планування дій у випадку негативних сценаріїв. Вимірювання цього ризику передбачає аналіз факторів, таких як технічний стан мережі, динаміка попиту на електроенергію, ступінь використання відновлювальних джерел і взаємодія з сусідніми енергетичними системами (Mutani, Santantonio, Brunetta, Caldarice, & Demichela, 2021).

З цією думкою можна погодитися, оскільки формування ефективної системи моніторингу та прогнозування навантаження може виявитися критичним для зниження ризику аварійних відключень. Ці заходи спрямовані на забезпечення гнучкості управління електропостачанням, що відповідає змінам у споживанні, зокрема в умовах блекаутів та надзвичайних ситуаціях. Реалізація інтелектуальних рішень на місцевому рівні може сприяти оптимізації роботи системи та забезпечити сталість електроенергетичної інфраструктури, особливо в умовах, спричинених надзвичайними обставинами.

Як зазначає R. Bajo-Buenestado, відключення електроенергії суттєво впливають на стан електрифікації домогосподарств, особливо у країнах, де доступ до енергії може бути обмеженим. У Кенії, наприклад, система електропостачання зазнала численних викликів через відключення, що сталися через технічні неполадки, недостатню інфраструктуру та нестабільність виробництва електроенергії. Відключення електроенергії в Кенії можуть спричинити серйозні соціально-економічні наслідки для домогосподарств. Багато домівок і бізнесів можуть мати обмежений доступ до освітлення, засобів зв'язку та електричних приладів, що впливає на

зручність та ефективність їхнього функціонування. Особливо це стосується сільських районів, де велика частина населення може залежати від електроенергії для сільськогосподарської діяльності (Bajo-Buenestado, 2021).

Аналізуючи отримані висновки, можна зробити припущення про те, що рішення, які пропонують автори в аналізованих працях, можуть бути доцільними не лише в нормальних умовах, але й в контексті аварійних відключень і блекаутів. Адаптація до таких викликів вимагатиме впровадження технічних та інфраструктурних рішень, таких як розвиток стабільних систем електропостачання, використання альтернативних джерел енергії та ефективні стратегії кризового управління.

Розвиток стратегії стійкості на ринках електроенергії важливий для забезпечення ефективного та надійного електропостачання. Уроки, які можна вивчити з ринків електроенергії, допоможуть розробити ефективні стратегії для забезпечення стійкості та надійності енергетичних систем. Важливим елементом є розуміння впливу ринкових механізмів на стійкість електропостачання. Наприклад, впровадження систем торгівлі електроенергією може створювати стимули для розвитку нових технологій і збільшення конкуренції на ринку. Однак необхідно уникати ефекту «достатньої гнучкості», коли велика залежність від ринкових механізмів може бути вразливою до екстремальних ситуацій (Fabra, Motta, & Peitz, 2022).

Розглядаючи питання аварійних відключень і блекаутів, можна зазначити, що впровадження стратегії стійкості на ринках електроенергії вимагає комплексного підходу, що враховує технічні, економічні та екологічні аспекти. При цьому важливо висувати припущення про застосовність результатів аналізованих праць у ситуаціях аварійних відключень, а не лише в нормальних умовах. Навчання на досвіді інших ринків може стати цінним інструментом для розробки ефективних стратегій, спрямованих на стійкий та сталий розвиток енергетичних систем.

Метою дослідження є аналіз технічних рішень, які можуть підвищити стійкість енергетичної системи України та запобігти перебоєм у електропостачанні населення.

Матеріали і методи. Аналітичний підхід дав змогу детально проаналізувати технічні рішення, спрямовані на підвищення стійкості енергосистем України. Застосування цього методу забезпечило ретельну оцінку кожного рішення з точки зору його ефективності та виявлення можливих обмежень, що стало важливим етапом у формуванні висновків і рекомендацій для подальшого вдосконалення енергетичної інфраструктури. Аналіз допоміг визначити основні напрями, які потребують додаткової уваги для посилення надійності системи й стабільності електропостачання в умовах сучасних викликів.

Використання статистичного методу дало змогу дослідити тенденції та закономірності у функціонуванні енергетичної системи, підготувати обґрунтовані прогнози щодо можливих коливань у виробництві та споживанні електроенергії. Цей підхід став дієвим інструментом для розробки стратегій управління енергоресурсами та визначення оптимальних шляхів підвищення ефективності системи.

Застосування функціонального методу дало змогу визначити основні функціональні елементи енергетичної системи та їхню взаємодію. Цей підхід забезпечив більш детальне розуміння важливих аспектів внутрішніх зв'язків між компонен-

тами, що є критично важливим для оптимізації роботи системи та досягнення максимальної ефективності енергетичних процесів. Отримані результати стали основою для подальших рекомендацій щодо поліпшення функціонування системи.

Метод дедукції сприяв аналізу причинно-наслідкових зв'язків між елементами енергетичної системи та виділенню основних чинників, що впливають на її стабільність. Це дало змогу виокремити важливі аспекти, які визначають ефективність і надійність системи. З огляду на отримані результати можна розробити обґрунтовані стратегії для подальшого вдосконалення й оптимізації енергетичної інфраструктури.

Завдяки методу синтезу були створені комплексні концепції для покращення енергетичної системи. Цей підхід дав змогу об'єднати різні технічні рішення і стратегії в єдину гармонійну систему, спрямовану на підвищення стійкості та ефективності. Метод синтезу надав можливість знайти оптимальні комбінації технічних рішень, які можуть бути реалізовані для досягнення стабільності енергетичних систем. Результати синтезу стали основою для практичних кроків у впровадженні інновацій та оптимізації функціонування системи.

Метод класифікації був корисним для структурування технічних рішень і компонентів енергетичної системи, визначення їх основних характеристик та групування за спільними ознаками. Це сприяло впорядкуванню інформації та допомогло зорієнтуватися в різноманітті наявних технічних рішень. Класифікація відіграла ключову роль у виборі оптимальних компонентів системи, що дає змогу досягти підвищення її стійкості та надійності.

Метод індукції, в рамках цього дослідження, використовувався для аналізу зібраних фактів і даних, щоб визначити загальні тенденції та закономірності в енергетичних системах. Цей метод допоміг виявити внутрішні зв'язки та динаміку роботи системи з урахуванням різних факторів і впливів. Такий підхід дав змогу врахувати специфіку української енергетичної системи та розробити збалансовані рекомендації й стратегії для підвищення її продуктивності та надійності.

Завдяки методу узагальнення були систематизовані отримані дані та сформувані висновки, що надало можливість скласти цілісне уявлення про функціонування енергетичної системи. Цей підхід сприяв абстрагуванню від деталей, допоміг виявити основні тенденції і ключові зв'язки, важливі для розуміння загальної динаміки енергетичних процесів. Узагальнення результатів стало основою для визначення стратегічних напрямків подальших досліджень і заходів для покращення ефективності та стабільності енергетичної системи.

Викладення основних результатів дослідження. Енергетична криза в Україні виникла через комплексну сукупність факторів, що впливають на стабільність енергетичного ринку. Це недостатній розвиток інфраструктури, збоїв в електропостачанні та недоліки в управлінні енергетичним сектором. Крім соціально-економічних чинників, значний вплив мають також політичні, інституційні, екологічні та регіональні аспекти. Ключову роль у загостренні ситуації відіграє війна з росією та окупація частин Донецької, Луганської, Херсонської та Запорізької областей, де зосереджений основний видобуток вугілля для ТЕС. Додатковими викликами залишаються монополізація ринку електроенергії, високий рівень зносу електростанцій, субсидування нерентабельних шахт, низький рівень використання аль-

тернативних джерел енергії та невизначеність у реформах в рамках Енергетичного співтовариства. Усе це призвело до перевищення попиту на енергоносії над їхньою пропозицією, що потребує розробки механізмів для забезпечення енергетичної безпеки країни (Østergaard, Duic, Noorollahi, & Kalogirou, 2022).

Для забезпечення стабільного постачання електроенергії вживаються заходи для захисту електромереж від можливих атак з боку противника. Загрози можуть мати різний характер: фізичні (наприклад, диверсії, обстріли чи підриви), кібернетичні (такі як хакерські зломи, вірусні атаки чи шкідливе програмне забезпечення) та електромагнітні (наприклад, імпульси високої напруги або частоти).

Для ефективного захисту від різних видів атак застосовуються різноманітні стратегії (Ма та ін., 2022). Фізичний захист передбачає зміцнення конструкцій обладнання та ліній електропередач, встановлення бар'єрів та огорож, впровадження систем відеоспостереження і сигналізації, а також організацію охорони та регулярне патрулювання об'єктів. Фізичні заходи захисту забезпечують високий рівень безпеки енергетичних об'єктів від прямих фізичних загроз. Це знижує ризик пошкоджень унаслідок атак чи стихійних лих. Проте основним недоліком є висока вартість впровадження таких заходів та їх обмежена ефективність у випадках високотехнологічних атак, зокрема дронів чи точкових ударів.

Для протидії кіберзагрозам використовуються шифрування, системи автентифікації і контроль доступу до мереж та інформаційних систем. Сюди також входить встановлення антивірусного та антишпигунського програмного забезпечення, часті оновлення програмного забезпечення та операційних систем, резервне копіювання даних і налаштування альтернативних каналів зв'язку. Використання технологій штучного інтелекту дає змогу виявляти загрози в реальному часі. Однак цей метод вимагає постійного оновлення системи та значних інвестицій у навчання персоналу, оскільки людський фактор залишається вразливим місцем.

Електромагнітний захист включає фільтрацію, стабілізацію і контроль параметрів напруги і частоти, а також встановлення пристроїв, що захищають від перенапруг, перевантажень і коротких замикань. Крім того, використовуються екрановані кабелі і захищене обладнання для підвищення стійкості. Застосування запропонованого обладнання ефективно мінімізує ризики пошкоджень. Проте висока вартість обладнання та його складна модернізація в існуючих мережах є значними недоліками.

Для забезпечення надійного електропостачання в умовах повномасштабного вторгнення та використання багаторічного досвіду роботи в критичних обставинах застосовується комплекс заходів. Серед них — встановлення додаткових джерел живлення, таких як дизель-генератори, акумуляторні батареї та відновлювані джерела енергії, які можуть підключатися в разі збою основного електропостачання. Єдиним їх недоліком є значна вартість як придбання, так і експлуатації таких систем, особливо в разі використання дизельних генераторів.

Ключову роль відіграє впровадження систем автоматизації та захисту електромереж, що забезпечують швидке реагування на зміни в електропостачанні, таких як релейний захист, автоматичне підключення резерву та дистанційне керування. Основною проблемою є висока складність інтеграції таких систем із наявною інфраструктурою та вразливість до кіберзагроз. Важливим напрямом є також розви-

ток малих розподільних генеруючих установок — мікромереж, мініГЕС та сонячних панелей, здатних працювати автономно або в паралелі з основною мережею, що сприяє децентралізації енергосистеми. Цей підхід передбачає встановлення генераторів на окремих об'єктах або у домогосподарствах, що сприяє децентралізації системи та зменшенню навантаження на основні мережі. Хоча це знижує ризик загальної відмови системи, розподілене генерування є менш надійним через можливі збої в окремих компонентах і складність управління.

Ці заходи спрямовані на підвищення надійності, стабільності та ефективності електропостачання в умовах війни, забезпечуючи стійкість електромереж до екстремальних ситуацій.

Окрім якості та надійності, суттєвим аспектом у сфері електропостачання є економічність, яка відображає співвідношення витрат на виробництво, передачу й розподіл електроенергії до її раціонального використання (Erdiwansyah та ін., 2021). Ефективність електропостачання залежить від вибору оптимальних схем та конструкцій елементів системи, а також від зваженого розподілу навантажень відповідно до різних рівнів надійності. Важливим є також зниження втрат електроенергії під час її передавання й розподілу та підвищення енергоефективності серед споживачів.

Аналізуючи структуру генерації електроенергії в Об'єднаній енергосистемі України, слід зазначити, що більше половини виробництва припадає на атомні електростанції (АЕС), які генерують понад 50% всієї електроенергії (рис. 1). До основних джерел також входять гідроелектростанції (ГЕС), газові атомні електростанції (ГАЕС), теплові електростанції (ТЕС), газокompresорні станції (ГК), вітрові електростанції (ВЕС) та теплоелектроцентралі (ТЕЦ).

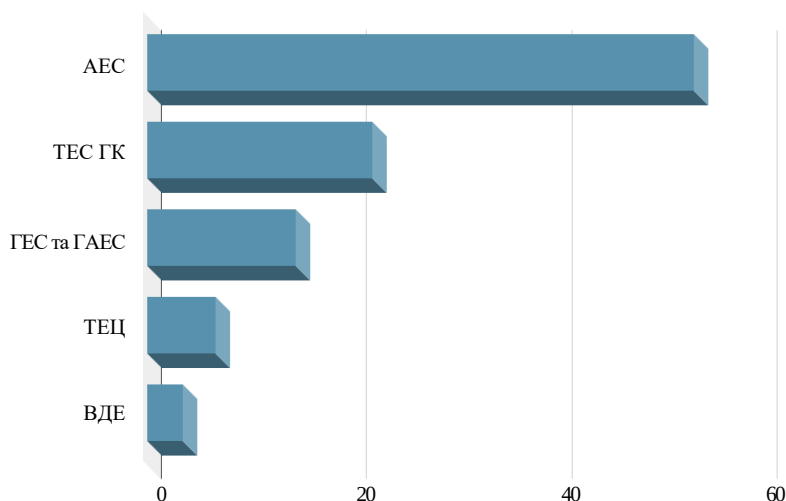


Рис. 1. Генерування електроенергії в об'єднаній енергосистемі України, у % (Zwilling та ін., 2022)

Співвідношення виробництва електроенергії в ОЕС України під час максимальних навантажень є важливим показником енергетичної системи країни. У цей

період можна визначити, які джерела енергії забезпечують основний обсяг електрогенерації. Такий аналіз допомагає ефективно планувати та управляти енергоресурсами, оптимізувати використання різних джерел енергії і забезпечувати стабільну роботу системи під час пікових навантажень. Це важливий етап для вдосконалення стратегій генерації та підвищення ефективності енергетичної системи України.

Розподіл споживання електроенергії в Україні (за винятком тимчасово окупованих територій) відображено на рис. 2. Розподіл електроенергії серед різних груп споживачів в Україні (окрім тимчасово окупованих територій) є важливим елементом аналізу національної енергетичної системи. Ця структура відображає, як електроенергію використовують різні сектори економіки та населення, і може допомогти виявити їхні потреби та вимоги. Розуміння цього розподілу є корисним при розробці стратегій для забезпечення стабільності та надійності електропостачання, адже різні сегменти можуть мати специфічні вимоги до потужності, якості та надійності постачання. Такий аналіз також допомагає визначити напрями для поліпшення й оптимізації енергетичної інфраструктури з урахуванням потреб різних секторів економіки та населення.

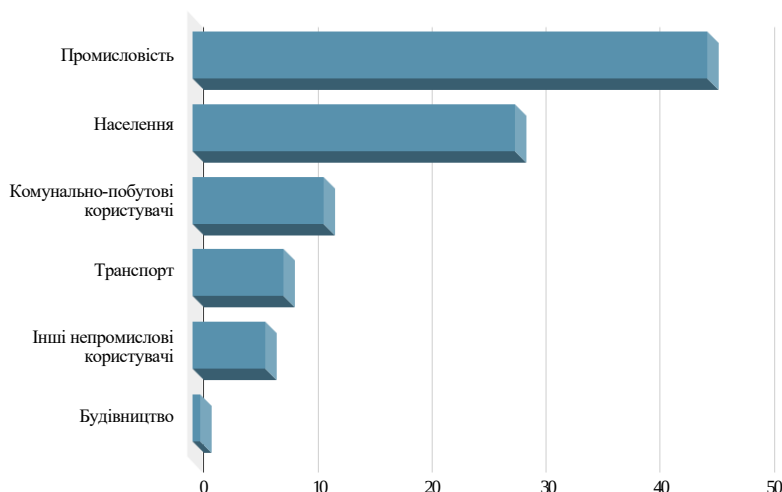


Рис. 2. Відсотковий розподіл електроенергії серед різних груп споживачів в Україні (Szeberényi & Bakó, 2023)

Розподіл електроенергії між різними групами споживачів в Україні, за винятком тимчасово окупованих територій, є важливим компонентом аналізу енергетичної системи країни. Ця структура дає змогу оцінити, як різні економічні сектори й населення споживають електроенергію, що допомагає визначити специфічні потреби та вимоги різних галузей. Врахування цього розподілу є корисним при розробці стратегій для забезпечення стійкого і надійного енергопостачання, оскільки кожен сегмент має свої вимоги до потужності, якості та надійності електропостачання. Такий аналіз також виявляє потенційні можливості для вдосконалення й оптимізації енергетичної інфраструктури з огляду на потреби різних секторів економіки та населення.

Розглянемо умовний район з населенням 100 000 осіб і площею 100 км², який залишився без електропостачання. Його загальна потреба в електроенергії становить приблизно 10 МВт, враховуючи потреби для житла, транспорту, торгівлі та громадських закладів. Зокрема, на житловий сектор, включаючи освітлення, опалення та побутові прилади, припадає 7 МВт; транспортна інфраструктура використовує 1 МВт; торгівля також споживає 1 МВт, громадські заклади потребують ще 1 МВт. Отже, сукупне споживання електроенергії району становить 10 МВт.

Для відновлення електропостачання району загальна вартість закупівлі та експлуатації генераторів оцінюється у 100 млн грн, з яких 50 млн грн призначено на придбання обладнання, а ще 50 млн грн — на забезпечення паливом для їх безперебійної роботи.

Для забезпечення електропостачання району можна використовувати різні технічні рішення. Найбільш надійне рішення — встановлення генераторів на об'єктах критичної інфраструктури. Цей варіант забезпечує безперебійне електропостачання для життєво важливих об'єктів, але є високовартісним через необхідність придбання й експлуатації великої кількості генераторів. Встановлення генераторів на об'єктах критичної інфраструктури є найкращим рішенням з точки зору надійності. Однак це рішення є і найбільш дорогим.

Варіант розподіленого генерування електроенергії передбачає встановлення генераторів на кожному будинку або підприємстві. Цей підхід менш надійний, оскільки може виникнути перевантаження на інших генераторах при виході з ладу одного з них. Проте він є більш економічним, оскільки вимагає менше генераторів. Розподілене генерування електроенергії є менш надійним рішенням, проте воно є дешевшим. Цей варіант може бути прийнятним для районів, де є обмежені фінансові ресурси.

Комбінований підхід включає в себе як встановлення генераторів на об'єктах критичної інфраструктури, так і розподілене генерування електроенергії. Цей варіант є найбільш оптимальним, оскільки забезпечує надійне електропостачання при відносно невеликих витратах. Комбінований варіант є найбільш оптимальним з точки зору надійності та витрат. Цей варіант може бути прийнятним для більшості районів.

У рамках комбінованого варіанта можна використовувати різні технічні рішення для забезпечення електропостачання в різних сферах. Для житлового фонду ефективним рішенням є використання сонячних електростанцій, які забезпечують екологічно чисту та доступну енергію. Однак для безперебійного електропостачання в нічний час можна використовувати газові генератори.

Для транспорту рекомендується використовувати електробуси, які є екологічно чистішими, ніж традиційні автобуси на дизельному паливі. Проте через обмежений запас ходу електробусів для безперебійного електропостачання в нічний час можна використовувати зарядні станції.

У сфері торгівлі та громадських закладів рекомендовано використовувати дизельні генератори. Дизельне паливо є більш доступним, що може зробити дизельні генератори економічно ефективним рішенням для забезпечення електропостачання цих об'єктів.

Впровадження технічних рішень, описаних вище, може допомогти забезпечити надійне електропостачання для населення України навіть у разі збоїв у енергосистемі. Ці рішення вимагатимуть значних інвестицій, але вони можуть принести значні соціальні та економічні вигоди.

Сучасні виклики в енергетичному секторі вимагають відповідних технічних рішень і стратегій, зокрема розширення та модернізації інфраструктури. Одним із ключових напрямків цього процесу є підвищення пропускної здатності ліній передачі.

Встановлення нових ліній електропередавання та модернізація існуючих є критичними елементами для підвищення потужності та стійкості енергетичних систем (Ghiasi та ін., 2023). Нові технології та матеріали дають змогу створювати передачі з високою ефективністю, забезпечуючи оптимальну передачу електроенергії на великі відстані без втрат.

Крім того, розвиток систем автоматизації і контролю є необхідним етапом в еволюції енергетичної інфраструктури. Впровадження сучасних систем автоматизації дає змогу операторам мережі миттєво взаємодіяти з компонентами системи, відслідковувати стан елементів мережі в реальному часі й ефективно реагувати на будь-які відхилення чи аварійні ситуації.

Такий підхід до розширення та модернізації інфраструктури не лише підвищує ефективність і стійкість енергетичної системи, але й надає можливість інтегрувати відновлювальні джерела енергії, що сприяє сталому розвитку та зменшенню викидів в атмосферу. Ці заходи визначають необхідний курс для побудови майбутнього енергетичного ландшафту, що відповідає сучасним і майбутнім потребам суспільства.

Впровадження акумуляторних сховищ є важливим кроком у поліпшенні стійкості та надійності мережі. Ці сховища можуть ефективно компенсувати втрати електроенергії, вирівнювати піки попиту та надавати резерв енергії у випадку аварій чи відмов енергосистеми. Вони дають змогу накопичувати надлишкову енергію, яка виробляється у періоди низького споживання, і використовувати її у пікові часи, що є ключовим для забезпечення стійкості та ефективності системи. Однак обмежена ємність таких систем і їх висока вартість залишаються ключовими проблемами.

Розвиток відновлювальних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергія, виступає як стратегічний крок у напрямку сталого розвитку (Kulcsár, Mankovits, & Ailer, 2021). Збільшення частки відновлювальних джерел дає змогу децентралізувати виробництво електроенергії, зменшити залежність від традиційних джерел, а також зменшити викиди парникових газів. Крім того, це сприяє створенню стійкої енергетичної системи, спроможної вирішувати виклики кліматичних змін і забезпечувати стійке електропостачання у всіх умовах.

Загалом, збільшення ефективності електропостачання через використання сховищ енергії та відновлювальних джерел є ключовим етапом на шляху до сталого, ефективного й екологічно чистого енергетичного майбутнього. Розробка та впровадження систем енергоефективності охоплює використання передових технологій і систем енергозбереження в промисловості, господарствах та домогосподар-

ствах. Застосування енергоефективних технологій може значно зменшити споживання енергії, забезпечуючи оптимальне використання ресурсів і, відповідно, зменшуючи негативний вплив на навколишнє середовище.

Використання технологій «гнучкого» керування дає змогу регулювати споживання електроенергії залежно від потреб системи (Karako, & Dahlgren, 2022). Це означає, що навантаження може бути адаптоване до змін в енергетичному попиті, зменшуючи ризик перевантаження та забезпечуючи ефективне використання енергії. Гнучке управління також робить можливим використання відновлювальних джерел енергії в найоптимальніший спосіб, допомагаючи збалансувати виробництво та споживання. Оптимізація навантаження енергосистеми збалансує попит і пропозицію, зменшуючи витрати на резервні джерела. Проте для ефективної реалізації цього методу потрібні складні алгоритми прогнозування, які мають враховувати динамічні зміни в попиті.

Управління навантаженням та енергоефективність не тільки забезпечують стабільність енергетичних систем, але й є стратегічними кроками у напрямку створення стійкої, ефективної та екологічно чистої енергетики. Це інвестиція в майбутнє, де сучасні технології та інноваційні підходи визначають шлях до енергетичної системи, яка відповідає сучасним викликам і потребам суспільства.

У сучасному світі, де електроенергія є невід’ємною частиною життя, вдосконалення систем прогнозування стає стратегічним завданням для забезпечення сталості та надійності енергетичних систем. Важливо вдосконалити системи прогнозування споживання електроенергії. Використання сучасних алгоритмів і технологій дає змогу точно передбачити пікові навантаження й оптимізувати роботу систем енергопостачання. Це особливо актуально в умовах зростаючого попиту та різноманітних факторів, які можуть впливати на енергетичну систему. Точні прогнози дають змогу операторам систем точно регулювати виробництво та розподіл електроенергії, уникати перевантажень і забезпечувати ефективне використання ресурсів.

Удосконалення систем прогнозування також є ключовим елементом для інтеграції відновлювальних джерел енергії (Butt, Zulqarnain, & Butt, 2021). З точним прогнозуванням погодних умов і виробництва енергії з відновлювальних джерел системи можуть ефективно враховувати коливання виробництва та вирівнювати його з споживанням. Це робить можливим оптимальне використання відновлювальних джерел і сприяє стійкості системи.

В умовах швидкого технологічного розвитку вдосконалення систем прогнозування є стратегічним кроком для побудови майбутньої енергетики. Точні та ефективні прогнози не тільки забезпечують сталість систем, а й створюють фундамент для розвитку інтелектуальних енергетичних систем, які можуть відповідати на виклики сучасності та сприяти сталому розвитку.

В еру цифрової трансформації та зростаючої кількості підключених систем, стійкість до кіберзагроз стає невід’ємною частиною забезпечення безпеки енергетичних мереж. Ключовим аспектом є захист від кіберзагроз, що передбачає розробку та впровадження ефективних заходів кібербезпеки. Енергетична інфраструктура стає привабливим об’єктом для кіберзлочинців, а отже, важливо розробити та впровадити стратегії й технології, які ефективно захищають системи від атак та

вторгнень. Це може включати в себе вдосконалення систем аутентифікації, шифрування даних і навіть впровадження штучного інтелекту для виявлення й усунення загроз в реальному часі.

Знання й уміння персоналу з кібербезпеки можуть виявитися ключовим фактором у запобіганні та виявленні атак (Pablo-Romero, Sánchez-Braza, & Galyan, 2021). Регулярне навчання, симуляції та оновлення процедур безпеки можуть значно збільшити стійкість систем.

Стійкість до кіберзагроз стає першочерговим завданням у світі, де технології швидко розвиваються, а загрози стають більш виразними та складними. Захист енергетичної інфраструктури від кібератак є не лише заходом безпеки, але й гарантією стабільності енергетичних систем і захистом від негативного впливу зовнішніх факторів.

Вдає впровадження наведених технічних рішень відкриває перспективу забезпечення стійкості електромережі в Україні та ефективного запобігання можливим блекаутам. Це допоможе створити більш надійну та стійку енергетичну інфраструктуру, зменшуючи ризики виникнення ситуацій, що можуть призвести до великих відмов у постачанні електроенергії. Враховуючи зростання обтяження електромереж та загрози блекаутів, успішне впровадження цих рішень стає ключовим фактором для забезпечення безперебійного й стабільного електропостачання для населення та різних секторів економіки. Такий крок сприятиме покращенню енергетичної безпеки та відповідності вимогам сучасного енергетичного ландшафту.

Україна має великий досвід роботи в умовах війни і вивчення її підходів до технічних рішень може стати прикладом для інших країн, які також стикаються з подібними викликами в забезпеченні стійкості та безпеки своїх енергетичних систем.

Висновки

Розвиток та модернізація інфраструктури є важливим кроком у забезпеченні стійкості системи електропостачання. Встановлення нових ліній передачі та підвищення ефективності існуючих структур є вирішальними для підвищення потужності та надійності мережі.

Враховуючи розгляд сценарію району без електропостачання та різні сектори споживання, рекомендується використовувати комбінований підхід для забезпечення надійного та економічного електропостачання, включаючи встановлення генераторів на об'єктах критичної інфраструктури та розподілене генерування електроенергії. Впровадження систем, які дають змогу операторам у режимі реального часу відслідковувати стан мережі й ефективно реагувати на можливі загрози, може значно поліпшити стійкість систем.

Дослідження й оцінка новітніх технологій для встановлення нових ліній електропередавання з покращеними характеристиками передачі електроенергії довело важливість розширення систем автоматизації для ефективного моніторингу та керування станом енергетичної мережі.

Збільшення ефективності електропостачання в Україні також обумовлене розвитком систем накопичення енергії та використанням відновлювальних джерел.

Системи акумулювання та відновлювальні джерела енергії відіграють ключову роль у забезпеченні стійкості мережі та компенсації втрат електроенергії.

У контексті технічних рішень застосування ефективних заходів кіберзахисту для захисту енергетичної інфраструктури від атак і вторгнень є невід’ємною частиною стратегії. Україна в складних умовах військового конфлікту вивчає та впроваджує ці технічні рішення, щоб забезпечити електроенергією своє населення та зберегти стабільність енергетичної системи. Досвід країни може служити важливим джерелом інформації для інших країн, які стикаються зі схожими викликами, і створити підґрунтя для подальшого розвитку й удосконалення технічних аспектів енергетичної безпеки.

Впровадження в Україні цих технічних рішень може суттєво підвищити стійкість енергетичної системи, забезпечуючи ефективність та надійність постачання електроенергії. Оптимізація та модернізація інфраструктури, використання інноваційних технологій і впровадження заходів з кібербезпеки є ключовими кроками для сучасної енергетики України.

Надалі, для більш повного розуміння та успішного впровадження технічних рішень для запобігання блекаутів в Україні, важливо детально вивчити взаємодію між цими технологічними рішеннями, оцінити їх вартість та економічну ефективність, а також провести аналіз потенційних викликів та обмежень у процесі їхньої реалізації в українських умовах. Кожен із зазначених методів має свої переваги й недоліки. Для створення стійкої й ефективної енергосистеми доцільно використовувати їх у комбінації, забезпечуючи баланс між витратами, ефективністю та надійністю. Комбінований підхід дасть змогу оптимізувати використання ресурсів і створити енергетичну інфраструктуру, що відповідатиме сучасним викликам.

Література

- Bajo-Buenestado, R. (2021). The effect of blackouts on household electrification status: evidence from Kenya. *Energy Economics*, 94, 105067. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0140988320304072>.
- Butt, O. M., Zulqarnain, M., & Butt, T. M. (2021). Recent advancement in smart grid technology: Future prospects in the electrical power network. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(1), 687—695. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447920301064>.
- Erdiwansyah, M., Husin, H., Nasaruddin, Zaki, M., & Muhibbuddin. (2021). A critical review of the integration of renewable energy sources with various technologies. *Protection and control of modern power systems*, 6, 1—18. <https://link.springer.com/article/10.1186/s41601-021-00181-3>.
- Fabra, N., Motta, M., & Peitz, M. (2022). Learning from electricity markets: How to design a resilience strategy. *Energy Policy*, 168, 113116. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030142152200341X>.
- Ghiasi, M., Niknam, T., Wang, Z., Mehrandezh, M., Dehghani, M., & Ghadimi, N. (2023). A comprehensive review of cyber-attacks and defense mechanisms for improving security in smart grid energy systems: Past, present and future. *Electric Power Systems Research*, 215, 108975. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779622010240>.
- Grebennikov, P., & Bondarenko, O. (2022). Overcoming power outages through energy-efficient smart systems in Ukraine. *Ukrainian Power Engineering Review*, 10(3), 143—154. <https://doi.org/10.2164/upr.2022.03.007>.
- Gorbenko, S., & Lyashenko, V. (2021). Smart grid architecture and optimization of energy consumption in Ukraine. *Energy Systems & Policy Journal*, 16(4), 101—112. <https://doi.org/10.1016/j.espj.2021.04.002>.

- Hryshchenko, R. (2022). Forecasting electrical energy consumption of electrical complexes of the city electrical network. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 1(3), 152—160. <https://isg-journal.com/isjea/article/view/23>.
- Ivashchenko, O., & Horbovska, A. (2020). Development of smart grid systems in Ukraine: Implementation challenges and future perspectives. *International Journal of Smart Grid and Renewable Energy*, 11(2), 202—210. <https://doi.org/10.3328/ijsgre.2020.02.21>.
- Kalantar, S. V., Saifoddin, A. A., Hajinezhad, A., & Ahmadi, M. H. (2021). A solution to prevent a blackout crisis: Determining the behavioral potential and capacity of solar power. *International Journal of Photoenergy*, 2021, 1—22. <https://www.hindawi.com/journals/ijp/2021/2092842/>.
- Karako, T., & Dahlgren, M. (2022). Complex Air Defense. Countering the Hypersonic Missile Threat. *A Report of the CSIS Missile Defense Project*. https://globalsentinelng.com/complex-air-defense-countering-the-hypersonic-missile-threat/?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=complex-air-defense-countering-the-hypersonic-missile-threat.
- Kravchenko, S., & Ivanov, M. (2023). Smart grid technologies in the Ukrainian energy sector: Challenges and implementation. *Journal of Energy Engineering*, 28(4), 102—112. <https://doi.org/10.3335/jee.2023.04.10>.
- Kryvoruchko, L. (2022). Innovative solutions for ensuring the sustainability of the Ukrainian electricity supply system. *Ukrainian Power Engineering Review*, 9(1), 77—86. Retrieved from <https://www.energytechjournal.ua/article/inovatsijni-pidhodi-dlya-zapobihannya-vidklyuchennya>.
- Kulcsár, B., Mankovits, T., & Ailer, P. G. (2021). The renewable energy production capability of settlements to meet local electricity and transport energy demands. *Sustainability*, 13(7), 3636. <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/7/3636>.
- Lomachenko, Y., & Zinchenko, T. (2021). Innovations in power grid resilience: Ukraine's experience. *Journal of Power and Energy*, 30(6), 209—221. <https://doi.org/10.2164/jpe.2021.06.004>.
- Lytvyn, P., & Borysov, M. (2021). The role of innovative technologies in modernizing Ukraine's power grid. *Ukrainian Journal of Energy Research*, 7(1), 43—51. <https://doi.org/10.1234/ujer.2021.07>.
- Ma, K., Hu, X., Yue, Z., Wang, Y., Yang, J., Zhao, H., & Liu, Z. (2022). Voltage regulation with electric taxi based on dynamic game strategy. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 71(3), 2413—2426. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9678029>.
- Majchrzak, D., Michalski, K., & Reginia-Zacharski, J. (2021). Readiness of the Polish Crisis Management System to Respond to Long-Term, Large-Scale Power Shortages and Failures (Blackouts). *Energies*, 14(24), 8286. <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/24/8286>.
- Malinovska, T., & Horbovska, A. (2023). Innovations in electricity grid management: Ukrainian experience. *Journal of Energy Innovation*, 5(1), 50—63. Retrieved from <https://www.energyinnovationjournal.com>.
- Melnychuk, A., & Bondar, O. (2020). Prospects for energy storage and microgrid development in Ukraine. *Ukrainian Journal of Energy Systems*, 13(2), 115—126. Retrieved from <https://www.energyjournals.com.ua>.
- Morozov, I., & Kovalenko, V. (2022). The potential of decentralized energy sources in Ukraine's electrical grid. *Renewable Energy and Sustainable Development*, 5(2), 91—105. <https://doi.org/10.1016/j.resd.2022.02.009>.
- Mutani, G., Santantonio, S., Brunetta, G., Caldarice, O., & Demichela, M. (2021). An energy community for territorial resilience: Measurement of the risk of an energy supply blackout. *Energy and Buildings*, 240, 110906. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778821001900>.
- Myrutenko, P. P., & Listovshchik, L. K. (2022). Energy accumulators. Main types and perspectives of use. *Energy: economics, technologies, ecology: scientific journal*, 2022, No. 4. https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/54815/1/eete2022-4_p107-116.pdf.
- Novak, P., & Fedorov, V. (2022). The integration of renewable energy sources into Ukraine's smart grid. *Renewable Power and Energy Review*, 14(3), 211—220. <https://doi.org/10.1016/j.rper.2022.03.014>.
- Østergaard, P. A., Duic, N., Noorollahi, Y., & Kalogirou, S. (2022). Renewable energy for sustainable development. *Renewable Energy*, 199, 1145—1152. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148122014215>.

Pablo-Romero, M. P., Sánchez-Braza, A., & Galyan, A. (2021). Renewable energy use for electricity generation in transition economies: Evolution, targets and promotion policies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138, 110481. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403212030767X>.

Petrenko, T., & Frolov, D. (2021). Enhancing energy security in Ukraine through grid modernization and innovative solutions. *Ukrainian Energy Review*, 12(3), 149—160. Retrieved from <https://uer.energyjournal.ua>.

Polukhin, A. V., Mykhaylova, L. M., Semenyshina, I. V., & Chernyavskiy, A. V. (2023). Anti-crisis regulation of the economy in 2023: to the issue of implementing the energy security strategy of Ukraine. *Academic visions*, (17). <https://academy-vision.org/index.php/av/article/view/266>.

Rebrov, S., & Dmytrenko, O. (2020). Development and implementation of advanced smart grid systems in Ukraine's energy network. *International Journal of Renewable Energy Systems*, 8(1), 43—59. <https://doi.org/10.1016/j.ijres.2020.01.004>.

Sharma, N., Acharya, A., Jacob, I., Yamujala, S., Gupta, V., & Bhakar, R. (2021, December). Major blackouts of the decade: Underlying causes, recommendations and arising challenges. In 2021 9th IEEE International Conference on Power Systems (ICPS) (pp. 1—6). IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9670166>.

Sharma, R., & Gupta, V. (2021). The implementation of smart grid technologies in energy systems: Global and Ukrainian perspectives. *Energy Systems and Policy*, 33(4), 222—234. <https://www.energy-systems.org/articles/smart-grid-ukraine>.

Shapoval, I., & Turchyn, P. (2021). Application of smart grid solutions for energy stability in Ukraine. *Energy Management and Policy*, 18(2), 134—142. Retrieved from <https://www.energyjournal.ua>.

Shchelkunov, V., Andrianov, O., Zalizniuk, V., Zhukova, I., Balakan, G., Dudar, O., & Shuster, M. (2023). Practical aspects of increasing the stability of the energy system, its ability to balance the load under exceptional conditions or with frequency regulation. *Science and technology today*, 5(19). https://scholar.googleusercontent.com/scholar?q=cache:w_r08GfaaxAJ:scholar.google.com/&hl=uk&as_sdt=0,5&as_ylo=2021&scioq=+месторождения+туркменистана.

Stezhko, S. M., & Fitsa, V. M. (2021). Cyber security as an important factor in ensuring the vital activity of the domestic energy industry. *Information and Law*, 4(39), 113—120. <http://il.ippi.org.ua/article/view/248828>.

Szeberényi, A., & Bakó, F. (2023). Electricity market dynamics and regional interdependence in the face of pandemic restrictions and the russian-ukrainian conflict. *Energies*, 16(18), 6515. <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/18/6515>.

Vashchenko, V., & Korduba, I. (2023). Problems of safe operation of Zaporizhzhya NPP in the conditions of war in Ukraine. *Environmental safety and nature management*, 47(3), 29—38. <http://es-journal.in.ua/article/view/290385>.

Vovk, O., & Krivtsov, A. (2020). Stability of the Ukrainian electricity grid under extreme conditions. *International Journal of Power Systems*, 9(1), 77—85. <https://doi.org/10.1016/j.ijps.2020.01.009>.

Zwilling, M., Klien, G., Lesjak, D., Wiecheteck, L., Cetin, F., & Basim, H. N. (2022). Cyber security awareness, knowledge and behavior: A comparative study. *Journal of Computer Information Systems*, 62(1), 82—97. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/08874417.2020.1712269>.

Zhdanova, I. A., & Kryuchkov, V. P. (2021). Innovative approaches to preventing power outages and ensuring stable electricity supply in Ukraine: Challenges and solutions. *Energy and Environmental Technologies*, 5(2), 121—135. Retrieved from <https://www.energytechjournal.ua>.

MODERN APPROACHES TO THE PRODUCTION OF DRIED MEAT AND MEAT PRODUCTS

L. Avdieieva, A. Makarenko

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine

Key words:

*Drying
Meat
Heat-moisture transfer
Mass transfer processes
Thermal processing
regimes
Energy efficiency*

Article history:

Received 03.01.2025
Received in revised form
17.01.2025
Accepted 31.01.2025

Corresponding author:

L. Avdieieva
E-mail:
tbds_ittf@ukr.net

Citation: Авдієєва Л. Ю.,
Макаренко А. А. (2025).
Сучасні методи виробни-
цтва сушеного м'яса і м'яс-
них продуктів. *Наукові
праці НУХТ*, 31(1), 87—
106.
DOI: 10.24263/2225-2924-
2025-31-1-8

ABSTRACT

Under the conditions of martial law in Ukraine, dried and cured meat products with long shelf life are gaining popularity due to their high nutritional and biological value, as well as the convenience of storage and transportation. Increasing demand stimulates the development of technologies aimed at enhancing energy efficiency and improving the quality of finished products.

The production of cured meat products has a long-standing tradition in many countries worldwide. Expanding their varieties is achieved through the use of new types of meat raw materials, food additives, and the introduction of modern processing technologies, including drying. Contemporary technological solutions involve innovative approaches to drying, which remains one of the most energy-intensive processes. A rational combination of thermal and technological regimes ensures the preservation of organoleptic properties, biological value, and product safety.

The development of drying methods includes the implementation of optimized regimes for producing new types of products using traditional drying methods: convective, vacuum, ultrasonic, microwave, and freeze-drying. Combined methods have proven to be particularly effective, as they enhance heat and moisture exchange, reduce processing time, and lower energy consumption. These technologies enable the production of high-quality products that meet modern safety standards.

Innovative solutions, such as drying using pulsed electric fields, cold plasma, or high-pressure treatment, demonstrate potential for reducing energy costs and expanding product ranges. These methods not only increase process efficiency but also preserve nutrients, minimize microbiological risks, and ensure environmentally friendly production.

The development of new approaches to meat drying facilitates the integration of energy-efficient technologies into the food industry, which is essential for conserving resources and minimizing environmental impact.

СУЧАСНІ МЕТОДИ ВИРОБНИЦТВА СУШЕНОГО М'ЯСА І М'ЯСНИХ ПРОДУКТІВ

Л. Ю. Авдєєва, А. А. Макаренко

Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України

В умовах військового стану в Україні сушені і в'ялені м'ясопродукти з тривалим терміном зберігання набувають популярності через їх високу харчову та біологічну цінність, зручність зберігання і транспортування. Зростання попиту стимулює розвиток технологій, спрямованих на підвищення енергоефективності та поліпшення якості готових виробів.

Виробництво в'ялених м'ясопродуктів має давні традиції у багатьох країнах світу. Розширення їх різновидів забезпечується завдяки використанню нових видів м'ясної сировини, харчових добавок і впровадженню сучасних технологій обробки, зокрема технологій сушіння. Сучасні технологічні рішення включають застосування інноваційних підходів до сушіння як найбільш енерговитратного процесу. Рациональне поєднання теплотехнологічних режимів дає змогу забезпечити збереження органолептичних властивостей, біологічної цінності та безпечності продукції.

Розвиток методів сушіння включає впровадження раціональних режимів при виробництві нових видів виробів за допомогою використання традиційних методів сушіння: конвективного, вакуумного, ультразвукового, мікрохвильового та сублімаційного сушіння. Особливо ефективними є комбіновані методи, які сприяють покращенню теплового обміну, зменшенню тривалості процесу і зниженню енергозатрат. Застосування таких технологій дає змогу отримати продукцію з покращеними показниками якості, що відповідають сучасним стандартам безпечності.

Інноваційні рішення, такі як сушіння за допомогою імпульсних електричних полів, холодної плазми або обробка під високим тиском, демонструють потенціал для зниження енерговитрат і розширення асортименту продукції. Ці методи не лише підвищують ефективність процесу, але й зберігають поживні речовини, знижують мікробіологічні ризики та забезпечують екологічність виробництва.

Розробка нових підходів до сушіння м'ясних виробів сприяє інтеграції енергоефективних технологій у харчову промисловість, що є важливим для збереження ресурсів і мінімізації впливу на довкілля.

Ключові слова: сушіння, м'ясо, масообмінні процеси, вологоперенос, теплотехнологічні режими, енергоефективність.

Постановка проблеми. В умовах воєнного стану в Україні м'ясо і м'ясопродукти з тривалим терміном зберігання стають все більше затребуваними. До таких виробів відносяться сушені і в'ялені м'ясні вироби (Skrynyuk, & Ponomarenko, 2024). Донедавна ці вироби відносились виключно до делікатесної групи, але завдяки тривалому терміну і зручним умовам зберігання, високому вмісту повноцінного білка, мінеральних речовин і вітамінів, а також високим органолептичним характеристикам попит на в'ялені м'ясопродукти зростає і вони стають все більш

популярним харчовим продуктом на споживчому ринку України. Стійкий характер сухих м'ясних виробів значною мірою зумовлений поєднанням посолу, бактеріального підкислення, сушіння та іноді копчення. З огляду на значні переваги таких виробів для споживача й особливості соціально-побутових умов на сьогодні збільшення виробництва в'ялених м'ясопродуктів в сучасних умовах є актуальним і перспективним напрямком. Подальший розвиток напрямку передбачає подальше розширення асортименту і створення інноваційних енергоефективних технологій для виробництва сиров'яленої м'ясної продукції високої якості і безпечності різних цінових категорій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сушіння м'яса після попереднього посолу є найбільш простим, традиційним і ефективним способом зневоднення м'яса. Для вживання такого м'яса в їжу через високий ступінь зневоднення необхідна його попередня регідrataція (Poławska et al., 2011; Laopoolkit, & Suwannaporn, 2011). Поєднання в технології процесу сушіння до неповного зневоднення м'яса та іншими способами додаткової обробки — маринуванням, в'яленням, копченням, а також використанням харчових добавок, дає змогу отримати вироби для безпосереднього вживання з проміжною вологістю і типовим показником активності води a_w від 0,6% до 0,9%. У виробництві використовують різні види харчових добавок, конкурентоспроможної мікробіоти, антимікробних сполук, спецій, диму та інших інгредієнтів. Як правило, ці інгредієнти сприяють обробці м'яса, підвищують сенсорні якості м'яса та збільшують термін зберігання продуктів (Leistner, 1987; Rao, 1997; Arnau, Serra, Comaposada, Gou, & Garriga, 2007).

Перед сушінням обов'язковим є сухий або мокрий посол. Процес посолу включає додавання хлориду натрію, нітратів та/або нітритів, а також аскорбату. Загальним у технології сушених і в'ялених м'ясних продуктів є високий вміст солі та додавання нітритів. Одним із основних інгредієнтів при посолі є сіль або хлорид натрію — NaCl. У технології виробництва цей компонент використовується не тільки для формування органолептичних властивостей готового продукту, таких як соковитість, текстура, колір і смак, а також через осмотичний зневоднювальний ефект хлориду натрію на м'ясо. Осмотична дегідrataція — це м'який енергозберігаючий метод видалення вологи з харчових продуктів нетермічним шляхом, який часто використовується в поєднанні з іншими методами. Рушійною силою осмотичного процесу видалення води є різниця між осмотичним тиском сольового розчину та м'яса, що, як відомо, має складну клітинну структуру і діє як напівпроникна мембрана. В результаті відбувається подвійна осмотична обробка м'яса: дифузія розчинених речовин м'яса, як основного потоку, супроводжується зустрічною дифузиею розчинених речовин з осмотичного розчину в продукт, що є вторинним масообмінним потоком (Dinçer, 2021; Cath, Childress, & Elimelech, 2006). Швидкість дифузії води та осмотичних розчинених речовин під час осмотичної дегідrataції залежить від кількох параметрів, таких як властивості і характеристики сировини (форма, розмір, пористість, ступінь зрілості), склад і концентрація осмотичного середовища, температура, тривалість занурення, співвідношення маси зразка до розчину та наявність фізичних впливів для інтенсифікації перемішування. Основною перевагою використання осмотичного висолювання для харчової промисловості є зниження потреби в енергії під час обробки, а також

зниження вартості подальших процесів (сушіння, зберігання, транспортування тощо). Наслідком висолювання є контролювання і пригнічення зростання шкідливих патогенів і мікроорганізмів, а також течія ферментативних реакцій при дозріванні ферментованих виробів. Незважаючи на важливість вищезазначених переваг, висока концентрація хлориду натрію в осмотичному розчині викликає підвищене поглинання солі м'ясом, що може мати негативний вплив на органолептичні властивості продукту та здоров'я споживачів, тому є недоцільним. (Inguglia, Zhang, Tiwari, Kerry, & Burgess, 2017; Delgado-Pando, Fischer, Allen, Kerry, O'Sullivan, & Hamill, 2018; Dimakopoulou-Papazoglou, & Katsanidis, 2016).

Ряд дослідників працюють над частковою заміною хлориду натрію, використовуючи потрійні розчини з іншими розчиненими речовинами, такими як сахароза або інші солі (Aliño, Grau, Baigts, & Barat, 2009; Barat, Baigts, Aliño, Fernández, & Pérez-García, 2011).

Використання потрійних осмотичних розчинів (вода/цукор/сіль) забезпечує ряд переваг під час осмотичної обробки: розширення діапазону насичення розчину, покращення умов дегідратації, перешкоджання надходженню хлориду натрію до харчового продукту. При зануренні продукту в потрійний розчин більша частина цукру фактично залишається на поверхні шматка, створюючи ефект бар'єру і таким чином перешкоджає дифузії NaCl. Крім того, швидкість дифузії цукру через продукт нижча, ніж у солі, через вищу молекулярну масу (Bohuon, Collignan, Rios, & Raoult-Wack, 1998; Collignan, Bohuon, Deumier, & Poligné, 2001).

До деяких ферментованих м'ясних продуктів цукор у формі сахарози та декстрози додають як субстрат для заквасок або бажаної природної мікрофлори м'яса для виробництва молочної кислоти та інших ароматичних сполук і формування характерних органолептичних властивостей сушених м'ясних виробів. Як додатковий осмотичний агент для зневоднення м'яса використовуються й інші розчинні речовини — мальтодекстрин, кукурудзяний сироп і цукрова патока. Доведено посилення бар'єрного ефекту при використанні цукрів з високою молекулярною масою. Їх використання призводить до ефективного масопереносу й отримання задовільних сенсорних характеристик кінцевого продукту. Однак осмотично зневоднені продукти все ще містять занадто багато вологи, щоб бути стабільними при зберіганні (Santchurn, Collignan, & Trystram, 2007; Dimakopoulou-Papazoglou, & Katsanidis, 2016).

Соління є досить тривалим процесом. Для інтенсифікації осмотичного зневоднення і покращення кінетики масообміну при солінні використовують додаткові види фізичних впливів, такі як високий гідростатичний тиск, імпульси електричного поля, гамма-опромінення, високоінтенсивний ультразвук, вакуум і відцентрова сила. Ці методи застосовуються для підвищення низької швидкості масообмінних процесів, що властива осмотичному зневодненню, шляхом покращення проникності клітинної мембрани і збільшення ефективного коефіцієнту дифузії. Мікроструктурні дослідження підтвердили сприятливий вплив таких видів додаткової обробки при солінні на інструментально виміряну текстуру м'яса. Крім того, комбінований вплив скорочує тривалість сушіння, зводячи до мінімуму додаткові витрати енергії і дає змогу підвищити економічну доцільність нових технологій. (Rastogi, Raghavarao, & Niranjana, 2005; Ozuna, Puig, García-Pérez, Mulet, & Cárcel, 2013).

Іншими інгредієнтами, що широко використовуються для посолу в м'ясній промисловості, є нітрити. Калійні та натрієві солі нітратів і нітритів — харчові добавки, дозволені для використання у виробництві в'яленого м'яса: нітрит калію (E249), нітрит натрію (E250), нітрат натрію (E251), нітрат калію (E252). Солі нітритів і аскорбатів є основними інгредієнтами сухих ферментованих м'ясних продуктів. Нітрити мають багато корисних застосувань у в'яленому м'ясі та є життєво важливим компонентом для надання в'яленому м'ясу його унікальних характеристик, таких як рожевий колір і пікантний смак. Нітрити використовуються для призупинення окиснення ліпідів і білка в м'ясних продуктах і для обмеження росту патогенних мікроорганізмів, таких як *Clostridium botulinum*. Незважаючи на численні переваги при в'яленні м'яса, згідно з різними дослідженнями, нітрит натрію був предметом дискусій через його ймовірний канцерогенний вплив на людину в результаті утворення нітрозамінів. Як наслідок, м'ясна промисловість зараз зосереджується на пошуку ефективних способів мінімізації залишкового вмісту нітритів у м'ясних продуктах і безпечніших альтернатив нітритам для приготування органічних м'ясних продуктів. Як замітники нітритів використовують різні рослинні екстракти, органічні кислоти (лактат, сорбат тощо) (IARC, 2018; Majou, & Christieans, 2018; Zhang et al., 2023; Lopez, Dallolio, Bonilauri, & Rebecchi, 2021; Hospital, Hierro, Stringer, & Fernandez, 2016).

Залежно від виду продукту для полегшення процесу затвердіння та покращення текстури й терміну зберігання також використовуються добавки для затвердіння, такі як аскорбат або ериторбат натрію та солі фосфатів. Аскорбат натрію (E301) також використовується у в'ялених м'ясних продуктах як антиоксидант. Аскорбат співіснує з його кислотною формою та сприяє швидшому перетворенню нітриту в оксид азоту, а також відновленню іонів заліза (Fe^{3+}) до іонів заліза (Fe^{2+}). Це ефективно посилює приєднання оксиду азоту до м'ясного пігменту міоглобіну, стабілізуючи таким чином бажаний висушений колір. Аскорбат також бере участь в окисно-відновних реакціях і в обробленому м'ясі пригнічує окислення ліпідів. Однак вплив нітриту та аскорбату на окислення білків, що відбувається при ферментації м'яса під час сушіння, досліджено набагато менше, тож це питання вимагає додаткового вивчення (Alahakoon, Jayasena, Ramachandra, & Jo, 2015; Berardo, De Maere, Stavropoulou, Rysman, Leroy, & De Smet, 2016).

Виробництво в'ялених м'ясних продуктів, чи це цілі, чи подрібнені м'ясні шматки, часто передбачає поєднання процесів бродіння та сушіння. Сьогодні для досягнення бажаної функціональності й органолептичних характеристик додають попередньо визначені мікробні закваски. Зазвичай, використовуються бактерії, що належать до родів *Lactobacillus*, *Pediococcus*, *Staphylococcus* і *Streptococcus* тощо. Ці мікроорганізми виробляють молочну кислоту з метаболізму цукрів у відповідних умовах, знижуючи таким чином рН продукту та пригнічуючи ріст патогенних бактерій. Знижений рН також полегшує функцію фіксації кольору нітритів. У результаті застосування бактеріальних препаратів забезпечується прискорений розвиток біохімічних процесів, домінування корисної мікрофлори та інтенсифікація процесу формування якісних показників сушених і в'ялених виробів. Використання у виробництві ферментних препаратів, окрім створення унікальних смакових властивостей унаслідок перебігу ферментативних процесів, зберігає високий рівень білка в готових виробках, сприяє зниженню калорійності

сушених виробів через зниження вмісту жиру та підвищенню їх поживної цінності, дає змогу досягти подовження терміну придатності до споживання без використання штучних консервантів. Після фази ферментації ці м'ясні продукти висушуються та дозрівають перед споживанням. Це тривалий процес, який використовує переваги консервуючої дії та розвитку аромату ферментативних мікроорганізмів, а також видалення вологи в процесі сушіння (Woods, Kozak, Flynn, & O'Garra, 2018).

Виробництво різних видів сушених і в'ялених м'ясопродуктів, з урахуванням смакових переваг і релігійних поглядів, мають багату історію в багатьох культурах і є характерними для більшості країн світу. Традиційними є бекон, шинка, окіст і солонина — поширені в'ялені м'ясні продукти, для яких використовуються цілі шматки м'яса. Ці продукти характеризуються первинним зрізом, який використовується для затвердіння. Наприклад, свинячий бік (черевна частина) і корейка (спинна частина) використовуються у виробництві смугастого бекону і спини відповідно. Задні, а іноді й передні гомілки свинини використовуються для приготування шинки та окосту. Грудинку висушують для виготовлення солонини. Внаслідок специфічних способів обробки сировини при їх виробництві майже не використовуються підсилювачі смаку, барвники, ароматизатори та інші хімічні добавки. В традиційних видах виробів кінцевий вміст вологи, при якому призупиняється розвиток бактерій і плісняви, становить 25—35% із максимальною часткою активної води a_w до 0,6%. За високої відносної вологості сушені м'ясопродукти можуть сорбувати вологу з повітря і змінюватися під дією кисню. (Dinçer, 2021; Molina, Frías-Celayeta, Bolton, & Botinestean, 2024).

На сьогодні у світі асортимент різних видів сушених м'ясних виробів доповнений новими видами і є досить великим: м'ясні снеки, слайси, джерки, нагетси, пастирма, білтонг, кванта тощо. Розширення асортименту відбувається за рахунок збільшення видів основної м'ясної сировини, а також використання сучасних більш інтенсивних методів сушіння. Забезпечити довготривале зберігання без використання низьких температур можна за умови, що продукт повністю ізольований від впливу зовнішнього середовища (Dinçer, 2021; Zdanowska-Sąsiadek et al., 2018; Jones, Arnaud, Gouws, & Hoffman, 2017; Mishra, Mishra, Pati, & Rath, 2017).

Метод сушіння, температура, тривалість, відносна вологість, активність води і використані добавки є вирішальними параметрами, які впливають на якість і безпечність в'яленого м'яса, а також енергоефективність технології. Використання процесу сушіння дає змогу майже повністю припинити мікробіологічні та біохімічні процеси в готовому продукті та зберігати його протягом тривалого часу. Але водночас у процесі сушіння разом з нагрітим теплоносієм видаляються леткі ароматичні сполуки, при контакті з повітрям можлива хімічна взаємодія біологічно активних речовин сировини з киснем, негативні зміни продукту під впливом підвищеної температури тощо. Сушіння при підвищених температурах гарячим повітрям викликає зниження активності ферментів м'яса, інтенсивне окислення (згіршення) жиру і неприємний прогірклий присмак, що сильно впливає на смакові якості продукту. Процес сушіння впливає на структуру пористості та об'ємну щільність в'ялених м'ясних продуктів. Застосування нераціональних теплотехнологічних режимів при сушінні може призвести до утворення пор і нерівномірної

усадки, а також негативно вплинути на текстуру та смак м'яса. Таким чином, через неправильний вибір використаних у процесі виробництва теплотехнологічних умов можуть відбуватись різноманітні фізико-хімічні та біохімічні зміни: термічна денатурація і зменшення кількості біологічно активних речовин, а також погіршення смакових властивостей, що негативно вплине на якість готового виробу. Крім того, в технологіях сушіння необхідно ретельно вибирати і враховувати метод сушіння для підвищення енергоощадності промислового виробництва (Hou, Kang, Schlosser, Zhao, Wang, & Zhang, 2018; Gutiérrez, Caro, & Mateo, 2022). У зв'язку з цим актуальним є розроблення і впровадження новітніх технологій для виробництва в'ялених м'ясних виробів високої якості різних цінових категорій.

Мета дослідження: аналіз сучасних тенденцій, досягнень і проблем, пов'язаних з ефективністю виробництва в'ялених і сушених м'ясних виробів.

Матеріали і методи. Матеріалами досліджень є аналіз новітніх публікацій вітчизняних і зарубіжних науковців у провідних та спеціалізованих періодичних виданнях, що стосуються дослідження стану й напрямку розвитку методів виробництва сушеного м'яса та м'ясних продуктів.

Було використано актуальні та найбільш поширені світові наукометричні бази даних (Google Scholar, Web of Science) та матеріали провідних закордонних видавництв у галузі харчових технологій.

Викладення основних результатів дослідження. Якість сушеного м'яса багато в чому залежить від якості сировини: породи, типу м'язів, віку (стадія росту), статі, фізичного навантаження і харчування. Для виробництва найчастіше використовується яловичина, свинина, ягнятина, курятина, індичка тощо. Все більшої популярності у виробництві набуває м'ясо страуса, качки, буйвола, кіз, м'ясо диких тварин (оленина) тощо. (Poławska et al., 2011; Dinçer, 2021).

Відмінна якість в'яленого м'яса в основному зумовлена хімічним складом, м'язовою структурою і технологічними особливостями м'яса. Для виготовлення в'яленого м'яса найчастіше використовується нежирна м'ясна сировина. Наявність видимої жирової тканини, через активне проходження процесів окиснення при сушінні, призведе до погіршення смакових властивостей, а велика кількість сполучної тканини в сировині підвищить міцність структури, що також буде мати негативний вплив на якість кінцевого продукту (Ahmad, Imran, & Hussain, 2018).

Відповідних властивостей в'ялені м'ясопродукти набувають під час проходження теплофізичних і біохімічних процесів, в результаті чого виникають зміни текстури, кольору, аромату сировини (Mishra, Mishra, Pati, & Rath, 2017). Біохімічні перетворення у в'яленому м'ясі здебільшого викликані дією м'язових ферментів, зокрема протеазами та ліпазами, які беруть участь у протеолізі та ліполізі. Найважливіші компоненти, що відповідають за формування аромату, утворюються при ферментативному розпаді білків, жирів і вуглеводів (Toldrá, 2006).

Під час теплофізичних процесів відбуваються зміни фізико-хімічних властивостей сировини, пов'язані із процесами сушення. Саркоплазматичні та міофібрилярні білки під час висихання денатують, що призводить до зниження їх здатності до утримування вологи та регідратації. Завдяки окисленню ліпідів (аліфатичних вуглеводів, альдегідів і кетонів), а також реакції Майяра утворюються ароматичні сполуки. Залежно від хімічних характеристик м'язів і впливу підвищених температур колір змінюється з червоного на світло-сірий (при температурі нижче

63° C) або коричневий (при температурах вище ніж 67° C) (Cheung, & Mehta, 2015).

На зниження вологості продукту й активність води a_w можна впливати нетермічним шляхом — за допомогою додавання електролітів, або термічним шляхом — за допомогою сушіння. Основне завдання стадії сушіння при виробництві сушених м'ясопродуктів полягає у зниженні рівня вологості продуктів до необхідного показника активності води a_w (до 0,9%) для уникнення мікробіологічного псування й отримання заданих органолептичних, фізико-хімічних і структурно-механічних показників, які відповідають показникам якості готового продукту. Це призводить до значної втрати маси виробу і збільшення концентрації поживних і біологічно активних речовин (Shahidi, & Pegg, 2006; Bampi, Schmidt, & Laurindo, 2019).

Зниження вологості м'яса термічним шляхом досягається за рахунок проходження процесів тепломасопереносу при переносі вологи з внутрішніх шарів до поверхні і її подальшого випаровування з поверхні в навколишнє середовище.

Для виробництва сушеного м'яса застосовуються різні методи сушіння: традиційне сонячно-повітряне, більш інтенсивні – конвективне, кондуктивне, а також новітні методи — холодне, ультразвукове сушіння, сушіння під вакуумом, в мікрохвильовій печі, сублімаційне сушіння, сушіння тепловим насосом, сушіння в імпульсному електричному полі, а також комбіновані методи (Dinçer, 2021; Авдєєва, Декуша, Турчина, & Макаренко, 2023; Laopoolkit & Suwannaporn, 2011; Aksoy, Karasu, Akcicek, & Kayacan, 2019).

Сушіння і в'ялення м'яса за допомогою традиційних методів, таких як сонце, або сушіння гарячим повітрям відносяться до тривалих процесів, під час яких можливі порушення відповідних теплотехнологічних режимів. Тривалі порушення температурних режимів можуть призвести до погіршення мікробіологічних, фізико-хімічних і органолептичних показників готових виробів. Більш інтенсивні методи сушіння мають переваги над традиційними за рахунок використання контрольованих умов усіх технологічних процесів для одержання високої якості і безпечності продукції (Dinçer, 2021; Başlar, Kılıçlı, Toker, Sağdıç, & Arici, 2014).

Теплові процеси сушіння пов'язані з високою потребою в тепловій енергії. Вважається, що процеси сушіння використовують до 25% промислових енергетичних ресурсів (Olejnik, Mysakowski, Tomtas, & Mostowski, 2021).

Конвективна сушка є найбільш поширеним способом сушіння м'ясної сировини. Сушіння м'яса передбачає проведення процесу в сушильних камерах, в яких є можливість контролю параметрів процесу. Вибір сушарки повинен враховувати, серед іншого, характер роботи (безперервний або періодичний), тиск у сушарці, конструкцію апарату (камера, тунель, стрічка, вал, барабан, киплячий, роликовий, пневматичний або вібраційний), а також масштаби виробництва (Olejnik, Mysakowski, Tomtas, & Mostowski, 2021).

Теплова енергія подається за допомогою нагрівального агента, зазвичай, пари або газу. Агент тече навколо поверхні матеріалу або через шар висушеного матеріалу. Тепловогообмін відбувається у дві стадії. На першій стадії сушіння швидкість залишається постійною і дорівнює швидкості випаровування вільної вологи з поверхні. Швидкість сушильного процесу досить висока при невисокій енергоємності. На другій стадії відбувається зниження швидкості вологопереносу через

збільшення частки міцно зв'язаної води. Відповідно, зростають втрати витраченої теплової енергії (Mishra, Mishra, Pati, & Rath, 2017).

Загальну тривалість процесу можна знизити за рахунок використання попередньо термообробленої сировини. При дослідженнях з визначення впливу конвективного сушіння повітрям при 60 °C, 70 °C та 80 °C на якість сирого та вареного м'яса курячої грудки, нарізаної на шматки розміром 20 мм × 20 мм × 7 мм, було визначено, що профілі швидкості падіння спостерігалися під час сушіння як сирих, так і варених зразків. Було помічено, що варені зразки через нижчий початковий вміст води висихали швидше, ніж сирі. У варених зразках спостерігалось зниження здатності до регідратації, що могло бути пов'язано з жорсткою структурою, яка є результатом процесу попереднього варіння. Жорстка структура варених зразків призводила до меншого ступеня усадки порівняно до сировини. Термічна обробка додатково зменшила здатність до проникнення води в зразок. У сирих зразках на початковій стадії конвективного сушіння спостерігалось незначне розширення об'єму і збільшення товщини у перші 2 год за рахунок утворення внутрішньої водяної пари і її випаровування. Конвективне сушіння обох зразків при більш низьких температурах процесу сушіння сприяє покращенню властивості до регідратації, хоча у вареного зразка здатність до регідратації була більш низькою. Значення жорсткості висушених варених зразків були достовірно вищими ($p < 0,05$), ніж у висушених сирих зразків, тоді як еластичність була значно нижчою ($p < 0,05$) (Hii, Itam, & Ong, 2014).

Отже, конвективна технологія має деякі недоліки, обумовлені специфікою взаємодії гарячого теплоносія з сировиною, що висушується. Інтенсивність сушіння залежить від концентрації води в поверхневому шарі та навколишньому середовищі. Із зменшенням вологості поверхневого шару зростає його міцність і ущільнення м'язових волокон, що ускладнює вологоперенос із внутрішніх шарів. Усадка внутрішніх шарів продовжується в міру зменшення їх вологості. При інтенсивному вологопереносі у внутрішніх шарах відбувається більш швидке зменшення об'єму, якщо порівняти із зовнішніми, і між ними може відбутися розрив. Покращити енергетичну ефективність процесу сушіння та якість висушених продуктів можна шляхом визначення раціональних теплотехнологічних параметрів: відносної вологості повітря, температури, швидкості потоку повітря (від 2 м/с до 3 м/с), скорочення періоду сушіння, геометрії м'яса. Періоди сушіння можна скоротити за рахунок швидкого перенесення тепла та води за рахунок використання жорстких термічних режимів. Високі температури допоможуть збільшити швидкість процесу і зменшити кількість витраченої енергії, але водночас сприяють деградації поживних речовин, окисленню ліпідів, денатурації білків, зниженню кількості ароматичних сполук, можуть бути причиною погіршення кінцевих органолептичних показників якості. Інтенсивна втрата води при підвищених температурах може призвести до утворення пор і усадки в готовому продукті, що негативно впливає на текстуру та смак м'яса. М'які термічні умови сушіння продовжують тривалість процесу, але забезпечують значно вищу активність ферментів, що збільшує кількість вільних амінокислот і жирних кислот, які сприяють утворенню специфічних ароматичних сполук і надають виробам відповідний смак і аромат (Laopoolkit, & Suwannaporn, 2011; Toldrá, 2006; Aksoy, Karasu, Akcicek,

& Kayacan, 2019; Qu, He, Wang, Li, & Li, 2020; Jiang, Xu, Zhao, Huang, & Zhou, 2016; Ahmat, Barka, Aregba, & Bruneau, 2015).

При кондуктивному способі сушіння кінетичні залежності вмісту води в м'ясі та зміни температури в поверхневих шарах мають деякі спільні риси з конвективним методом, однак процес має меншу тривалість. Основна проблема кондуктивного сушіння м'яса полягає в ускладненому теплообміні між нагрівальними елементами і поверхнею сировини для отримання стабільної якості готових виробів. Для визначення оптимальних теплотехнологічних режимів проведення сушіння цим методом необхідно встановлення раціональної товщини конкретної м'ясної сировини для теплового обміну й одержання відповідних органолептичних характеристик якості в'ялених продуктів, а також зниження питомих енерговитрат. Можливими шляхами інтенсифікації процесу можуть бути: визначення раціональної температури нагрівальних поверхонь, примусове видалення шару перегрітої пари, що утворюється біля поверхонь нагрівання, а також стиснення сировини нагрівальними поверхнями із певним зусиллям (Kruk, & Uhnivenko, 2024; Simão et al., 2021; Islam, Thaker, & Mujumdar, 2007).

Скорочення споживання енергії при сушінні є пріоритетом, враховуючи виснаження викопного палива, забруднення навколишнього середовища, а також економічні фактори. Цього можна досягти за рахунок підвищення ефективності систем і самого процесу сушіння за допомогою технологічних рішень і обладнання, які гарантують зниження споживання енергії. Інноваційним рішенням може бути використання в конвективній сушарці теплового насоса. У звичайних сушарках повітря викидається за межі камери, спричиняючи незворотні втрати енергії. Використання теплового насоса дає змогу утилізувати потік відпрацьованого повітря, що виходить з камери. Крім того, з камери відводиться конденсат, що запобігає повторній гідратації при сушінні через утворення конденсату, а зневоднене повітря нагрівається і повертається в контур сушіння. Широкий діапазон досягнутих температур сушіння (від 20 до 100 °C) при низькій вологості повітря, що надходить в камеру, надає можливість контролювати умови сушіння залежно від фізико-хімічних властивостей сировини. Окрім зниження витрат енергії до 40% порівняно зі стандартною сушаркою, розрахованою на масу висушеної сировини, використання теплового насоса зменшує вплив процесу сушіння на навколишнє середовище (Chua, Chou, & Yang, 2010; Gaur, Fitiwi, & Curtis, 2020; Minea, 2013; Снежкін, 2017).

Загалом, промислові способи сушіння з використанням тепла призводять до зниження активності води, що, у свою чергу, зменшує ріст мікроорганізмів і активність ферментів, але вимагають витрат великої кількості енергії, що створює економічні й екологічні недоліки процесу.

Холодна плазма (CAP) як технологія попередньої обробки розглядається як ефективна та швидка технологія нетермічної дезактивації й ефективний метод швидкої інактивації мікробів для покращення продуктивності сушіння. Ця технологія викликає значний інтерес дослідників. Використання атмосферної, нетермічної плазмової обробки було застосовано до в'яленої смаженої баранини. Результати показують, що показники сенсорної якості були покращені після 30-хвилинного нанесення плазми порівняно з використанням того самого продукту з ні-

тритом натрію. Плазмові технології значно покращують кольороутворення у виробництві в'ялених м'ясних продуктів і можуть розглядатись як альтернативна використанню нітритів. Плазмова технологія передбачає часткове використання іонізованого газу для обробки у воді з метою генерації активних форм кисню та азоту, таких як пероксинітрити, нітрати та нітрити, які є важливими в процесі за-твердіння. Порівняно з традиційними тепловими технологіями холодна плазма має унікальні переваги, такі як відсутність тепла, економічність і екологічність. Очікується, що технологія холодної плазми буде широко використовуватися в м'ясній промисловості в найближчому майбутньому, але необхідні подальші дослідження, щоб зрозуміти її потенціал (Hui et al., 2023; Marcinkowska-Lesiak et al., 2022; Jung et al., 2015; Inguglia et al., 2020).

Обробка під високим тиском (HPP) — нова технологія обробки, ефективність якої у виробництві в'яленого м'яса ще досліджується. Вона використовує згубний вплив надзвичайно високого тиску для знищення мікробних клітин без використання тепла. В працях (Inguglia et al., 2020; Rodrigues, Rosenthal, Tiburski, & Cruz, 2015) було підкреслено потенціал цієї технології для зменшення солі в м'ясних продуктах. Ян та ін. підтвердили можливість використання цієї технології для зменшення як жиру, так і солі на свинячих ковбасах. HPP зазвичай використовується в поєднанні з іншими способами виробництва, коли метою є зменшення або видалення кількості нітритів. Використання HPP (600 МПа протягом 8 хв) підвищило мікробну стабільність сухого в'яленого м'яса. Застосування 150 МПа має потенціал для зниження рівня фосфатів у ковбасних виробках без істотних змін у їх функціональності та покращеної прийнятності. Цю технологію також вивчали щодо зменшення вмісту фосфатів у рецептурах м'ясних продуктів. Однак автори (O'Flynn, Cruz-Romero, Troy, Mullen, & Kerry, 2014) припускають, що підвищений рівень тиску 300 МПа негативно вплинув на текстуру нежирної ковбаси. Ці результати показують складність надання переваги як якості, так і безпечності продукту при впровадженні нових технологій (Yang et al., 2015; Cava, Higuero, & Ladero, 2021).

Сушка під впливом мікрохвильового випромінювання — це помірно недорогий спосіб сушіння харчових матеріалів, який може стати хорошою заміною звичайним термічним режимам сушіння. Мікрохвильовий метод заснований на впливі на продукт інтенсивного електромагнітного поля надвисоких частот. Цей метод стає все більш поширеним через такі його переваги, як значне скорочення тривалості сушіння, забезпечення економії енергії, мінімізація втрати якості матеріалу та забезпечення рівномірного розподілу температури. Особливістю методу є те, що утворення тепла відбувається безпосередньо всередині харчових продуктів за рахунок руху молекул води під дією НВЧ поля. При цьому молекули води нагріваються та виводяться з продукту набагато швидше, ніж іншими методами. Максимальна температура матеріалу на стадії ПЧ-нагріву становить 40—60 °C, а мінімальна на стадії охолодження — 25—35 °C. Рівень мікрохвильової потужності є основним фактором, що впливає на зміну кольору матеріалу під час процесу сушіння. Недоліком методу є відносно низький (60%) ККД перетворення енергії електричного струму в енергію НВЧ поля в мікрохвильовому обладнанні. У зв'язку з цим цей метод доцільно застосовувати при досушуванні продукту до заданих значень вологості (Kipcak, & İsmail, 2021; Mandaji, Pena, & Chisté, 2022; Калина та ін., 2019).

Застосування ультразвуку є перспективною технологією в сушінні харчових продуктів. Вона характеризується найменшим споживанням енергії. Ультразвукові сушарки працюють за допомогою п'єзоелектричних перетворювачів і не використовують тепло для висушування вологи з матеріалу. У твердих матеріалах ультразвуковими хвилями створюють альтернативні стиснення та розширення і дають ефект, подібний до «ефекту губки». Це призводить до виділення вологи з внутрішнього об'єму матеріалу на поверхню та її подальшого випаровування. Сили, задіяні в цьому механізмі, перевищують поверхневий натяг, який утримує молекули води всередині капілярів матеріалу, створюючи мікроскопічні канали та полегшуючи взаємообмін речовиною. Крім того, частина акустичної енергії поглинається середовищем і викликає підвищення температури, що відоме як «тепловий ефект» ультразвуку. Тепловий вплив ультразвуком може збільшити дифузійну масу в середовищі та сприяти процесу масообміну. Швидкість сушіння змінюється відповідно до зміни тиску, частоти та інтенсивності звукових хвиль. Кавітація, яка виникає під час ультразвукового сушіння, є ще одним важливим механізмом, що полегшує перенесення вологи, оскільки покращує видалення міцно зв'язаних форм вологи. Ультразвукова обробка дає змогу прискорювати процес сушіння й отримувати вищі показники регідратації, порівняно з вакуумним методом, позитивно впливає на поліпшення якості висушених продуктів і зниження споживаної енергії під час сушіння. Це позитивно впливає на собівартість готової продукції, а також модифікацію складу харчових продуктів (Tao, & Sun, 2015; Yao, 2016; Huang et al., 2020). Результати дослідження (Tong, Cao, Du, Liu, & Huang, 2022) показують, що ця технологія може прискорити сушіння м'яса курячої грудки та покращити м'якість і здатність утримувати воду, і навіть може зберегти смак, який міг бути втрачений через застосування фосфатів. Це має потенціал для зменшення використання фосфатів у м'ясних продуктах.

При холодному способі сушіння різноманітних м'ясних продуктів у спеціалізованих сушарках при низькій температурі тривалість процесу можна скоротити, оскільки рушійною силою для масопереносу є різниця вмісту вологи між харчовими продуктами та повітрям у сушарці. На час висихання скибочок суттєво впливали температура та швидкість потоку повітря. Дослідження авторів показали, що спосіб дає змогу проводити мінімальну термообробку м'яса, забезпечити безпечність харчових продуктів і здійснювати сушку в холодних умовах при температурах нижчих за 20 °C і швидкості повітряного потоку 4 м/с без втрати їх якісних властивостей (Dinçer, 2021).

Одним із ідеальних методів сушіння різних видів сировини, в т. ч. речовин, чутливих до нагрівання та окислення, вважається сублімаційне сушіння. У цьому процесі вода в сировині заморожується при низькій температурі та сублімується в умовах вакууму з твердого стану в газ. Для проведення процесу сушки сублімацією необхідним є дотримання двох обов'язкових умов: наявність основної частини вологи в продукті (не менше 70%) у твердому агрегатному стані і підтримка достатньої різниці парціальних тиску парів води і в навколишньому середовищі. При застосуванні цього способу сушіння найбільш ефективним є заморожування сировини у вигляді рідких суспензій у розпиленому стані з подальшим сушінням заморожених гранул у тонкому шарі.

Процес заморожування як перший етап сублімаційного сушіння істотно впливає на якість продуктів. Швидке заморожування тваринної сировини у шматках відбувається в спеціальних камерах при атмосферному тиску і сприяє максимальному збереженню вихідних властивостей харчових продуктів. Температура продуктів тваринного походження в період сублімації вологи не повинна перевищувати мінус 15 — мінус 20 °С. Для отримання високоякісного продукту необхідно видалити 75—90% вологи при мінусовій температурі в центральній зоні продукту. Частина найбільш міцно зв'язаної вологи видаляється при позитивних температурах. Допустимий рівень температури продукту в період сублімації і видалення залишкової вологи визначається його властивостями і тривалістю процесу сушіння.

У результаті отримані сухі м'ясні продукти характеризуються високою біологічною і харчовою цінністю. При додаванні води практично повністю відновлюється первинний вигляд, оригінальний колір, смак, аромат і зовнішній вигляд сушеного м'яса, а низькі температури виключають розвиток мікроорганізмів і проходження окислювальних процесів. Процес проходить без застосування будь-яких консервантів або добавок і характеризується високою екологічною безпечністю. При використанні герметичної металізованої упаковки продукти сублімації можна зберігати до п'яти років в будь-яких умовах. Сублімовані м'ясні порошки можуть бути використані як натуральні спеції або добавки для покращення смаку і як інгредієнт для соусів. Доведено, що такі порошки підсилюють смак і аромат м'ясних і соусних продуктів, підвищують їх водоутримувальну здатність, рН і в'язкість. Сублімоване м'ясо можна подрібнити та зберігати в порошкоподібному вигляді, регідратувати та використовувати як фарш. При виготовленні в порошкоподібному вигляді він займає лише 10—15% від початкової ваги, що полегшує його зберігання і транспортування. Однак під час сублімаційної сушки відбувається денатурація білків та інші структурні модифікації через відсутність молекул води, які спочатку взаємодіють з білками через водневі зв'язки. Також суттєвим недоліком способу є невисока продуктивність, значні витрати енергії і висока собівартість продукції (Chou, & Chua, 2001; Park, & Kim, 2023; Lee, Jo, Jeong, Choi, & Jung, 2024).

Для зниження вартості продукції, підвищення продуктивності і зниження температури процесу використовують вакуумне сушіння. Основним принципом методу є видалення вологи під тиском, нижчим за атмосферний. Метод особливо підходить для сушіння термочутливих матеріалів. Процес вакуумування, руйнуючи клітинні стінки сировини, прискорює перенесення води, що збільшує швидкість сушіння. Під час такого сушіння низька температура та відсутність кисню дають змогу зберегти термочутливі речовини й уникнути зміни кольору. Перевагою методу є використання температур менше за 20 °С і тиску до 86,12 кПа, а також загальне скорочення тривалості процесу. При цих параметрах сушіння досягаються необхідні показники активності води в продукті a_w , які становлять до 0,9%, пригнічується рівень білкового і ліпідного окиснення, покращуються органолептичні характеристики. Однак вакуумна сушка не повністю запобігає втраті якості сушеного м'яса (Laopoolkit, & Suwannaporn, 2011; Dinçer, & Erbaş, 2023; Tao, & Sun, 2015).

Ще одним інноваційним методом сушіння й ефективною альтернативою традиційним тепловим способам є використання імпульсних електричних полів (PEF) для ефективного сушіння зразків м'яса. PEF — це нова технологія, заснована на застосуванні імпульсів високої напруги електричного струму на сировину, встановлену між двома електродами. Завдяки сильним імпульсам електричного поля мембрани клітин утворюють пори шляхом розширення існуючих або створення нових. Залежно від технологічних режимів і умов експлуатації пори, які можуть бути постійними або тимчасовими, спричиняють збільшення проникності мембрани. Виникає так зване явище електропорації, що забезпечує неінвазивну модифікацію структури тканин зі зміною їх властивостей. Під час застосування PEF специфічні електричні поля збільшують проникність мембрани для зазвичай непроникних молекул. Також досліджено вплив електропорації на утворення водних пор у ліпідному подвійному шарі клітин, які забезпечують молекулярний транспорт і посилюють вологоперенос при сушінні м'яса. Технологія PEF надає різноманітні можливості, включаючи безперервність процесу, високий рівень збереження поживних речовин, вітамінів і покращення органолептичних властивостей продукту. Деякі дослідження, проведені на яловичині, показали її позитивний вплив на прискорення протеолізу міофібрилярних білків із фізичною зміною структури м'язів, що призводило до підвищення ніжності зразків як одного із головних факторів сенсорної оцінки якості та прийнятності для споживача та збільшення харчової цінності продукту. Значною перевагою застосування цього методу, якщо порівняти з іншими методами нетермічної обробки, є відсутність впливу на процес окиснення ліпідів і виникнення небажаних присмаків і запахів. Відповідно до оглядів ((Bhat, Morton, Mason, & Bekhit, 2019; Gomez et al., 2019), передбачається, що PEF змушує клітинні мембрани м'яса вивільняти такі мінерали, як кальцій і ферменти, які можуть мати як бажаний, так і небажаний вплив на матрицю, залежно від застосування. Автори (Tomasevic, Heinz, Djekic, & Terjung, 2023) досліджували вплив PEF на якість м'яса (втрати під час приготування та колір). Отже, технологія PEF має високий потенціал для значного покращення умов вологопереносу при сушінні м'яса, швидкого зниження вмісту мікроорганізмів й отримання високої якості харчового продукту при збільшенні ефективності процесу, економічному споживанні енергії та загальному позитивному екологічному впливу. Незважаючи на наявність позитивних результатів використання технології PEF для переробки м'яса та риби, вона відносно нова, її застосовують переважно в лабораторних масштабах. Застосування в промисловості вимагає високих капіталовкладень і необхідності оптимізації умов PEF для виробництва конкретного продукту, що потребує проведення подальших досліджень.

Для прискорення процесу сушіння м'яса і збільшення енергоефективності процесу також широко використовуються комбіновані методи. Доведено, що поєднання процесу конвективного сушіння й ультразвуку позитивно впливає на загальну кінетику сушіння. Результати дослідників показують, що застосування ультразвуку в комбінованому процесі прискорює кінетику сушіння за рахунок збільшення ефективної дифузії вологи та коефіцієнта масопередачі. Оцінка впливу ультразвуку на фізико-хімічні показники і якість готової продукції показала краще збереження мікроструктури дослідних зразків, зменшення загальної зміни кольору,

зниження показника активності води та зменшення втрати термолабільних речовин (Fan, Zhang, & Mujumdar, 2017; Sánchez-Torres et al., 2022).

Комбінована мікрохвильова конвективна сушка (MCD) набуває все більшого інтересу завдяки своїй унікальній об'ємній здатності до нагрівання, здатності значно скорочувати час сушіння та покращувати якість готової продукції (Kumar, & Karim, 2019).

Криві сушіння в комбінованій мікрохвильово-конвективній системі показали період постійної швидкості сушіння, а потім два періоди зниження швидкості. Підвищення температури повітря збільшило швидкість сушіння протягом усього процесу і скорочення часу сушіння до 78%. Було виявлено, що середня та максимальна температури зразка знижуються при додаванні швидкості потоку теплоносія, ступінь впливу якого залежить від матеріалу та умов експлуатації (McMinn, McLoughlin, & Magee, 2005).

Метод поєднання впливу ультразвуку і вакууму при сушінні м'ясної сировини забезпечив найкоротший час висихання, порівняно до інших окремих методів. Цей комбінований метод забезпечує послідовне сушіння шарів сировини та дає змогу завершити процес за більш короткий час при збереженні значної кількості термолабільних речовин, одержання необхідної структури і смакових властивостей. Щоб забезпечити безпечне сушіння м'яса, тиск повітря підтримується дуже низьким, а температура кипіння води становить менше 40 °C для запобігання руйнуванню клітин (Başlar, Kılıçlı, Toker, Sağdıç, & Arıcı, 2014; Chou, & Chua, 2001).

Технологія PEF також може бути більш ефективною при застосуванні з іншими методами, такими як ультразвук та іншими. Однак поєднання цієї технології з іншими методами й оптимізація відповідних параметрів роботи залежить від властивостей і характеристик сировини та вимагає проведення подальших досліджень.

Висновки

Сушіння є одним із ключових процесів у виробництві в'ялених м'ясних продуктів. Вибір методу і раціональних теплотехнологічних режимів сушіння дає змогу зберегти харчову і біологічну цінність сировини, позитивно вплинути на смакові профілі та текстуру сушеного м'яса, а також підвищити енергоефективність процесу. В сучасних умовах важливим є організація процесу теплового переносу для забезпечення ефективного проведення процесу сушіння з урахуванням таких параметрів, як температура, відносна вологість і швидкість теплоносія, період сушіння, вологість і показник активності води в готовому виробі. Поєднання відповідних методів і режимів сушіння дає змогу інтенсифікувати технологію, підвищити ефективність сушіння, отримати необхідні показники за якістю і безпечністю в'яленого м'яса. Для виробництва сушеного м'яса застосовуються різні методи сушіння: конвективне, кондуктивне, холодне, ультразвукове, сублімаційне сушіння, а також комбіновані методи. Доведено ефективність використання комбінованих методів обробки для покращення теплового обміну, зменшення тривалості, збереження біологічно активних речовин і зменшення енерговитрат процесу при отриманні високої якості та безпечності сушеного і в'яленого м'яса. До останніх технологій сушіння четвертого покоління відносяться методи, що використовують високий вакуум, псевдозрідження, використання мікрохвиль і радіочастот, імпульсних електричних полів тощо.

Література

- Авдєєва, Л. Ю., Декуша, Г. В., Турчина, Т. Я., & Макаренко, А. А. (2023). Використання різних способів сушіння в технологіях сухих грибних концентратів. *Теплофізика і теплоенергетика*, 45(3), 37—45.
- Калина, В. С., Куянов, Ю. Ю., Корсун, О. Ю., & Грабовська, Є. С. (2019). Огляд методів сушіння плодовоовочевої сировини. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету/ТДАТУ*, 19(1), 32—39. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-19-1-32-40>.
- Снежкін, Ю. Ф. (2017). Енергоефективні теплонасосні технології: стан та перспективи їх впровадження в Україні. *Промислова теплотехніка*, 39(2), 18—24.
- Ahmad, R. S., Imran, A., & Hussain, M. B. (2018). Nutritional composition of meat. In M. S. Arshad (Ed.), *Meat science and nutrition (Chap. 4)*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.77045>.
- Ahmat, T., Barka, M., Aregba, A. W., & Bruneau, D. (2015). Convective drying kinetics of fresh beef: An experimental and modeling approach. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(6), 2581—2595. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12508>.
- Aksoy, A., Karasu, S., Akcicek, A., & Kayacan, S. (2019). Effects of different drying methods on drying kinetics, microstructure, color, and the rehydration ratio of minced meat. *Foods*, 8(6), 216. <https://doi.org/10.3390/foods8060216>.
- Aliño, M., Grau, R., Baigts, D., & Barat, J. M. (2009). Influence of sodium replacement on the salting kinetics of pork loin. *Journal of Food Engineering*, 95(4), 551—557. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.06.016>.
- Alahakoon, A. U., Jayasena, D. D., Ramachandra, S., & Jo, C. (2015). Alternatives to nitrite in processed meat: Up to date. *Trends in Food Science & Technology*, 45, 37—49.
- Arnau, J., Serra, X., Comaposada, J., Gou, P., & Garriga, M. (2007). Technologies to shorten the drying period of dry-cured meat products. *Meat Science*, 77(1), 81—89. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.03.015>.
- Bampi, M., Schmidt, F. C., & Laurindo, J. B. (2019). A fast drying method for the production of salted-and-dried meat. *Food Science and Technology*, 39, 526—534. <https://doi.org/10.1590/fst.24418>.
- Barat, J. M., Baigts, D., Aliño, M., Fernández, F. J., & Pérez-García, V. M. (2011). Kinetics studies during NaCl and KCl pork meat brining. *Journal of Food Engineering*, 106(1), 102—110. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.04.022>.
- Başlar, M., Kılıçlı, V., Toker, O. S., Sağdıç, O., & Arici, M. (2014). Ultrasonic vacuum drying technique as a novel process for shortening the drying period for beef and chicken meats. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 26, 182—190. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2014.06.008>.
- Berardo, A., De Maere, H., Stavropoulou, D. A., Rysman, T., Leroy, F., & De Smet, S. (2016). Effect of sodium ascorbate and sodium nitrite on protein and lipid oxidation in dry fermented sausages. *Meat Science*, 121, 359—364.
- Bhat, Z. F., Morton, J. D., Mason, S. L., & Bekhit, A. E. A. (2019). Current and future prospects for the use of pulsed electric field in the meat industry. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59, 1660—1674.
- Bohuon, P., Collignan, A., Rios, G. M., & Raoult-Wack, A. L. (1998). Soaking process in ternary liquids: Experimental study of mass transport under natural and forced convection. *Journal of Food Engineering*, 37(4), 451—469. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(98\)00073-9](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(98)00073-9).
- Cath, T. Y., Childress, A. E., & Elimelech, M. (2006). Forward osmosis: Principles, applications, and recent developments. *Journal of Membrane Science*, 281(1—2), 70—87. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.05.048>.
- Cava, R., Higuero, N., & Ladero, L. (2021). High-pressure processing and storage temperature on *Listeria monocytogenes*, microbial counts and oxidative changes of two traditional dry-cured meat products. *Meat Science*, 171, 108273.
- Cheung, P. C. K., & Mehta, B. M. (Eds.). (2015). *Handbook of food chemistry*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1175.
- Chou, S. K., & Chua, K. J. (2001). New hybrid drying technologies for heat sensitive foodstuffs. *Trends in Food Science & Technology*, 12(10), 359—369.

- Chua, K. J., Chou, S. K., & Yang, W. M. (2010). Advances in heat pump systems: A review. *Applied Energy*, 87, 3611—3624.
- Collignan, A., Bohuon, P., Deumier, F., & Poligné, I. (2001). Osmotic treatment of fish and meat products. *Journal of Food Engineering*, 49(2–3), 153—162. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00215-6](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00215-6).
- Delgado-Pando, G., Fischer, E., Allen, P., Kerry, J. P., O’Sullivan, M. G., & Hamill, R. M. (2018). Salt content and minimum acceptable levels in whole-muscle cured meat products. *Meat Science*, 139, 179—186.
- Dimakopoulou-Papazoglou, D., & Katsanidis, E. (2016). Mass transfer kinetics during osmotic processing of beef meat using ternary solutions. *Food and Bioprocess Processing*, 100(Part B), 560—569. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.09.001>.
- Dinçer, A., & Erbaş, M. (2023). A comparative study of cold drying conditions on the physicochemical, microbial and sensory properties of dried chicken slices. *International Journal of Food Science & Technology*, 59. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16366>.
- Dinçer, E. A. (2021). Dried meat products obtained by different methods from past to present. *Food Reviews International*, 39(5), 2457—2476. <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1956944>.
- Gaur, A. S., Fitiwi, D. Z., & Curtis, J. (2020). Heat pumps and our low-carbon future: A comprehensive review. *Energy Research & Social Science*, 71, 101764.
- Gomez, B., Munekata, P. E. S., Gavahian, M., Barba, F. J., Marti-Quijal, F. J., Bolumar, T., Campagnol, P. C. B., Tomasevic, I., & Lorenzo, J. M. (2019). Application of pulsed electric fields in meat and fish processing industries: An overview. *Food Research International*, 123, 95—105.
- Fan, K., Zhang, M., & Mujumdar, A. S. (2017). Application of airborne ultrasound in the convective drying of fruits and vegetables: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 39, 47—57. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.04.001>.
- Gutiérrez, N. O., Caro, I., & Mateo, J. (2022). Dry-cured cecina. In *Production of traditional Mediterranean meat products* (pp. 87—94). Berlin: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-2103-5_10.
- Hou, C., Kang, N., Schlosser, C., Zhao, M., Wang, Z., & Zhang, D. (2018). Heterocyclic aromatic amines in commercial Chinese dried meat products. *Journal of Food and Nutrition Research*, 57, 151—160. <https://doi.org/10.1007/s10068-014-0284-0>.
- Huang, D., Men, K., Li, D., Wen, T., Gong, Z., Sunden, B., & Wu, Z. (2020). Application of ultrasound technology in the drying of food products. *Ultrasonics Sonochemistry*, 63, 104950. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104950>.
- International Agency for Research on Cancer (IARC). (2018). Red Meat and Processed Meat. *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Volume 114*. International Agency for Research on Cancer. <https://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Iarc-Monographs-On-The-Identification-Of-Carcinogenic-Hazards-To-Humans/Red-Meat-And-Processed-Meat-2018> (accessed on 14 December 2024).
- Inguglia, E. S., Zhang, Z., Tiwari, B. K., Kerry, J. P., & Burgess, C. M. (2017). Salt reduction strategies in processed meat products—A review. *Trends in Food Science & Technology*, 59, 70—78. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.10.016>.
- Inguglia, E. S., Oliveira, M., Burgess, C. M., Kerry, J. P., & Tiwari, B. K. (2020). Plasma-activated water as an alternative nitrite source for the curing of beef jerky: Influence on quality and inactivation of *Listeria innocua*. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 59, 102276.
- Islam, M. R., Thaker, K. S., & Mujumdar, A. (2007). A diffusion model for a drum dryer subjected to conduction, convection, and radiant heat input. *Drying Technology*, 25(6), 1033—1043. <https://doi.org/10.1080/07373930701312761>.
- Jiang, N., Xu, B., Zhao, L., Huang, M., & Zhou, G. (2016). Effects of high-temperature-short time (HTST) drying process on proteolysis, lipid oxidation and sensory attributes of Chinese dry-cured chicken. *CyTA — Journal of Food*, 14(3), 440—448.
- Jones, M., Arnaud, E., Gouws, P., & Hoffman, L. C. (2017). Processing of South African biltong: A review. *South African Journal of Animal Science*, 47(6), 743—757. <https://doi.org/10.4314/sajas.v47i6.2>.

- Jung, S., Kim, H. J., Park, S., In Yong, H., Choe, J. H., Jeon, H. J., Choe, W., & Jo, C. (2015). The use of atmospheric pressure plasma-treated water as a source of nitrite for emulsion-type sausage. *Meat Science*, 108, 132—137.
- Hii, C., Itam, C., & Ong, S. P. (2014). Convective air drying of raw and cooked chicken meats. *Drying Technology*, 32, 1246—1254. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.924133>.
- Hospital, X. F., Hierro, E., Stringer, S., & Fernandez, M. (2016). A study on the toxigenesis by *Clostridium botulinum* in nitrate and nitrite-reduced dry fermented sausages. *International Journal of Food Microbiology*, 218, 66—70. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2015.11.009>.
- Hui, T., Fang, Z., Ma, Q., Hamid, N., & Li, Y. (2023). Effect of cold atmospheric plasma-assisted curing process on the color, odor, volatile composition, and heterocyclic amines in beef meat roasted by charcoal and superheated steam. *Meat Science*, 196, 109046.
- Kipcak, A. S., & İsmail, O. (2021). Microwave drying of fish, chicken, and beef samples. *Journal of Food Science and Technology*, 58(1), 281—291. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04540-0>.
- Kruk, O., & Uhnivenko, A. (2024). Conformation of crossbred bull carcasses and its relationship with beef quality traits. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Livestock*, 76—82. <https://doi.org/10.32782/bsnau.lvst.2024.2.11>.
- Kumar, C., & Karim, M. A. (2019). Microwave-convective drying of food materials: A critical review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 59(3), 379—394. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1373269>.
- Laopoolkit, P., & Suwannaporn, P. (2011). Effect of pretreatments and vacuum drying on instant dried pork process optimization. *Meat Science*, 88, 553—558. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2011.02.011>.
- Lee, S., Jo, K., Jeong, S.-K.-C., Choi, Y.-S., & Jung, S. (2024). Production of freeze-dried beef powder for complementary food: Effect of temperature control in retaining protein digestibility. *Food Chemistry*, 433, 137419. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137419>.
- Leistner, L. (1987). Shelf-stable products and intermediate moisture foods based on meat. In L. Rockland, & L. Beauchat (Eds.), *Water activity: Theory and applications to food* (pp. 295—327). Marcel Dekker, Inc.
- Lopez, C. M., Dallolio, G., Bonilauri, P., & Rebecchi, A. (2021). Strategies for nitrite replacement in fermented sausages and effect of high pressure processing against *Salmonella* spp. and *Listeria innocua*. *Foods*, 10(12), 2617. <https://doi.org/10.3390/foods10112617>.
- Majou, D., & Christeans, S. (2018). Mechanisms of the bactericidal effects of nitrate and nitrite in cured meats. *Meat Science*, 145, 273—284.
- Mandaji, C. M., Pena, R. D. S., & Chisté, R. C. (2022). Encapsulation of bioactive compounds extracted from plants of genus *Hibiscus*: A review of selected techniques and applications. *Food Research International*, 151, 110820. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110820>.
- Marcinkowska-Lesiak, M., Wojtasik-Kalinowska, I., Onopiuk, A., Stelmasiak, A., Wierzbicka, A., & Poltorak, A. (2022). Application of atmospheric pressure cold plasma activated plant protein preparations solutions as an alternative curing method for pork sausages. *Meat Science*, 187, 108751.
- McMinn, W. A. M., McLoughlin, C. M., & Magee, T. R. A. (2005). Microwave-convective drying characteristics of pharmaceutical powders. *Powder Technology*, 153(1), 23—33. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2005.01.018>.
- Minea, V. (2013). Heat-pump-assisted drying: Recent technological advances and R&D needs. *Drying Technology*, 31, 1177—1189.
- Mishra, B., Mishra, J., Pati, P., & Rath, P. (2017). Dehydrated meat products: A review. *International Journal of Livestock Research*, 1. <https://doi.org/10.5455/ijlr.20170812035616>.
- Molina, J. R. G., Frías-Celayeta, J. M., Bolton, D. J., & Botinestean, C. (2024). A comprehensive review of cured meat products in the Irish market: *Opportunities for reformulation and processing*. *Foods*, 13(5), 746. <https://doi.org/10.3390/foods13050746>.
- O'Flynn, C. C., Cruz-Romero, M. C., Troy, D. J., Mullen, A. M., & Kerry, J. P. (2014). The application of high-pressure treatment in the reduction of phosphate levels in breakfast sausages. *Meat Science*, 96, 633—639.

- Olejnik, T. P., Mysakowski, T., Tomtas, P., & Mostowski, R. (2021). Optimization of the beef drying process in a heat pump chamber dryer. *Energies*, 14(16), 4927. <https://doi.org/10.3390/en14164927>.
- Ozuna, C., Puig, A., García-Pérez, J. V., Mulet, A., & Cárcel, J. A. (2013). Influence of high intensity ultrasound application on mass transport, microstructure and textural properties of pork meat (Longissimus dorsi) brined at different NaCl concentrations. *Journal of Food Engineering*, 119(1), 84—93. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.05.016>.
- Poławska, E., Marchewka, J., Cooper, R. G., Sartowska, K., Pomianowski, J., Józwick, A., Strzałkowska, N., & Horbańczuk, J. O. (2011). The ostrich meat — An updated review. II. Nutritive value. *Animal Science Papers and Reports*, 29, 89—97.
- Park, S.-Y., & Kim, H.-Y. (2023). Physicochemical property analysis of lyophilized fresh, wet-, and dry-aged beef powders: Application of dry-aged beef crust as a food additive. *Meat Science*, 195, 109014. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2022.109014>.
- Qu, C., He, Z., Wang, Z., Li, S., Wang, Z., & Li, H. (2020). Effects of NaCl content and drying temperature on lipid oxidation, protein oxidation, and physical properties of dry-cured chicken. *Journal of Food Science*, 85(6), 1651—1660. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15129>.
- Rao, N. (1997). Intermediate moisture foods based on meats—A review. *Food Reviews International*, 13, 519—551. <https://doi.org/10.1080/87559129709541139>.
- Rastogi, N. K., Raghavarao, K. S. M. S., & Niranjana, K. (2005). 9 — Developments in Osmotic Dehydration. In *Emerging Technologies for Food Processing* (pp. 221—249). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012676757-5/50011-6>.
- Rodrigues, F. M., Rosenthal, A., Tiburski, J. H., & Cruz, A. G. D. (2015). Alternatives to reduce sodium in processed foods and the potential of high pressure technology. *Food Science and Technology*, 36, 1—8.
- Sánchez-Torres, E. A., Abril, B., Benedito, J., Bon, J., Toldrà, M., Parés, D., & García-Pérez, J. V. (2022). Airborne ultrasonic application on hot air-drying of pork liver. Intensification of moisture transport and impact on protein solubility. *Ultrasonics sonochemistry*, 86, 106011. <https://doi.org/10.1016/j.jultsonch.2022.106011>.
- Santchurn, S. J., Collignan, A., & Trystram, G. (2007). Impact of solute molecular mass and molarity, and solution viscosity on mass transfer during immersion of meat in a complex solution. *Journal of Food Engineering*, 78(4), 1188—1201. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.12.031>.
- Shahidi, F., & Pegg, R. (2006). Processing of nitrite-free cured meats. In *Handbook of food science, technology, and engineering* (Chapter 12). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420017311.ch12>.
- Simão, R. da S., de Moraes, J. O., Monteiro, R. L., Schaidt, A. L., Carciofi, B. A. M., & Laurindo, J. B. (2021). Conductive drying methods for producing high-quality restructured pineapple-starch snacks. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 70, 102701. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102701>.
- Skrypnik, V. O., & Ponomarenko, B. G. (2024). Analytical ustification of the conductive drying process of meat. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Mechanization and Automation of Production Processes*, 2 (56), 79—85. <https://doi.org/10.32782/msnau.2024.2.11>.
- Tao, Y., & Sun, D.-W. (2015). Enhancement of food processes by ultrasound: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(4), 570—594. <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.667849>.
- Toldrá, F. (2006). The role of muscle enzymes in dry-cured meat products with different drying conditions. *Trends in Food Science & Technology*, 17(4), 164—168. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2005.08.007>.
- Tomasevic, I., Heinz, V., Djekic, I., & Terjung, N. (2023). Pulsed electric fields and meat processing: Latest updates. *Italian Journal of Animal Science*, 22, 857—866.
- Tong, H., Cao, C., Du, Y., Liu, Y., & Huang, W. (2022). Ultrasonic-assisted phosphate curing: A novel approach to improve curing rate and chicken meat quality. *International Journal of Food Science & Technology*, 57(6), 2906—2917. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15644>.

Yang, H., Han, M., Bai, Y., Han, Y., Xu, X., & Zhou, G. (2015). High pressure processing alters water distribution enabling the production of reduced-fat and reduced-salt pork sausages. *Meat Science*, 102, 69—78.

Yao, Y. (2016). Research and applications of ultrasound in HVAC field: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 52—68. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.222>.

Woods, D. F., Kozak, I. M., Flynn, S., & O’Gara, F. (2018). The microbiome of an active meat curing brine. *Frontiers in Microbiology*, 9, 3346. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.03346>.

Zdanowska-Sąsiadek, Ż., Marchewka, J., Horbańczuk, J. O., Wierzbicka, A., Lipińska, P., Jóźwik, A., Atanasov, A. G., Huminiecki, Ł., Sieroń, A., Sieroń, K. et al. (2018). Nutrients composition in fit snacks made from ostrich, beef, and chicken dried meat. *Molecules*, 23(6), 1267. <https://doi.org/10.3390/molecules23061267>.

Zhang, Y., Zhang, Y., Jia, J., Peng, H., Qian, Q., Pan, Z., & Liu, D. (2023). Nitrite and nitrate in meat processing: Functions and alternatives. *Current Research in Food Science*, 6, 100470. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100470>.

ADAPTIVE VOLTAGE REGULATION IN POWER SUPPLY SYSTEMS WITH DISTRIBUTED GENERATION

S. Baliuta, L. Kopylova, D. Sinyukov, M. Zhukov, M. Kondrashevsky

National University of Food Technologies

Key words:

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

Article history:

Received 07.01.2025
Received in revised form
23.01.2025
Accepted 02.02.2025

Corresponding author:

S. Baliuta

E-mail:

epp11@ukr.net

Citation: Балюта С. М.,
Копилова Л. О., Сіню-
ков Д. В., Жуков М. Ю.,
Кондрашевський М. С.
(2025). Адаптивне регулю-
вання напруги в системах
електрозабезпечення із ро-
зосередженою генерацією.
Наукові праці НУХТ,
31(1), 107—119.
DOI: 10.24263/2225-2924-
2025-31-1-9

ABSTRACT

In recent years, due to the use of fixed tariffs for electricity generated by renewable energy installations, there has been a significant increase in the number of photovoltaic plants in low-voltage distribution networks. In addition, new low-voltage loads have now appeared, such as charging stations for electric vehicles or electric heat pumps. The presence of distributed generation sources in the electrical network causes the appearance of bidirectional power in the network, which has a stochastic nature, and a change in the distribution of voltage levels. In order to ensure compliance with the voltage tolerances permitted by the DSTU EN 50160:2014 standard "Characteristics of electricity supply voltage in general purpose electrical networks", distribution system operators must develop appropriate measures. One of the effective and economic measures is the use of regulated transformers (RT) with voltage regulation using an electronic switch in the distribution network, which can regulate low voltage to low without interruption, changing the transformation ratio.

Methods for expanding the transmission capacity of the electrical network using RT control were analyzed in this article. In particular, a method for improving voltage regulation in mono-sensor mode when using variable voltage regulator setpoint adjustment by changing the transformation ratio of the regulated transformer using statistical voltage change data was considered. The use of two possible options for data filters was also considered, with the help of which the resulting actual voltage value was calculated based on voltage measurement values at remote points in the network. Thus, work with multiple voltage sensors was implemented when using a proven voltage control method with one sensor.

АДАПТИВНЕ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІЗ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ

С. М. Балюта, Л. О. Копилова, Д. В. Сінюков, М. Ю. Жуков,
М. С. Кондрашевський

Національний університет харчових технологій

В останні роки внаслідок використання фіксованих тарифів на електричну енергію, вироблену установками з відновлюваними джерелами енергії, спостерігається значне зростання кількості фотоелектричних станцій у низьковольтних розподільчих мережах. Крім того, зараз з'явилися нові низьковольтні навантаження, такі як зарядні станції для електромобілів або електричні теплові насоси. Наявність в електричній мережі джерел розподіленої генерації обумовлює появу двонаправленої потужності, що має стохастичний характер, і зміну розподілу рівнів напруги. Для забезпечення дотримання допусків на напругу, дозволених стандартом ДСТУ EN 50160:2014 «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності», оператори системи розподілу (ОСР) повинні розробляти відповідні заходи. Одним із ефективних та економічних заходів є використання в розподільній мережі регульованих трансформаторів (РТ) з регулюванням напруги за допомогою електронного комутатора, які можуть регулювати низьку напругу без перерви, змінюючи коефіцієнт трансформації.

У статті проаналізовано методи розширення передавальної спроможності електричної мережі за допомогою керування РТ. Зокрема розглядається метод покращення регулювання напруги в режимі моносенсора при використанні змінного налаштування уставки регулятора напруги шляхом зміни коефіцієнта трансформації регульованого трансформатора з використанням статистичних даних зміни напруги. Також розглядається використання двох можливих варіантів фільтрів даних, з допомогою яких на основі значень вимірювання напруги у віддалених точках мережі обчислюють результуюче фактичне значення напруги. Таким чином реалізується робота з декількома сенсорами напруги при використанні перевіреного методу керування напругою з одним сенсором.

Ключові слова: система електрозабезпечення, регулятор напруги, регульований трансформатор, розподілена генерація, розподільні електричні мережі.

Постановка проблеми. При електрозабезпеченні споживачів від електричних мереж з розподіленою генерацією (фотоелектростанції, вітроелектростанції, когенераційні установки) внаслідок стохастичного характеру генерації електричної енергії суттєво погіршуються показники якості електричної енергії (змінюються рівні напруги, виникають коливання напруги). Погіршення показників якості електричної енергії (ПЯЕЕ) призводять до суттєвих збитків у споживачів. Відповідно до чинного стандарту енергопостачальна компанія повинна розробити заходи щодо нормалізації ПЯЕЕ. Оскільки найбільш ефективним і економічним методом за-

безпечення нормативних ПЯЕЕ є використання систем керування, необхідно розробити методи адаптивного автоматичного регулювання напруги в розподільних електричних мережах 0,4 кВ з використанням значень фактичної напруги у вузлових точках електричної мережі.

Огляд останніх досліджень і публікацій. В електричних мережах з розподіленою генерацією (фотоелектричні станції, вітроелектростанції, когенераційні установки) погіршуються показники якості електричної енергії, що обумовлює використання заходів для підтримання напруги в допустимих межах згідно з ДСТУ EN 50160:2014. Найбільш відомим заходом є «звичайне розширення мережі». Під цим терміном розуміється прокладка провідників більшого перерізу або паралельних кабелів, а також заміна трансформаторів локальної мережі на більш потужні трансформатори. Ці заходи спрямовані на зменшення опору мережі і обумовлюють збільшення потужності короткого замикання в стаціонарній мережі, в результаті мережа стає більш стійкою до зміни напруги. Розглядаються також варіанти для зміни коефіцієнта зсуву фаз ($\cos\varphi$) децентралізованих систем генерації в розподільчій мережі низької напруги, щоб реактивну потужність (Q) використовувати для зміни напруги, обумовленої реактивним опором трансформатора (Geibel та ін., 2012). Недоліком цього методу є збільшення втрат активної потужності в мережі за рахунок додаткових реактивних струмів.

Альтернативним методом є використання послідовних регуляторів (Яндульський, Труніна, & Нестерко, 2021), які подають напругу в мережу низької напруги через додаткові трансформатори (так звані підвищувальні трансформатори), щоб протидіяти зміні напруги. Вони використовуються в критичних вузлах мережі для регулювання вихідної напруги (користувач мережі) або в кабельних розподільчих шафах. Існують також серійні стабілізатори напруги відповідного класу потужності, які підключаються безпосередньо за станціями локальної мережі. Вони централізовано регулюють напругу в низьковольтній мережі (Голота, 2016) і, з точки зору мережі, діють як регульований трансформатор локальної мережі.

Іншим підходом є поєднання регулятора напруги зі звичайним трансформатором розподільчої мережі. Використовуваний тут регулятор напруги працює шляхом збудження котушки на залізнму сердечнику постійним струмом для регулювання реактивного опору (Кононов, Кононова, & Куравська, 2018), який підключається після звичайного трансформатора розподільної мережі. На трансформаторі реалізовані як регульовані, так і нерегульовані відводи напруги.

Інший варіант регулювання напруги в низьковольтній розподільчій мережі за допомогою регульованих трансформаторів локальної мережі (РТ), що встановлені на підстанції локальної мережі.

У праці (Li, & Crossley, 2012) досліджені питання використання перемикача РПН трансформатора для регулювання несиметричних трифазних напруг для випадку приєднання однофазних несиметричних навантажень до радіального розподільчого фідера низької напруги. Представлений аналіз сучасних технологій регулювання напруги в розподільчих мережах. Запропоновані дві стратегії регулювання напруги, що забезпечують усунення впливу несиметрії однофазних навантажень і балансування трифазного живлення для інших навантажень.

Через розподілену генерацію розподільчі мережі повинні забезпечувати двонаправлені потоки електроенергії в межах допустимих рівнів напруги та рівнів

трансформації. Для покращення показників якості електроенергії в таких випадках доцільним є використання розподільчих трансформаторів з регулюванням напруги (ВРПН). У статті (Frohen, Schulz, Claus, & Lemkes, 2015) узагальнено технічні вимоги, які були використані при розробці ВРПН 10 кВ. Для зміни напруги на стороні низької напруги використовуються напівпровідникові перемикачі відводів на стороні високої напруги трансформатора. Досвід роботи з ВРПН 10 кВ з електронним комутатором показав, що ВРПН відповідає вказаним вимогам і забезпечує запобігання порушення діапазону зміни напруги. Також представлено оптимізований ВРПН, розроблений на основі цього досвіду, який може працювати з напругами 10 кВ та 20 кВ на стороні ВН трансформатора.

Підключення розосередженої генерації (РГ) до мережі неминуче впливає на профілі напруги фідерів і на регулювання напруги в розподільчих системах. Потенціал використання «розумних мереж» також обіцяє мати значний вплив на схеми регулювання напруги в енергосистемах. У праці (Gao, & Redfern, 2010) представлено огляд існуючих схем регулювання напруги в розподільчих мережах, які використовуються для керування напругою. Зокрема, обговорюються нові методи, які були впроваджені, і ті, що пропонуються для покращення регулювання напруги в мережах з різними рівнями РПН. Також розглядаються потенційні можливості для схем регулювання напруги (РПН), що відкриваються завдяки використанню «розумних мереж» (Smart Grids).

У статті (Reese, Buchhagen, & Hofmann, 2012) представлені переваги та запропоновано метод керування РПН шляхом використання діапазону напруги як вхідного параметра. Представлена розрахункова модель для розрахунку потоку навантаження з РПН, середовище моделювання та застосовані стохастичні синтетичні профілі. Результати моделювання показали, що запропонований метод дає змогу підтримувати напруги в заданих межах. При цьому також є перевага в меншій кількості перемикачів порівняно з методом керування з фіксованою напругою. Таким чином відбувається менший знос контактів і, як наслідок, зменшуються витрати на технічне обслуговування.

У праці (Werther, Becker, Schmiesing, & Wehrmann, 2012) досліджується потенціал регулювання напруги за допомогою трансформатора з РПН, а також можливість збільшення пропускної здатності РПН низьковольтних мереж з урахуванням ступінчастого характеру зміни напруги на стороні НН, кількості робочих положень і того, які вимірювання напруги використовуються як опорне значення для регулятора напруги. Представлені переваги та недоліки моно- та мультисенсорного режиму роботи трансформатора з регулюванням напруги. Крім того, проаналізовано можливу взаємодію між декількома трансформаторами з РПН, підключеними до однієї мережі.

Мета дослідження: розробити метод регулювання напруги, що забезпечить підтримання відхилень напруги у допустимих межах в електричній мережі з розподіленою генерацією.

Матеріали і методи. Методи теорії автоматичного керування, математичної статистики та моделювання, прогнозування, які використовується для розробки методу керування та моделювання процесів в електричних мережах з розподіленою генерацією.

Викладення основних результатів дослідження. Алгоритм керування напругою трансформатора у моносенсорному режимі. Зміна напруги, обумовлена РПН, призводить до зміни коефіцієнта трансформації трансформатора (коефіцієнт передачі k_T). Блок-схема регулятора наведена на рис. 1.

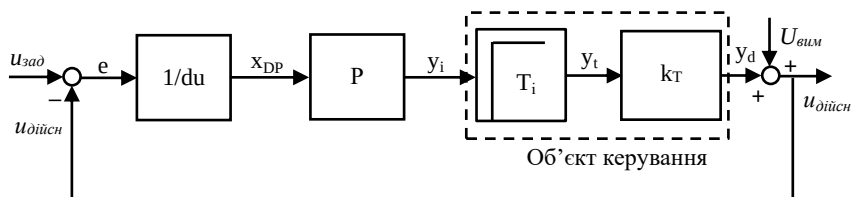


Рис. 1. Схема регулятора для роботи в режимі моносенсора на основі принципу прямого перемикування виводів трансформатора із затримкою часу

Математичний опис для порівняння відхилення керування e із зоною нечутливості регулятора du визначається таким чином:

$$x_{DP} = \frac{e}{du} = \frac{u_{зад} - u_{дійсн}}{du}. \quad (1)$$

При зменшенні коефіцієнта трансформації збільшується мінімальна напруга, а при збільшенні коефіцієнта трансформації мінімальна напруга зменшується (2):

$$u_{NS} = \frac{u_{MS}}{k_T}. \quad (2)$$

Необхідна зміна напруги проводиться за допомогою триточкового регулятора, що описується рівнянням (3):

$$y_{DP}(t) = \begin{cases} 1 & \text{для } x_{DP} > 1 \\ 0 & \text{для } -1 \leq x_{DP} \leq 1 \\ -1 & \text{для } x_{DP} < -1 \end{cases} \quad (3)$$

Регулювання в часі (затримка спрацювання) реалізується через інтегратор (І елемент) з вихідною змінною y_i , вхідною змінною x_i та постійною часу T_i .

Опис інтегратора у часовій області наведено в рівнянні (4):

$$y_i(t) = \frac{1}{T_i} \int x_i(t) dt. \quad (4)$$

Інтегрування починається за умови, що $x_{DP} > 1$ або $x_{DP} < -1$, тобто коли фактичне значення напруги залишає зону нечутливості контролера. Інтегратор скидається, коли відбулося переключення ступеня РПН або фактичне значення напруги повертається до зони нечутливості регулятора.

Для представлення поведінки РПН трансформатора в реальному часі в моделі враховується елемент мертвого часу, опис якого надається в часовій області відповідно до (Ладанюк, Луцька, Кишенько, Власенко, & Івашук, 2019) у рівнянні (5):

$$y_t = y_i(t - T_t). \quad (5)$$

Об'єкт керування (трансформатор) описується як пропорційний елемент. Фактичне значення напруги в колі зворотного визначається за рівнянням (6).

$$u_{\text{дійсн}} = u_{\text{вим}} + k_T \cdot y_t. \quad (6)$$

Визначений коефіцієнт трансформації k_T використовується для розрахунку напруги на стороні низької напруги трансформатора (рис. 1).

У режимі навантаження ($I'_{MS} = I_{NS} \gg I_0$), нехтуючи реактивним опором контуру намагнічування (X_h) і опором втрат у залізі (R_{fe}), розраховується значення напруги в контрольній точці електричної мережі для заданого моменту часу t : $\underline{U}_{NS}(t)$:

$$\underline{U}_{NS} = \frac{\underline{U}_{MS}}{k_T} - \underline{I}_{NS} \cdot ((R'_1 + R_2) + j(X'_{1\sigma} + X_{2\sigma})). \quad (7)$$

Розраховане значення для $\underline{U}_{NS}$ передається в контур регулювання напруги.

Використані параметри контролера, які стосуються регульованого трансформатора локальної мережі, що використовується для дослідження наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Параметри регулятора для роботи в моносенсорному режимі

Ступені	9	$\pm 4 \times 2,5\% U_{\text{ном}}$
Мертва зона регулятора du	0,015 в. о. 0,020 в. о.	(-60%, ширина кроку: 1,5% $U_{\text{ном}}$) (-80%, ширина кроку: 2,0% $U_{\text{ном}}$)
Час регулювання T_i	5 с	Час затримки в разі порушення зони нечутливості до зміни ступеня

Розрахункові дослідження показали, що у випадку з трансформатором локальної мережі, тобто з фіксованим коефіцієнтом передачі ($k_T(t) = \text{const}$), екстремальні значення середньої та низької напруги приблизно однакові (відхилення через зміну напруги через реактивний опір трансформатора).

У випадку регульованого трансформатора локальної мережі в режимі моносенсора із зоною нечутливості контролера $\pm 2\%$ від номінальної напруги регульована низька напруга знаходиться в діапазоні від 0,98 в. о. до 1,02 в. о.

У моносенсорному режимі в роботі з фактичним виявленням напруги на стороні низької напруги трансформатора коригується флуктуація напруги на стороні середньої напруги. Для оцінювання і порівняння якості керування напругою використовуються інтерквартильний діапазон, усереднений для всіх вузлів мережі низької напруги ($i_{qrmitte}$), екстремуми напруги ($u_{\text{max,global}}$ або $u_{\text{min,global}}$) і кількість кроків регулювання напруги (n_{stuf}).

Результати моделювання показали, що у випадках налаштування регулятора з великою кількістю ступенів керування (через низьку зону нечутливості контролера) розкид напруги у вузлах низьковольтної мережі є найменшим. Велика кількість циклів перемикання також має прямий вплив на ключові показники якості керування (RQ) у вузлах мережі, які також є великими. Тому було введено додатковий ключовий показник: середній розкид напруги в окремих вузлах мережі. Для регулятора із зоною нечутливості $du=0,02$ середні інтерквартильні діапазони (моносенсор: 0,0148 в. о.; моносенсор із заданим значенням, що залежить від потоку навантаження: 0,0145 в. о.; моносенсор із заданим значенням, що залежить від сонячної радіації: 0,0165 в. о. е.) також є найменшими.

Що стосується ключового показника якості керування, значущі результати виникають лише з великими зонами нечутливості контролера (2—4% $U_{ном}$) (R_{QKHS} , пов'язаний із вузлом 3: моносенсор: 1,1399 в. о.; моносенсор із заданим значенням, що залежить від потужності навантаження: 0,1944 в. о.), оскільки кількість циклів перемикання менша.

Для оцінки глобальних розкидів напруги ($\Delta u_{global, Red}$) при регулюванні використовується рівняння (8), що передбачає порівняння з базовим варіантом розкиду напруги в нерегульованому випадку (використання звичайного трансформатора) $17,43\% U_{ном}$.

$$\Delta u_{global, ONT} = \Delta u_{max, global} - \Delta u_{min, global} = (1,102 - 0,9277) \text{ в.о.} = 0,1743 \text{ в.о.} \quad (8)$$

Відсоткове зниження глобального розкиду напруги $\Delta u_{global, Red}$ порівняно з базовим сценарієм, результатом є рівняння (9):

$$\Delta u_{global, Red} = \left(1 - \frac{\Delta u_{global} (\text{метод регулювання})}{0,1743 \text{ в.о.}} \right) \cdot 100\%. \quad (9)$$

У результаті дослідження встановлено, що при моносенсорному режимі регулювання можна досягти зменшення розкиду напруги до 15,4% із специфікацією змінного заданого значення та зоною нечутливості контролера $du = 0,02$ в. о. При встановленні зони нечутливості контролера 0,015 в. о. (відповідає 60% крокової напруги) і одного фіксованого заданого значення напруги при номінальній напрузі $U_{ном}$ досягнуто шляхом мінімізації розкиду напруги до 15,0%. З подальшою параметризацією зони нечутливості контролера ефекти зниження напруги зменшуються.

Регулювання напруги в режимі моносенсора, зазвичай, служить для відокремлення рівня мережі низької напруги від рівня мережі середньої (вищої) напруги за допустимими (нормативними) допустимими значеннями. Через представлену параметризацію регулятора діапазон регулювання напруги збільшується вдвічі — з 8% до 16% $U_{ном}$. При збільшенні зони нечутливості контролера з 60% до 80% від ширини кроку вдвічі зменшується кількість циклів перемикання з пов'язаним збільшенням загального розкиду напруги та зменшенням запланованої зміни напруги мережі в заданому діапазоні напруги.

Використання змінного заданого значення підсилення на основі характеристичної кривої (залежності від потужності) призводить до центрування розкиду напруги вузлів мережі в зоні уставки напруги і, отже, до збільшення додаткового потенціалу фідерів і навантажень. У випадках використання моносенсорного режиму роботи регулятора та специфікації заданого значення змінної напруги досягається зниження розкиду напруги до 15,4% порівняно з нерегульованим випадком.

Багатосенсорний режим роботи керованого трансформатора локальної мережі з урахуванням напруги додаткових вузлових. З огляду на непогані результати регулювання в моносенсорному режимі з дистанційним вимірюванням фактичної напруги у вузлі електричної мережі запропоновано для обробки даних вимірювань напруги у додаткових контрольних вузлах використати фільтри даних (рис. 2).

Для контролю напруги в мережі з наявною інфраструктурою вимірювання параметрів ЕЕ алгоритм керування є порівняно простим, оскільки діапазон допустимої напруги, дозволений стандартом, може використовуватися як зона нечутливості контролера для регулювання використовуються напруги у вузлах низьковольтної розподільної мережі.

Розширення для багатосенсорного режиму регулювання

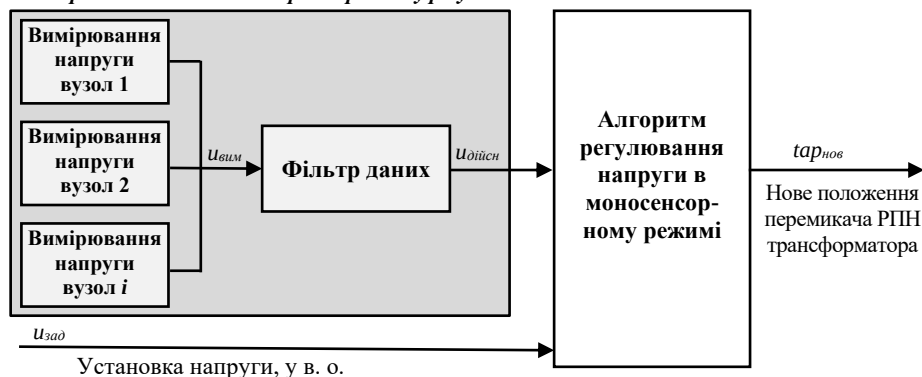


Рис. 2. Структура концепції керування напругою з кількома сенсорами (схема потоку сигналів)

У випадку, коли в точці вимірювання виникає порушення діапазону допустимої напруги, формується ступеневий сигнал керування регульованого трансформатора локальної мережі. Однак, враховуючи відсутність технічної можливості виявлення повного стану напруги в низьковольтній розподільній мережі, режим роботи з повною інфраструктурою вимірювання далі не розглядається.

У випадку, коли точки вимірювання напруги в мережі низької напруги обираються вибірково, інші допустимі значення напруги (включаючи зону нечутливості регулятора) повинні бути враховані під час керування. Крім того, для оцінювання даних вимірювань напруги використовується фільтр даних, який надає регулятору напруги відповідні входні значення (фактичні значення напруги).

Розглянемо два варіанти реалізації фільтра для визначення кінцевого фактичного значення напруги у мережі.

Фільтр даних для генерації фактичних значень напруги на основі усереднення ефективних значень напруги вузла, виміряних у точках мережі (фільтр середніх даних). Фільтр даних формує середнє значення за всіма доступними даними в момент часу t_i . Дані вимірювання передаються на станцію локальної мережі і представляються у вигляді вектора вимірювання $U_{Mess}(t)$ (10):

$$u_{вимір}(t) = \begin{bmatrix} u_{1,вимір}(t) \\ \dots \\ u_{n,вимір}(t) \end{bmatrix}; \quad (10)$$

Вектор має розмірність

$$n_{\text{вим.}}(t) = \dim(\mathbf{u}_{\text{вим.}}(t)). \quad (11)$$

На основі окремих компонентів вектора вимірювань $u_{i,\text{вимір}}$ розраховується результуюче фактичне (середнє) значення напруги $U_{\text{дійсн},MW}$ (12).

$$u_{\text{дійсн},MW}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{вим.}}} (u_{i,\text{вим.}}(t))}{n_{\text{вим.}}}, \quad (12)$$

де $n_{\text{вим.}}$ — кількість точок вимірювання.

Оскільки метод не враховує положення окремих точок вимірювання в мережі, він не може бути використаний для оцінювання стану напруги в усій низьковольтній розподільній мережі. Перевагою цього методу є проста реалізація фільтра даних. Однак при наявності великих розкидів напруги в мережі низької напруги (одночасні лінії навантаження та розподіленої генерації) середні значення напруги не дають змоги чітко оцінити стан мережі.

Фільтр даних для генерації фактичних значень напруги на основі частотного розподілу ефективних значень напруги вузла, виміряних в окремих вузлових точках мережі (частотний фільтр даних). У цьому варіанті фактичні значення напруги (ефективні значення) оцінюються статистично (гістограмний підхід). За даними вимірювань напруги в момент часу t спочатку визначається загальний розкид напруги як різниця між максимальним ефективним значенням напруги та мінімальним ефективним значенням напруги:

$$\Delta u_{\text{вим.}}(t) = \max(u_{\text{вим.}}(t)) - \min(u_{\text{вим.}}(t)). \quad (13)$$

З використанням попередньо розрахованого загального розкиду та кількості точок вимірювання (відповідає довжині вектора вимірювання $u_{\text{вим.}}$) визначається ширина класу виміряних напруг:

$$dx_u(t) = \frac{\Delta u_{\text{вим.}}(t)}{n_{\text{вим.}} - 1}. \quad (14)$$

Вказані величини використовуються для визначення вектора класу $a_{\text{клас}}(t)$, (15):

$$\mathbf{a}_{\text{клас}}(t) = \begin{pmatrix} a_{11}(t) \\ a_{21}(t) \\ a_{31}(t) \\ \dots \\ a_{n1}(t) \end{pmatrix}, \quad (15)$$

де

$$a_{11}(t) = \min(u_{\text{вим.}}(t)); \quad (16)$$

$$a_{i1}(t) = \min(u_{\text{вим.}}(t)) + (i-1) \cdot dx_u(t) \text{ для } 1 < i < n; \quad (17)$$

$$a_{n1}(t) = \max(u_{\text{вим.}}(t)). \quad (18)$$

На основі значень у визначеному векторі класу $a_{\text{клас}}(t)$ дані статистично оцінюються, число вводиться у вектор $h_{\text{кільк.}}(t)$ і значення класу $u_{\text{клас}}(t)$.

Зважене за частотою класу результуюче фактичне значення напруги, яке використовується для керування, визначається за рівнянням (19):

$$u_{\text{дійсн,іст}}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{вим}}} (h_{i\text{клас}}(t) \cdot u_{i\text{клас}}(t))}{n_{\text{вим}}} \quad (19)$$

Перевага цього методу полягає в тому, що стан напруги в мережі може бути більш точно оцінений в одному значенні. Це досягається за рахунок того, що виміряні ефективні значення напруги вузлів мережі зважені з частотою, з якою вона з'являється у визначених класах. У разі порушення діапазону допустимої напруги для уникнення недопустимих підвищень або понижень напруги в алгоритмі враховується швидке пониження коефіцієнта трансформації (пряме перемикання) (Кононов, Кононова, & Куравська, 2018).

Контролер мультисенсорної роботи регулювання напруги трансформатора локальної мережі. Блок-схема контролера у мультисенсорному режимі роботи з використанням фільтра даних наведена на рис. 3. Як і в режимі моносенсора, алгоритм керування передбачає формування сигналу керування з використанням фактичного значення напруги, розрахованого з використанням фільтра даних і заданого значення. Потім розраховується положення виводу трансформатора (положення РПН). Якщо кінцеве фактичне значення напруги, яке визначене з використанням фільтра даних, є результатом перевищення смуги допустимих значень напруги відповідно до стандарту (ДСТУ EN 50160:2014, 2014), запускається безпосереднє зниження напруги (швидке перемикання на нижчий коефіцієнт трансформації). Поведінка регулятора в часі також враховується інтегратором.

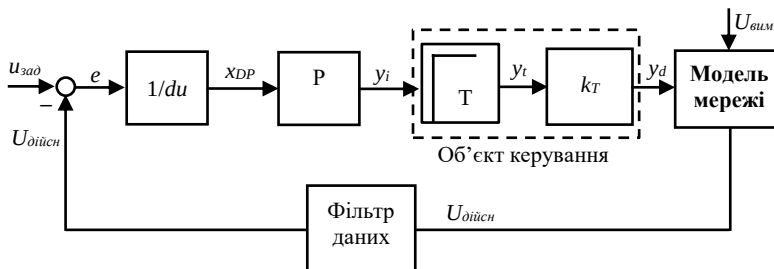


Рис. 3. Схема керування роботою регульованого трансформатора з кількома сенсорами (зворотний зв'язок за напругою всіх вузлів до кінцевого фактичного значення напруги для роботи моносенсора через приєднаний на вході фільтр даних)

Представлена схема керування досліджувалася при роботі у низьковольтній розподільній мережі з регульованим трансформатором. Проведена параметризація зони нечутливості контролера з використанням середньої довжини лінії, що відходить від підстанції 800 м:

$$du_{0G}(800 \text{ м}) = 6,36 \cdot 10^{-5} \frac{\text{в.о.}}{\text{м}} \cdot 800 \text{ м} + 0,02 \text{ в.о.} = 0,07088. \quad (20)$$

Враховуючи допуски на похибки вимірювання тощо, зона нечутливості параметризованого для роботи з кількома датчиками контролера в цьому випадку становить максимум $du = 0,07$ в. о. Для використаної моделі електричної мережі із середньою довжиною лінії 650 м зона нечутливості контролера становить $du_{0G} = 0,06$ в. о.

Структура контролера для роботи в режимі з декількома датчиками відрізняється від режиму роботи з моносенсором проходженням фактичних значень вимірюваних напруг у колі зворотного зв'язку через описані фільтри даних.

Порівняння фільтрів даних для розрахунку кінцевого фактичного значення напруги. При проведенні моделювання мертва зона контролера регулювання напруги трансформатора локальної мережі параметризована на 2% від номінальної напруги ($du = 0,02$ в. о.). Пряме порівняння отриманих фактичних значень напруги за обома методами (середнє значення та частотне зважування) показало, що між результатами є дуже невеликі відхилення ($< 0,01$ в. о.).

Отже, обидва методи придатні для визначення кінцевого фактичного значення напруги на основі різних вимірюваних напруг вузлів електричної мережі. За допомогою представлених фільтрів даних можна приблизно оцінити повний стан напруги в мережі за умови, що точки вимірювання розташовані віддалено в низьковольтній розподільній мережі. Щоб забезпечити спрацювання РТ у цьому режимі роботи відповідно до обмежень діапазону (ДСТУ EN 50160:2014, 2014), передача даних вимірювань повинна відбуватися щонайменше з хвилинними інтервалами (середні значення за 1 хв).

Порівняння мультисенсорних режимів роботи. Аналіз результатів статистичних оцінок часових кривих напруги вузла, отриманих за результатами моделювання для контролера з однаковою зоною нечутливості, показав, що вони не залежать від виду використовуваного фільтра даних.

Результати моделювання показали, що при використанні багатосенсорного методу для контролера із зоною нечутливості $du = 0,02$ в. о. порівняно з нерегульованим випадком (звичайний трансформатор локальної мережі) можливе зменшення загального розкиду напруги до 20,9% (при моносенсорній роботі — 15,4%). Для контролера із зоною нечутливості $du = 0,04$ в. о. це призводить до зменшення лише на 1,4%, а при зоні нечутливості $du = 0,07$ в. о. відбувається зростання на 10,8%. Однак необхідно враховувати, що використання даних вимірювань напруги дає змогу отримати більше інформації про мережу. Вибір зони нечутливості контролера для цього режиму роботи в інтервалі $0,02$ в. о. $< du < 0,07$ в. о. дозволяється зменшити на кількість циклів перемикачів РПН трансформатора. Впровадження швидкого перемикачання виводів трансформатора забезпечує в цьому режимі роботи відповідність зміни напруги обмеженням, передбаченим у стандарті, незважаючи на збільшення розкиду напруги до 10,8%.

Висновок щодо мультисенсорного режиму роботи регулятора. Дослідження використання декількох датчиків для визначення фактичного значення напруги як середнього або зваженого відповідно до частоти показали ідентичні результати. Однак для розподільних мереж низької напруги з різномірним навантаженням (споживачі, розподілена генерація) доцільне використання частотного фільтра даних.

Для забезпечення надійної роботи в умовах електричної мережі (несиметрія, похибки вимірювань) і підтримання зміни напруги в діапазоні значень, дозволених стандартом, зона нечутливості регулятора повинна знаходитися в інтервалі $[2\% U_{ном}; 7\% U_{ном}]$.

Розрахункові дослідження режимів роботи регулятора з декількома датчиками показали, що порівняно з роботою в моносенсорному режимі зменшився глобальний загальний розкид напруги в мережі.

Висновки

Запропоновано використання регулятора напруги з моносенсором з визначенням фактичного значення напруги на стороні низької напруги трансформатора з відповідними розширеннями через статистику для специфікації змінного заданого значення (включаючи залежність від потоку потужності та сонячного випромінювання). В результаті досягнуто відокремлення мережі низької напруги від вищого рівня трансформатора мережі середньої напруги з огляду на свободу в діапазоні зміни напруги, дозволених стандартом. Отже, керування коефіцієнтом трансформації трансформатора шляхом використання статистичних даних зміни напруги в мережі для формування уставки регулятора забезпечує зменшення розкиду напруги у вузлах мережі. У цьому режимі роботи зону нечутливості регулятора доцільно вибирати якомога меншою, щоб створити додаткову свободу в діапазоні зміни напруги. При збільшенні зони нечутливості регулятора від $du = 0,015$ в. о. до $du = 0,02$ в. о. зменшується кількість циклів перемикання РПН трансформатора. Оцінка стійкості системи керування показала, що постійна часу інтегрування T_i регулятора повинна бути більшою, ніж стала часу T_c системи керування (тривалість процесу перемикання перемикачем під навантаженням). Крім того, зона нечутливості регулятора повинна встановлена щонайменше на 60% ширини РПН пристрою РПН.

Також розглянута стандартна структура регулятора напруги з моносенсором та два варіанти можливих фільтрів даних, які забезпечують визначення кінцевого фактичного значення напруги з даних дистанційного вимірювання напруги і використання її як вхідної змінної для регулятора. Отже, для обчислення фактичного значення напруги проводиться робота з кількома датчиками з усередненням або зважуванням частоти напруги, яка виникає. Ефективність обох методів розрахунку фактичного значення напруги в обох випадках змінюється лише на декілька відсотків. Поведінка перемикача та зворотний зв'язок за напругою вузлів у мережі ідентичні. Щоб уникнути непотрібних спрацювань РПН у цьому робочому режимі зону нечутливості контролера можна вибрати такою, щоб вона була більшою (наприклад, $du = 0,04$ о. е.), ніж у моносенсорній роботі.

Література

- Голота, А. Д. (2016). *Автоматика в електроенергетичних системах*. Київ, Вища школа.
- Кононов, Б. Т., Кононова О. А., & Куравська Н. М. (2018). Аналіз способів регулювання напруги в електричних мережах. *Системи управління, навігації та зв'язку*, 5(51), 38—43.
- Ладанюк, А. П., Луцька, Н. М., Кишенько, В. Д., Власенко, Л. О., & Іващук, В. В. (2019). *Методи сучасної теорії управління*. Київ: Видавництво Ліра-К.
- Яндутьський, О. С., Труніна, Г. О., & Нестерко, А. Б. (2021). *Регулювання напруги в розподільних електричних мережах з відновлюваними джерелами енергії*. Київ: КП ім. Ігоря Сікорського.
- Geibel, D., Degner, T., Reinann, T., Engel, B., Bulo, T., Da Costa, J. P., Kruschel, W., Sahan, B. & Zacharias, P. (2012). Active intelligent distribution networks — Coordinated voltage regulation methods for networks with high share of decentralised generation. CIREN 2012 Workshop: Integration of Renewables into the Distribution Grid., pp. 2135—2167. doi.org/10.1049/cp.2012.0820.
- Li, Y., & Crossley, P. A. (2012). Voltage Control on unbalanced LV networks using tap changing transformers. 11th IET International Conference on Developments in Power Systems Protection (DPSP 2012). doi: 10.1049/cp.2012.0006.

- Rogers, J. D., & Green, C. T. (2010). A Hybrid Diverter Design for Distribution Level On-load Tap Changers. In: IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 12—16 Sept. 2010, Atlanta, Georgia. Piscataway, NJ: IEEE, 2010, P. 1493—1500. doi: 10.1109/ECCE.2010.5618245.
- Frohner, J., Schulz, G., Claus, J., & Lemkens, M. (2015). Improving power quality by a 10/20kV/0.4 kV voltage regulated distribution transformer using semiconductor switching devices. International ETG Congress 2015 November 17—18, 2015, Bonn, Berlin Offenbach: VDE Verlag GmbH, 385—391.
- Gao, C., & Redfern, M. A. (2010). A review of voltage control techniques of networks with distributed generations using On-Load Tap Changer transformers: Universities Power Engineering Conference (UPEC), 45th International. IEEE Conference Publications. — IEEE Conference Publications.
- Reese, C., Buchhagen, C., & Hofmann, L. (2012). Voltage Range as Control Input for OLTC-equipped Distribution Transformers. In: IEEE PES Transmission and Distribution Conference & Exposition, Orlando, USA, 07—10 May 2012. doi: 10.1109/TDC.2012.6281619.
- Werther, B., Becker, A., Schmiesing, J., & Wehrmann, E. (2012). Voltage Control in low voltage systems with controlled low voltage transformer (CLVT). In: CIRED Workshop. 29—30 May 2012. doi:10.1049/cp.2012.0821.
- Nazir, M., Burkes, K., & Enslin, J. H. Transformation of conventional transformers for enhanced DC mitigation in AC power networks with advanced grid support. (2023). e-Prime — Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy. Volume 3, March, 100101. doi.org/10.1016/j.prime.2022.100101.
- Johansson, N., Angquist, L., & Nee, H. (2010). An adaptive controller for power system stability improvement and power flow control by means of a thyristor switched series capacitor (TSSC), IEEE Trans. Power Syst., 25(1), 381—391. doi.org/10.1109/TPWRS.2009.2036484.
- Mauger, M. J., Kandula, P., Lambert, F., & Divan, D. (2018). Grounded controllable network transformer for cost-effective grid control, in: Proceedings of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Portland, OR, 3732—3739. doi.org/10.1109/ECCE.2018.8557956.
- Sarimuthu, C. R., Ramachandaramurthy, V., Agileswari, K. R., & Mokhlis, H. (2016). A review on voltage control methods using on-load tap changer transformers for networks with renewable energy sources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1154—1161. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.016.
- Spertino, F., Cioci, A., Mazz, A., Nobile, M., Russo, A., & Chicco, G. (2022). Voltage control in low voltage grids with independent operation of on-load tap changer and distributed photovoltaic inverters. *Electric Power Systems Research*. 211, 108187. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108187.
- Mak, D., Choeum, D., & Choi, D. H. (2020). Sensitivity analysis of volt-VAR optimization to data changes in distribution networks with distributed energy resources. *Applied Energy*, 261, 114331. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114331.
- Janiga, K., Miller, P., Małkowski, R., & Izdebski, M. (2024). An ANN-Based Method for On-Load Tap Changer Control in LV Networks with a Large Share of Photovoltaics—Comparative Analysis. *Energies*, 17(22), 5749. https://doi.org/10.3390/en17225749.
- Maataoui, Y., Boutfarjoute, O., Chekenbah, H., and Lasri, R. (2022). New control scheme of on-load tap changer for voltage regulation in active distribution systems using Fuzzy logic. ITM Web of Conferences 48, 04001. https://doi.org/10.1051/itmconf/20224804001.
- Papazacharopoulos, N., Gibescu, M., & Vaessen P. (2015). Smart voltage control in distribution networks with a large share of distributed renewable generation, 2015 IEEE Eindhoven PowerTech, 1—6. doi: 10.1109/PTC.2015.723249.
- Mejia-Ruiz, G. E., Cárdenas-Javier, R., Arrieta Paternina, M. R., Rodríguez-Rodríguez, J. R., Ramirez, J. M., & Zamora-Mendez, A. (2021). Coordinated Optimal Volt/Var Control for Distribution Networks via D-PMUs and EV Chargers by Exploiting the Eigensystem Realization, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12(3), 2425—2438. doi: 10.1109/TSG.2021.3050443.

УДК 681.513

ENGINEERING ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF POSITIONING ACTUATOR CONTROL SYSTEMS IN LOCKING AND REGULATING SYSTEMS OF PRODUCT PIPES

S. Volodin, V. Myronchuk, K. Vasylykivskyi, O. Zaporozhets
National University of Food Technologies

Key words:

*Shut-off and control system
Positioning actuator
Mathematical modelling
Optimisation
Adaptive algorithm
Food industry*

Article history:

Received 13.01.2025
Received in revised form
28.01.2025
Accepted 10.02.2025

Corresponding author:

V. Myronchuk
E-mail:
mironchukvg@ukr.net

Citation: Володін С. О.,
Мирончук В. Г., Василь-
ківський К. В., Запоро-
жець О. В. (2025). Інже-
нерний аналіз та оптимі-
зація систем керування
позиційними приводами
в запірно-регулювальних
системах продуктопрово-
дів. *Наукові праці НУХТ*,
31(1), 120—130.
DOI: 10.24263/2225-
2924-2025-31-1-10

ABSTRACT

One of the key factors in the efficient operation of food industry enterprises is the rational organization of technological communications, in particular, the correct selection and configuration of shut-off and control networks. The relevance of the study lies in the need to develop effective methods for optimizing the operation of shut-off and control devices with positioning electropneumatic control systems, which will increase energy efficiency, control accuracy and stability of equipment operation.

The priority area of research related to the implementation of shut-off and control devices is to substantiate the optimal type of control loop equipped with different types of valves and positioning electropneumatic control systems by means of a comparative analysis of proportional and discrete distributors. The aim of the study was to develop a mathematical and physical model of shut-off and control systems with positioning actuators used in the food industry for further optimization of their operation. To achieve this goal, the following were developed: a structural model of the shut-off and control device in a product pipeline system with proportional control actuators to study the dynamic characteristics of the systems, as well as a numerical model that takes into account nonlinearities and variable operating conditions. The rational design and configuration parameters of the systems were identified to ensure minimum response time, high positioning accuracy, and low vibration levels. A comparative analysis of different types of distributors and control signal shapes showed that proportional distributors and smooth control signals provide the highest quality control.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-1-10

ІНЖЕНЕРНИЙ АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ПОЗИЦІЙНИМИ ПРИВОДАМИ В ЗАПІРНО-РЕГУЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМАХ ПРОДУКТОПРОВОДІВ

С. О. Володін, В. Г. Мирончук, К. В. Васильківський, О. В. Запорожець
Національний університет харчових технологій

Одним із ключових факторів ефективної експлуатації підприємств харчової галузі є раціональна організація технологічних комунікацій, зокрема правильний вибір і конфігурація запірно-регулювальних мереж. Актуальність дослідження полягає в необхідності розробки ефективних методів оптимізації роботи запірно-регулювальних пристроїв (ЗРП) з позиційними електропневматичними системами керування, що підвищить енергоефективність, точність регулювання та стабільність роботи обладнання.

Пріоритетним напрямком досліджень, пов'язаних з імплементацією ЗРП, є обґрунтування оптимального типу контуру керування, оснащеного різними видами запірної арматури та позиційними електропневматичними системами керування, шляхом порівняльного аналізу пропорційних і дискретних розподільників. Метою дослідження є розробка математичної та фізичної моделі запірно-регулювальних систем з позиційними приводами, що застосовуються в харчовій промисловості, для подальшої оптимізації їхньої роботи. Для досягнення поставленої мети були розроблені: структурна модель ЗРП в системі продуктопроводу з приводами пропорційного керування для дослідження динамічних характеристик систем, а також чисельна модель, яка враховує нелінійності та змінні умови експлуатації. В рамках дослідження було визначено раціональні параметри конструкції та налаштування систем, що забезпечують мінімальний час відгуку, високу точність позиціювання та низький рівень вібрацій. Порівняльний аналіз різних типів розподільників і форм сигналів керування показав, що пропорційні розподільники та плавні сигнали управління забезпечують найвищу якість регулювання.

Ключові слова: запірно-регулювальні системи, позиційні приводи, математичне моделювання, оптимізація, адаптивні алгоритми, харчова промисловість.

Постановка проблеми. Одним із перспективних напрямків досліджень у галузі автоматизації харчових виробництв є вдосконалення систем керування запірно-регулювальними мережами. Вдосконалення цих систем потребує не лише розробки нових математичних моделей і систем керування, але й оптимізації параметрів наявних рішень. Розробка комплексних підходів до конструювання й енергоефективної експлуатації ЗРП є нагальним науковим завданням, вирішення якого сприятиме підвищенню енергоефективності, точності регулювання та стабільності роботи технологічного обладнання.

Актуальність дослідження полягає в розробці науково обґрунтованих підходів до оптимізації роботи запірно-регулювальних пристроїв з позиційними електропневматичними системами керування. Оптимізація роботи запірно-регулювальних систем передбачає комплексний підхід, що включає розробку детальних мате-

матичних моделей, які адекватно відображають нелінійні динамічні характеристики системи та її взаємодію з іншими елементами технологічного процесу. Для забезпечення високої точності та швидкодії системи необхідно провести порівняльний аналіз різних типів розподільників, зокрема пропорційних і дискретних, з метою визначення їх впливу на ключові показники ефективності, такі як точність позиціонування, швидкість відгуку та енергоефективність. Валідація параметрів системи керування передбачає підбір оптимальних значень коефіцієнтів регулятора та налаштування контурів зворотного зв'язку з метою досягнення бажаних динамічних характеристик. Для забезпечення стійкої роботи системи в умовах змінних зовнішніх впливів необхідно розробити адаптивні алгоритми керування, здатні до самонастроювання. Експериментальна верифікація розроблених моделей та алгоритмів на лабораторних стендах або промислових об'єктах є необхідним етапом для підтвердження їх ефективності та готовності до практичного застосування.

Отримані наукові результати створюють теоретичну основу для розробки нових методів оптимізації технологічних процесів у харчовій промисловості, що підвищить енергоефективність виробництва, покращить якість продукції та забезпечить стабільну роботу обладнання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Оптимізація роботи продуктопроводів у мережах харчового виробництва, де регулювання рідинних потоків здійснюється за допомогою пропорційних пневматичних приводів, є актуальним завданням. Різноманітність властивостей продуктів, що транспортуються, вимагає індивідуального підходу до конструювання та налаштування пневмосистем. Необхідність забезпечення оптимальних параметрів транспортування, таких як швидкість потоку, тиск і витрата, обумовлена специфікою кожної групи продуктів. Наявні на ринку пневмотранспортні системи часто не забезпечують необхідної ефективності при зміні характеристик продукту, що підкреслює важливість детального моделювання процесів, які відбуваються в таких системах. Це дасть змогу розробити універсальні й адаптивні рішення, здатні забезпечити стабільну роботу продуктопроводів за різних умов (Carneiro, & Almeida, 2012). Застосування клапанних систем з індивідуальним приводом і мікропроцесорним керуванням у сучасних машинах для пакування харчових продуктів сприятиме досягненню високої точності дозування та гнучкості налаштування технологічних параметрів. (Гавва, & Кривошляс-Володіна, 2023). Емпіричні підходи до розрахунку систем пневмотранспорту не дають змоги адекватно оцінити динамічну поведінку двофазного потоку при різних режимах роботи запірно-регулювальних елементів (Jones, & Williams, 2008). Нелінійний характер процесів пневмотранспорту, відображений у системі диференціальних рівнянь, ускладнює застосування універсальних методів аналізу. Відсутність точних аналітичних розв'язків для опису взаємодій частинок підкреслює важливість фізичного моделювання для розробки ефективних систем керування рухом робочих органів технологічних машин. (Ismail, & Kuang, Yu, 2021). У праці (Peng, & Doroodchi, 2020) розроблено математичну модель процесу пневмотранспорту зерна, що дає змогу прогнозувати знос обладнання за різних режимів роботи. На основі результатів моделювання запропоновано алгоритми керування, які забезпечують оптимальну роботу приводів позиціонування в зерноочисних комплексах. Дослідження (Željko, & Grbavčić, 2006) виявило суттєві розбіжності між теоретичними моделями керування запірно-регулювальними

пристроями та реальними процесами пневмотранспорту, пов'язані з неврахуванням критичних швидкостей потоку в вертикальних ділянках трубопроводів. Це актуалізує необхідність розробки нових, більш адекватних моделей для оптимізації роботи систем керування запірно-регулювальними комплексами. Дослідження (Yan, & Cheng, 2024) присвячено оптимізації процесу пневматичного транспортування за допомогою обертового потоку, створеного запірно-регулювальним елементом. Експериментально доведено, що застосування обертальної лопатки ЗРП перед входом частинок знижує енергоспоживання системи на 9,8% при одночасному підвищенні ефективності транспортування. Аналіз спектрів потужності та автокореляційних функцій пульсацій швидкості підтвердив стабілізацію руху дисперсної фази в умовах обертового потоку. Однак масштабування отриманих результатів на промислові установки потребує додаткових досліджень, оскільки геометричні характеристики та режимні параметри реальних систем можуть суттєво відрізнятися від лабораторних умов. Обмеженість запропонованого методу може призвести до неперевіраних результатів при оцінці продуктивності, споживання стисненого повітря та стабільності подачі продукту внаслідок неврахування низки суттєвих факторів. (Ji, & Nao, 2022).

У (Gan, & Yu, 2016) запропоновано математичну модель, що описує поведінку двофазного потоку сипкого матеріалу в пневмосистемі з урахуванням геометричних змін трубопроводу. Модель базується на визначенні гідравлічних опорів різних конструктивних елементів та дає змогу оцінити вплив звужень, проте не враховує впливу таких факторів, як абразивність матеріалу, електростатичні ефекти та вплив системи керування на процес транспортування, так само, як і в дослідженні (Pan, & Liu, 2021). Проведені чисельні експерименти з використанням розробленої моделі дали змогу отримати характерні профілі швидкості й тиску вздовж траєкторії руху частинок (Rallabandi, & Apparao, 2023). Однак у запропонованій моделі частинка розглядалася як матеріальна точка, що не дає змоги врахувати вплив змін фізико-хімічних властивостей середовища на траєкторію руху та взаємодію частинок між собою під час тестування різних режимів керування ЗРП (Li, & Tang, 2023).

Запропонована пропорційна система керування в новому прототипі дозатора ліків дає змогу досягти високої точності дозування із забезпеченням зміни необхідної дози продукту (Ahadani, & De Silva, 2012). Описаний підхід (Liu, & Shao, 2023) розкриває динаміку роботи пропорційного клапана методом моделювання із впливом робочого тиску на рух золотника і подальшу турбулізацію робочого середовища. Однак модель не враховує впливу нелінійності системи керування, як і методика керування, розроблена в (Saha, & Gangopadhyay, 2014).

Результати проведених досліджень щодо оптимізації режимів роботи продуктопроводів і регулювання потоку продукції ЗРП не дають змоги сформулювати чіткі рекомендації для створення нових зразків ЗРП із пропорційними системами керування. Отримані дані підтвердили необхідність проведення додаткових досліджень для розробки ефективних мехатронних систем керування потоком сипких харчових продуктів із використанням нових структурних елементів системи керування ЗРП.

Метою дослідження є розробка фізико-математичної моделі для обґрунтування роботи позиційних приводів у системах керування потоком продуктів для подальшого аналізу їх динамічних характеристик і визначення оптимальних параметрів керування ЗРП.

Матеріали і методи. Матеріалами дослідження обрано ЗРП технологічного мехатронного модуля в системі продуктопроводу. Предметом дослідження є процеси в системі програмно керованого в робочому продуктопроводі ЗРП та його математичні моделі на основі компонентів, реалізованих у програмі Simulink за допомогою блоків та макроблоків. Пропорційно керовані запірно-регулювальні пристрої в системі продуктопроводу - це спеціальні механізми, які призначені для точного регулювання потоку речовини (рідини, газу, сипучих матеріалів) всередині трубопроводів (Amirante, & Lippolis, 2006). Їхньою основною функцією є забезпечення плавного та пропорційного змінення прохідного перерізу трубопроводу відповідно до заданого сигналу керування.

Використані методи дослідження спираються на досягнення в галузі гідродинаміки систем керування, зокрема на праці (Amirante, & Tamburrano, 2014; Amirante, & Catalano, 2007). Також застосовано математичний апарат звичайних диференціальних рівнянь, адаптований до ПП Mathlab.

Під час дослідження, з метою оптимізації процесу дозування, було проведено детальний аналіз статичних і динамічних характеристик мехатронного модуля, включаючи дослідження таких параметрів, як час відгуку, точність позиціонування та стабільність за методикою (Yang, & Hu, 2011). Для моделювання динамічної поведінки пропорційно регулювальних клапанів у системах продуктопроводу враховано нелінійну залежність часу затримки від положення золотника клапана. Використання програмного комплексу MATLAB/Simulink дало змогу провести детальний аналіз впливу різних факторів на динаміку системи. Порівняння результатів моделювання з експериментальними даними показало високу точність за запропонованої моделі.

Отримані результати можуть бути використані для розробки адаптивних систем керування, які забезпечують оптимальну роботу клапана в широкому діапазоні умов (Bram, & Yang, 2020). Оптимізація конструктивних параметрів модуля ЗРП дала змогу досягти значного покращення метрологічних характеристик системи.

Основними припущеннями під час моделювання (Choudhury, & Shah, 2005) є: рідка харчова продукція за фізико-механічними властивостями наближена до ньютонівських; режими керування сформовані на базі зміни тиску з різними законами; струмове навантаження $I_{min}...I_{max}=4...20$ мА, частота подачі повітря 0,1...1 Гц. Теоретичне дослідження ЗРП в структурі продуктопроводу підкріплено математичним моделюванням у середовищі Simulink, ґрунтуючись на принципах газодинаміки, гідравліки, теорії систем.

Викладення основних результатів дослідження. Для дослідження продуктопроводу підведення рідких харчових продуктів до системи живильника дозувально-фасувальної машини було розроблено модульні системи управління, що реалізують різноманітні алгоритми керування (рис. 1). З метою підвищення точно-

сті та швидкодії систем керування ЗРП розроблено комплекс математичних моделей, які відображають нелінійні динамічні процеси в запірно-регулювальних системах різного типу. Оптимізація динамічних характеристик технологічних процесів тісно пов'язана з точністю та стабільністю роботи запірно-регулювальних пристроїв (ЗРП).

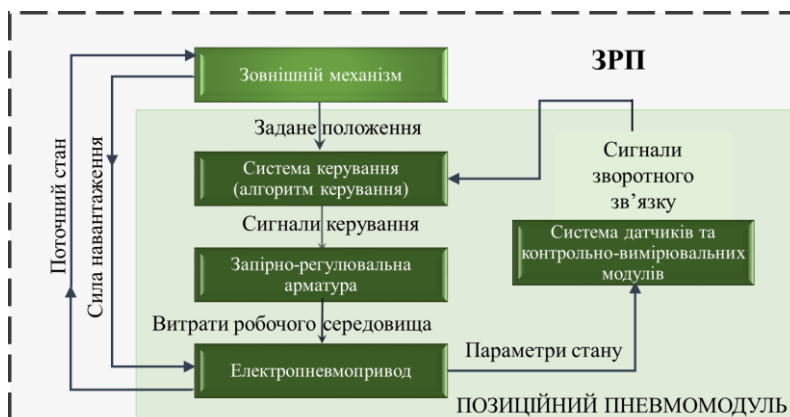


Рис. 1. Схема компонентування пневматичного модуля керування та зовнішнього механізму запірно-регулювального пристрою

Проте ефективність таких систем значною мірою залежить від конструктивних особливостей використаного розподільника, який безпосередньо впливає на динаміку процесу закриття запірної арматури. Зокрема, час спрацювання дискових заслінок, як ключового елемента ЗРП, суттєво впливає на витратні характеристики робочих середовищ.

Нестабільність цього параметра може призводити до неконтрольованих коливань у технологічних контурах, негативно впливаючи на якість продукції. Для розв'язування цієї проблеми широко застосовують позиційні електропневматичні приводи, що забезпечують плавне регулювання положення запірної арматури (рис. 1).

За допомогою розробленого програмного комплексу проведено деталізоване чисельне моделювання роботи запірно-регулювального пристрою продуктопроводу, що оптимізувало режими його керування. Типовий приклад такого пристрою наведено на рис. 2.

Дослідна модель позиційного приводу ЗРП складається з комп'ютерної моделі та реального модуля (на базі дискової заслінки), змонтованого в структурі продуктопроводу (рис. 3). Модель, реалізована програмно, забезпечує гнучке керування процесом дозування шляхом зміни параметрів електромагнітних клапанів. Для підвищення точності дозування враховані статичні та динамічні характеристики системи. Розроблені схеми та алгоритми дають змогу реалізувати різні закони зміни тиску в системі, що забезпечує можливість регулювання дози продукту.

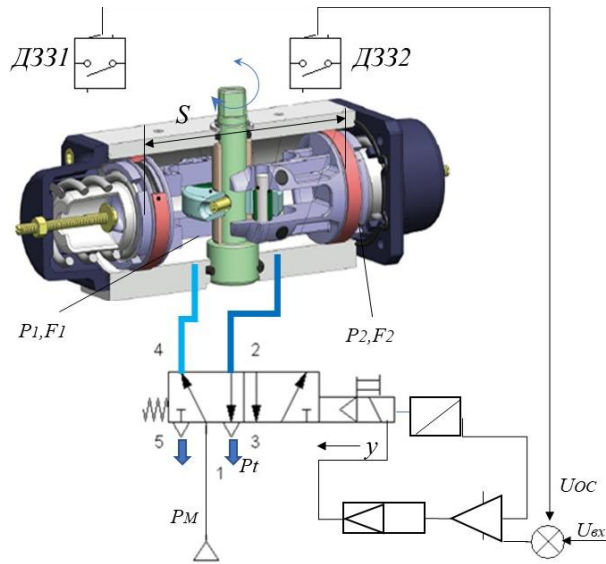


Рис. 2. Принципова структура керування ЗРП на основі пропорційного електропневматичного розподільника та поворотного кулачкового приводу: Рм — тиск підвідної пневматичної мережі; P1 — тиск магістральний поршневої камери; Pt — тиск відвідної пневматичної мережі (вихлоп); $U_{вх}$ — керуючий вхідний сигнал; U_{oc} — сигнал для зворотного зв'язку; ДЗЗ — датчик зворотного зв'язку (пропорційний); ДЗЗ1 і ДЗЗ2 — датчики зворотного зв'язку дискретні

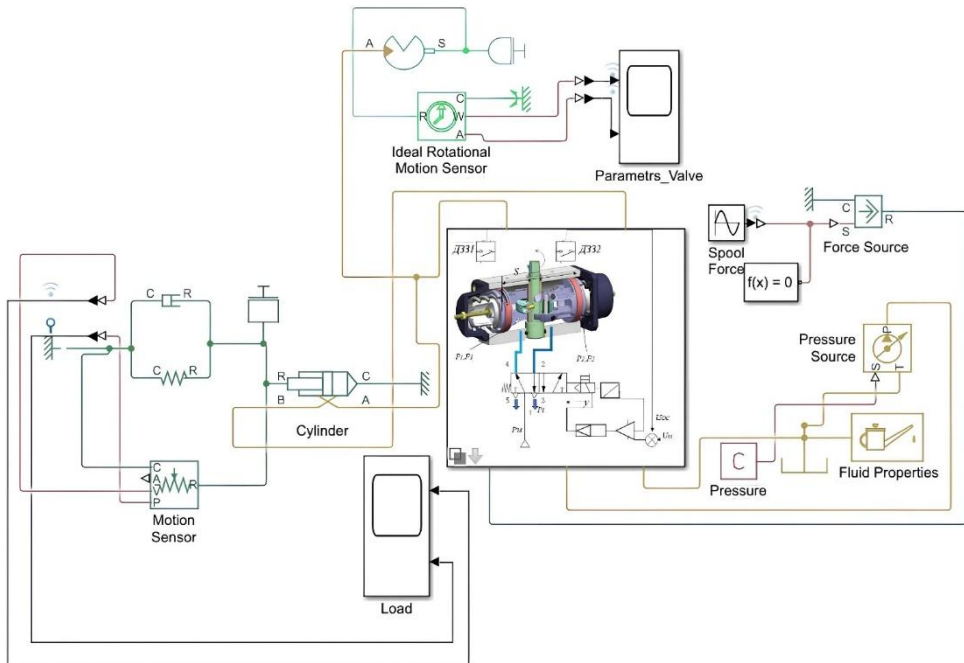


Рис. 3. Модель дослідження динаміки ЗРП в ПП Simulink (Simscape)

Модель (рис. 3) є деталізованим зображенням мехатронного модуля в структурі графічного представлення фізичної системи. Розроблена модель ЗРП забезпечує моделювання та аналіз поведінки привода і регульованого рідинного продукту (40-відсотковий розчин сахарози при температурі 40 °С, абсолютна в'язкість 3,26 сП) за допомогою математичних рівнянь. Модель ЗРП, інтегрована в середовище MATLAB/Simulink, надає компоненти для дослідження та розробки пропорційних систем керування, які моделюються від простих механічних до складних електромеханічних, електропневмогідравлічних. Під час тестування моделі отримані параметри динамічного регулювання потоку рідини в продуктопроводі. Система керування, реалізована у вигляді струмової петлі 4—20 мА, забезпечує точне дозування шляхом використання зворотного зв'язку за тиском і витратою. Основні компоненти та їх функції: електромагнітний клапан, який під дією електричного сигналу керує потоком стисненого повітря до виконавчого механізму; поворотний кулачковий привід, що перетворює рух клапана на обертальний рух заслінки, змінюючи таким чином прохідний переріз трубопроводу; датчик тиску, який вимірює тиск у системі й передає сигнал зворотного зв'язку на контролер; витратомір, який вимірює витрату рідини, що протікає через трубопровід; контролер, який приймає сигнали від датчиків, порівнює їх із заданим значенням і генерує сигнал керування для електромагнітного клапана. Сигнал зворотного зв'язку від датчиків тиску та витрати порівнюється із заданим значенням у контролері (рис. 4).

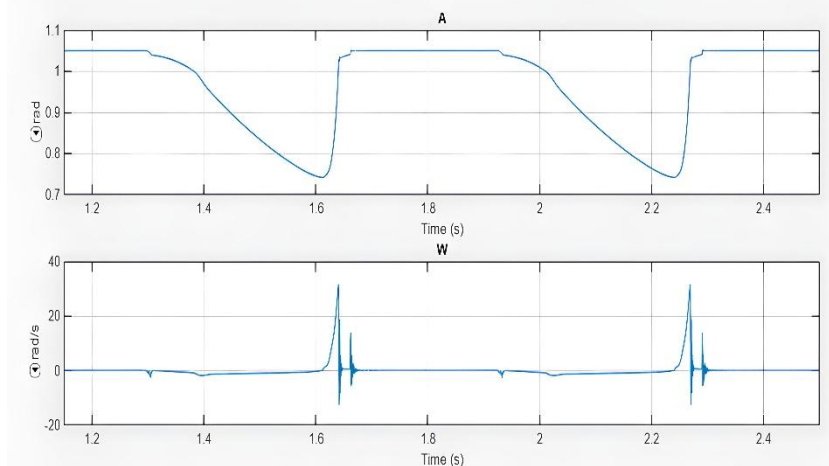


Рис. 4. Характеристика зміни кінематичних параметрів запірнього елемента (дискової заслінки) в структурі ЗРП

Відхилення між фактичним і заданим значеннями використовується для корекції сигналу керування електромагнітним клапаном. Це дає змогу підтримувати необхідний рівень тиску та витрати в системі. Модель враховує динамічні характеристики системи, такі як інерційність виконавчих механізмів та затримки в передачі сигналів, забезпечуючи високу точність регулювання завдяки використанню зворотного зв'язку. Модель дає змогу змінювати параметри системи та реалізовувати різні закони регулювання. Для підвищення точності дозування в моделі вра-

ховані статичні та динамічні характеристики системи. Розроблені схеми й алгоритми сприяють реалізації різних законів зміни тиску в системі, що забезпечує можливість регулювання потоку продукту в межах зміни кута від 0 до 1,57 радіана. На рис. 4 наведено один із можливих етапів зміни кута повороту диска ЗРП від 42 град до 60 град, із зміною значення кутової швидкості від 59 рад/с на етапі запуску (розгону), до 29 рад/с під час усталеного режиму роботи ЗРП.

Під час моделювання роботи сідельного клапана (рис. 5) отримані характеристики показали хід штока P , зв'язаного із запірним елементом (сідлом), а також характеристику зміни швидкості V перемикання сідла в умовах зовнішнього навантаження опорної поверхні.

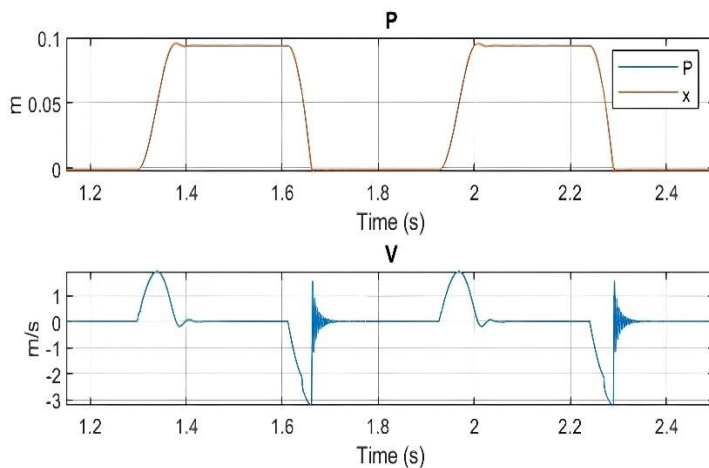


Рис. 5. Характеристика зміни тиску P у перехідній частині сідельного клапана та зміни швидкості V перемикання запірного елемента (поршня) в структурі ЗРП

Розроблена (рис. 3) в Simulink модель дає змогу проводити віртуальні експерименти, оптимізувати параметри системи (рис. 4, 5) та сформувати нові алгоритми керування без необхідності проведення дорогих і тривалих фізичних експериментів. Розроблена модель може бути використана для проектування та оптимізації систем пневмотранспорту, розробки систем автоматичного керування технологічними процесами, навчання студентів та інженерів. Модель запірно-регулювального пристрою дискової поворотної заслінки, реалізована в Simulink, є ефективним інструментом для дослідження та розробки систем автоматичного керування пневматичними приводами. Завдяки своїй гнучкості та точності вона може бути використана для вирішення широкого кола завдань у різних галузях промисловості. Можливі напрямки подальших досліджень: розширення функціональності моделі, додавання нових датчиків, виконавчих механізмів та алгоритмів керування; аналіз стійкості системи, дослідження впливу різних факторів на стійкість роботи системи; оптимізація параметрів системи, підбір оптимальних значень параметрів для досягнення максимальної точності й швидкодії. Ця модель є важливим кроком у розвитку технологій автоматизації та підвищення ефективності виробничих процесів.

Висновки

1. Розроблено чисельну експериментальну модель ЗРП із позиційним приводом у запірно-регулювальних системах продуктопроводу для дослідження режимів керування в структурі ПП Simulink для дослідження фізико-механічних характеристик запірного елемента в структурі продуктопроводу.

2. За допомогою програми бібліотеки операторів Simscape описано модель з урахуванням нелінійності процесу керування ЗРП під впливом зовнішніх збурень на кінематику і динаміку запірних елементів.

3. Опрацьовано математичну модель, яка описує динаміку процесу регулювання запірною арматурою (диск, поршень) у трубопроводах для транспортування рідких харчових продуктів. Модель у структурі Simscape базується на системі диференціальних рівнянь, що враховують комплексні гідродинамічні процеси, взаємодію запірних елементів з рідиною та вплив зовнішніх збурень. Особливу увагу приділено моделюванню поведінки пропорційних елементів приводу, що забезпечують точне налаштування системи. Встановлено оптимальні параметри системи, які гарантують ефективне керування процесом транспортування та відповідають вимогам технічного регламенту.

4. Аналіз результатів моделювання довів високу ефективність запропонованого підходу до чисельного моделювання роботи запірно-регулювальних систем у харчовій промисловості. Порівняльний аналіз різних типів розподільників показав перевагу пропорційних розподільників і плавних сигналів керування, які забезпечують найвищу якість регулювання. Запропонований метод синтезу систем автоматичного керування запірно-регулювальними пристроями передбачає використання адаптивних алгоритмів, дає змогу забезпечити стійку роботу системи в умовах змінних зовнішніх впливів та підвищити загальну ефективність виробництва.

Література

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

Amirante, R., Del Vescovo, G., & Lippolis, A. (2006). Flow forces analysis of an open center hydraulic directional control valve sliding spool. *Energy Conversion and Management*, 47(1), 114—131. doi: 10.1016/j.enconman.2005.03.010 1.

Amirante, R., & Tamburrano, P. (2014). Experimental and numerical analysis of cavitation in hydraulic proportional directional valves. *Energy Conversion 1 and Management*, 87, 208—219. doi: 10.1016/j.enconman.2014.07.031.

Amirante, R., & Catalano, L. A. (2007). Evaluation of the flow forces on a direct (single stage) proportional valve by means of a computational fluid dynamic 1 analysis. *Energy Conversion and Management*, 48(3), 942—953. doi: 10.1016/j.enconman.2006.08.024.

Ahadani, M. A., De Silva, L. C. (2012). Low Cost Robotic Medicine Dispenser. *Procedia Engineering*, 41, 202—209. doi: 10.1016/j.proeng.2012.07.163 1.

Bram, M. V., & Yang, Z. (2020). Analysis and Modeling of State-Dependent Delay in Control Valves. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), 5777—5782. doi: 10.1016/j.ifacol.2020.12.1613.

Carneiro, J. F., & Almeida, F. G. (2012). A macromicro motion servopneumatic device. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 226(6). doi: 10.1177/0959651812439261.

- Choudhury, M., & Shah, S. (2005). Modelling valve stiction. *Control Engineering Practice*, 13(5), 641—658. doi: 10.1016/j.conengprac.2004.05.005.
- Mark, J., & Kenneth, W. (2008). Predicting the mode of flow in pneumatic conveying systems. A review. *Particuology*, 6. doi:10.1016/j.partic.2008.05.003.
- Ismail, N. I., Kuang, S., Yu, A. (2021). CFD-DEM study of particle-fluid flow and retention performance of sand screen. *Powder Technology*, 378, A, 410—420. doi:10.1016/j.powtec.2020.10.012.
- He, Z., Li, T., Huang, Z., Kuang, S., Yu, A. (2018). Investigation on vertical plug formation of coarse particles in a non-mechanical feeder by CFD-DEM coupling method. *Powder Technology*, 332, 79—89. doi:10.1016/j.powtec.2018.03.055.
- Peng, Z., Doroodchi, E. (2020). Heat transfer modelling in Discrete Element Method (DEM)-based simulations of thermal processes: Theory and model development 1. *Progress in Energy and Combustion Science*, 79, 100. doi:10.1016/j.pecs.2020.100847.1.
- Ji, Y., Hao, Y. (2022). Particle flow regime in a swirling pneumatic conveying system. *Powder Technology*, 401, 117. doi: 10.1016/j.powtec.2022.117328.
- Pan, T., & Liu, P. (2021). Multi-scale analysis on particle dynamic of vertical curved 90° bend in a horizontal-vertical pneumatic conveying system. *Advanced Powder Technology*, 32(8), 313—314. doi: 10.1016/j.appt.2021.07.002.
- Rallabandi, I. R., & Apparao, D. (2023). Development of a color-code sorting machine operating with a pneumatic and programmable logic control. *Materials Today: Proceedings*. doi: 10.1016/j.matpr.2023.05.150.
- Liu, F., & Shao, M. (2023). Transient flow analysis on opening process of pneumatic gas proportional valve with two-solenoid valve. *Flow Measurement and Instrumentation*, 89, 282—291. doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2022.102291.
- Saha, B. K., & Gangopadhyay, T. (2014). Dynamic simulation of a pressure regulating and shut-off valve. *Computers & Fluids*, 101, 233—240. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2014.06.011>.
- Yan, F., Cheng, S. (2024) Particle motion characteristics on the rotational flow pneumatic conveying of horizontal-vertical pipeline. *Chemical Engineering Research and Design*, 210, 452—468.
- Yang, Q., & Hu, J. (2011). Numerical Simulation of Fluid Flow inside the Valve. *Procedia Engineering*, 23, 543—550. doi: 10.1016/j.proeng.2011.11.2545.
- Željko, B. Grbavčić, Radmila, V. (2006) Arsenijević, Prediction of the choking velocity and voidage in vertical pneumatic conveying of coarse particles, *Powder Technology*, 161(1), 1—9. doi: 10.1016/j.powtec.2005.08.013.

OPTIMAL PARAMETERS SIMULATION OF THE HORIZONTAL CENTRIFUGE FOR RECEIVING TYPE «A» STARCH

T. Pohorilyi

National University of Food Technologies

Key words:

*Regression equation
Centrifuge loading
capacity
Centrifuge drum rotation
speed
Differential screw
rotation speed*

Article history:

Received 20.01.2025
Received in revised form
03.02.2025
Accepted 17.02.2025

Corresponding author:

T. Pohorilyi
E-mail:
pogorilyy_tm@ukr.net

Citation: Погорілий Т. М. (2025). Моделювання оптимальних параметрів роботи горизонтальної центрифуги для отримання крохмалю типу «А». *Наукові праці НУХТ*, 31(1), 131—144.
DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-1-12

ABSTRACT

The previously created mathematical model of the finished product (starch type «A») percentage value regression function from three factors: loading horizontal centrifuge capacity, the centrifuge drum rotation speed and the differential screw rotation speed was used as the basis. Two options for representing the regression function were considered: a classical representation taking into account only the significant regression equation coefficients and a regression equation in which all the found coefficients were left. In each case, the horizontal centrifuge optimal operating parameters for obtaining type «A» starch were simulated.

For both cases of the regression curve (with and without taking into account the Student criterion), the centrifuge operating mode existence has been mathematically proven in which the output finished product (type «A» starch) function does not depend at all on the factor z_2 influence (the centrifuge drum rotation speed which operates in the range from 2925 rpm to 3150 rpm). In order to reduce energy consumption in this centrifuge operation mode, it is advisable to use it at the minimum drum speed.

For the case of obtaining a regression equation taking into account the Student criterion, the maximum output of the finished product (starch type «A») for this centrifuge operating mode is 75.551% and is achieved at the centrifuge loading capacity $x_{1,opt} = 20000$ kg/h and the differential screw rotation speed $x_{3,opt} = 59.75$ rpm.

For the case of obtaining a regression equation using all the found regression equation coefficients (without taking into account the Student criterion), the maximum output of the finished product (starch type «A») for this centrifuge operating mode is 70,215% and is achieved at the centrifuge loading capacity $x_{1,opt} = 17131$ kg/h and the differential screw rotation speed $x_{3,opt} = 60$ rpm.

МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ ЦЕНТРИФУГИ ДЛЯ ОТРИМАННЯ КРОХМАЛЮ ТИПУ «А»

Т. М. Погорілий

Національний університет харчових технологій

За основу взято створену раніше математичну модель регресійної функції відсоткового значення готового продукту (крохмалю типу «А») від трьох факторів: продуктивності завантаження горизонтальної центрифуги, швидкості обертання барабана центрифуги та диференційної швидкості обертання шнека. Розглянуто два варіанта представлення регресійної функції: класичне представлення з урахуванням лише значущих коефіцієнтів рівняння регресії та регресійне рівняння, в якому залишили всі знайдені коефіцієнти. По кожному випадку проведено моделювання оптимальних параметрів роботи горизонтальної центрифуги для отримання крохмалю типу «А».

Для обох випадків регресійної кривої (з та без урахування критерію Стюдента) математично доведено існування режиму роботи центрифуги, при якому функція виходу готового продукту (крохмалю типу «А») взагалі не залежить від впливу фактора z_2 (швидкості обертання барабана центрифуги, яка працює в межах від 2925 об/хв до 3150 об/хв). З метою зменшення енерговитрат за такого режиму роботи центрифуги її доцільно використовувати при мінімальній швидкості обертання барабана.

Для випадку отримання регресійного рівняння з урахуванням критерію Стюдента максимальна величина виходу готового продукту (крохмалю типу «А») для такого режиму роботи центрифуги становить 75,551% і досягається при продуктивності завантаження центрифуги $x_{1,onn} = 20000$ кг/год та диференційній швидкості обертання шнека $x_{3,onn} = 59,75$ об/хв.

Для випадку отримання регресійного рівняння при використанні всіх знайдених коефіцієнтів рівняння регресії (без урахуванням критерію Стюдента) максимальна величина виходу готового продукту для такого режиму роботи центрифуги становить 70,215% і досягається при завантаженні центрифуги $x_{1,onn} = 17131$ кг/год та диференційній швидкості обертання шнека $x_{3,onn} = 60$ об/хв.

Ключові слова: регресійне рівняння, продуктивність завантаження центрифуги, швидкість обертання барабана центрифуги, диференційна швидкість обертання шнека.

Постановка проблеми. Глибока переробка пшениці надає можливість отримати декілька типів кінцевих продуктів, які в подальшому можуть використовуватися як високоякісна сировина при виробництві харчових чи інших продуктів.

Хоча Україна і посідає досить вагоме місце у світі серед експортерів пшениці, варто розглядати питання глибокої переробки пшениці в самій державі. Слід зазначити, що використання готового закордонного обладнання надає можливість вирішити цю проблему. Залишається лише питання режимів роботи такого обладнання при використанні місцевих сортів пшениці для зменшення енерговитрат та

покращення якості цільового продукту. Визначенню раціональних режимів роботи горизонтальної центрифуги на основі моделювання експериментальних даних про вплив факторів на процес осадження крохмалю типу «А» і присвячене пропоноване дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання ефективного розвитку зернової галузі досліджували зарубіжні та українські науковці. Так, роль України на світовому ринку зерна, сучасні виклики і загрози вивчалася у (Лотиш, 2022). Незважаючи на повномасштабне військове вторгнення, Україна посідає досить вагоме місце у світі серед експортерів пшениці (Муха, & Воробйова, 2022; Обсяги експорту агропродукції зерновим коридором. Українська зернова асоціація; Тулайнова, 2024). За даними Міністерства сільського господарства США (USDA) у 2022—2023 рр. Україна посіла шосте місце (15,0 млн тонн) в рейтингу ТОП-10 країн-експортерів пшениці (Кернел та Louis Dreyfus очолили рейтинг експортерів зерна з України у 2022/23 МР, 2023; World Food Situation, 2025). Однак глибока переробка пшениці в самій державі могла б створити сировину, а згодом і товари зі значно більш високою доданою вартістю, що є одним з найважливіших показників зростання економіки країни (Закупівельні ціни на зерно в Україні, 2025). Глибока переробка пшениці дає декілька типів кінцевих продуктів, які в подальшому можуть використовуватися як високоякісна сировина при виробництві харчових чи інших продуктів (Lim та ін., 2015).

Одним із методів розділення твердої та рідкої фази є центрифугування, розглянуте рядом зарубіжних авторів. Широкий огляд центрифугального розділення у біотехнології, включаючи методи математичного моделювання, запропоновано у (Leung, 2007; Pouliot, Conway, & Leclerc, 2014), хоча основні акценти зроблено на розділення клітинних культур і досить мало інформації про конкретні оптимальні параметри роботи центрифуг. Математичні моделі процесу сепарації досліджено та побудовано в (Akhmadiev, & Zinnatullin, 2014; Leone, Romaniello, Zagaria, & Tamborrino, 2015; Gleiß, & Nirschl, 2023; Shin, & Cho, 2013). Взаємозв'язок між швидкістю обертання і виходом продукту розглянуто у (Saengchan, Nopharatana, & Songkasiri, 2014), хоча автори вивчають тільки один вид крохмалю. Метод RSM для знаходження оптимальних параметрів описано у (Yuting та ін., 2018). Процес вилучення крохмалю з відходів описано у (Prabha, Dash, Rayaguru, Panda, & Neddunchezhiyan, 2020), проте автори не провели глибокий математичний аналіз.

Питання режимів роботи обладнання при використанні місцевих сортів пшениці для зменшення енерговитрат у покращення якості цільового продукту досліджувалося у (Schneider, & Kröner, 2010).

Мета статті: теоретичне дослідження з використанням математичного моделювання впливу трьох різних факторів: 1) кількості вхідної сировини (продуктивності завантаження горизонтальної центрифуги), 2) швидкості обертання барабана центрифуги та 3) диференційної швидкості шнека на величину вмісту крохмалю та визначення оптимальних параметрів для отримання максимального його вмісту у відсотковому значенні в перерахунку на сухі речовини при мінімальних енергозатратах.

Матеріали і методи. На основі створеної математичної моделі процесу осадження крохмалю типу «А» (Рожко, & Погорілий, 2024), записаного в нормалізованому вигляді, проведено дослідження (Остапчук, & Станкевич, 2006) впливу

різних факторів з метою виявлення режимів (Пушанко, & Лагода, 2010), які дають змогу оптимізувати процес (Пальчевський, 2001).

Дослідження проводились в два етапи. Спочатку досліджували рівняння регресії, отримане класичними методами (Томашевський, 2005; Гліненко, & Сухонос, 2003). На другому етапі досліджували повне рівняння регресії.

Викладення основних результатів дослідження. Нормалізоване рівняння регресії, яке представлено у вигляді рівняння регресії трифакторного експерименту

$$\hat{y}(z_1; z_2; z_3) = 75,204 + 5,513 \cdot z_1 + 3,238 \cdot z_2 - 5,271 \cdot z_3 - 3,304 \cdot z_2 \cdot z_3, \quad (1)$$

залежить від трьох нормалізованих факторів: продуктивності завантаження центрифуги (z_1), швидкості обертання барабана (z_2) та диференційної швидкості шнека (z_3).

Зауважимо, що нормалізоване рівняння (1) було знайдено з використанням класичних методів регресійного аналізу (Томашевський, 2005; Гліненко, & Сухонос, 2003), коефіцієнти рівняння (1) перевірялись на значущість згідно з критерієм Стюдента. Тож у рівнянні (1) присутні лише значущі коефіцієнти. З наукової та практичної точок зору представляє певну цінність питання про характер поведінки регресійної кривої (1) за умов, якщо в ньому задіяти повний набір коефіцієнтів рівняння регресії, тобто навіть ті, які вважаються незначущими з точки зору критерію Стюдента: на яку величину розрахунковий вихід готового продукту буде відрізнятися від виходу, отриманого на основі рівняння (1), знайденого класичними методами; як урахування повного набору коефіцієнтів рівняння регресії вплине на характер поведінки функції виходу готового продукту і на результати проведення оптимізації цього процесу.

Застосовано методику, аналогічну для пошуку кореня трансцендентного рівняння, тобто графо-аналітичний метод, який передбачає два основних кроки: 1) на першому етапі будується графік досліджуваної функції та проводиться локалізація шуканого кореня; 2) на другому етапі проводиться безпосередньо пошук шуканого кореня в знайденому околі локалізації всіма можливими засобами (аналітичними, чисельними тощо).

Для початку розглядається графічний метод визначення характеру поведінки графіка нормалізованого регресійного рівняння (1). Оскільки побудувати чотиривимірний графік неможливо, то було використано таку методику: по черзі було зафіксовано кожний окремий нормалізований фактор на його мінімальному та на максимальному значенні. Зауважимо, що в нормалізованому рівнянні (1) кожна змінна z_i , ($i = 1..3$), що відповідає певному фактору, змінюється лише в межах — $1 \leq z_i \leq 1$, ($i = 1..3$). Далі проводилась одночасна побудова двох графіків $\hat{y}(z_1; z_2; z_3)$ залежності відсоткового значення готового продукту (крохмалю типу «А») у важкій фракції розділення залежно від тих двох факторів, які залишались змінними, тобто нефіксованими.

При фіксації у рівнянні (1) першого нормалізованого фактора z_1 , який відповідає продуктивності завантаження центрифуги, при її мінімальному $z_{1,min} = -1$ та при максимальному $z_{1,max} = 1$ її значенні для функції $\hat{y}(z_1, z_2, z_3)$ залежності вмісту готового продукту отримано результат, представлений на рис. 1. Чисельні обчислення та побудову графіків проводили в системі Mathcad.

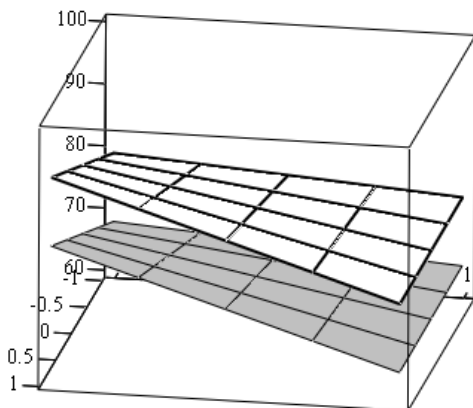


Рис. 1. Графіки залежності вмісту готового продукту (А-крохмалю): $\hat{y}|_{z_1=-1}(z_1; z_2; z_3)$ — (сірий колір), відповідно при мінімальному $z_{1,min} = -1$ та $\hat{y}|_{z_1=1}(z_1; z_2; z_3)$ — (білий колір), при максимальному $z_{1,max} = 1$ значенні нормалізованого 1-го фактора z_1 продуктивності завантаження центрифуги

Як видно з рис. 1, графік $\hat{y}|_{z_1=-1}(z_1; z_2; z_3)$ залежності вмісту готового продукту при мінімальному значенні нормалізованого 1-го фактора z_1 представлений у вигляді поверхні (сірий колір) нелінійного характеру. Аналогічно нелінійною поверхнею (рис. 1, білий колір) представлений і графік $\hat{y}|_{z_1=1}(z_1; z_2; z_3)$ залежності вмісту готового продукту при максимальному значенні нормалізованого 1-го фактора z_1 . Зауважимо, що ці два графіки (рис. 1) жодним чином не перетинаються в замкненій області визначення $\bar{D}_1 = \{(z_2; z_3) \in [-1; 1] \times [-1; 1]\}$ побудови.

При фіксації в рівнянні (1) другого фактора z_2 , що відповідає за швидкість обертання барабана центрифуги, при її мінімальному значенні $z_{2,min} = -1$ та при максимальному значенні $z_{2,max} = 1$ для функції $\hat{y}(z_1, z_2, z_3)$ залежності вмісту готового продукту отримано результат, представлений на рис. 2.

Як видно з рис. 2, графік $\hat{y}|_{z_2=-1}(z_1; z_2; z_3)$ залежності вмісту готового продукту при мінімальному значенні нормалізованого 2-го фактора на відміну від рис. 1, представлений у вигляді лінійної поверхні (площина сірого кольору). Такий самий характер і у поверхні $\hat{y}|_{z_2=1}(z_1; z_2; z_3)$ (рис. 2, білий колір) залежності вмісту готового продукту при максимальному значенні нормалізованого 2-го фактора z_2 . Наведені графіки перетинаються (рис. 2) в замкненій області визначення $\bar{D}_2 = \{(z_1; z_3) \in [-1; 1] \times [-1; 1]\}$

Зважаючи на це, можна зробити досить неочікуваний висновок, що саме по лінії перетину двох графіків $\hat{y}|_{z_2=-1}(z_1; z_2; z_3)$ та $\hat{y}|_{z_2=1}(z_1; z_2; z_3)$ (рис. 2) функція

$\hat{y}(z_1, z_2, z_3)$ вмісту готового продукту з рівняння (1) взагалі не залежить від другого нормалізованого фактора z_2 , який відповідає за величину швидкості обертання барабана центрифуги.

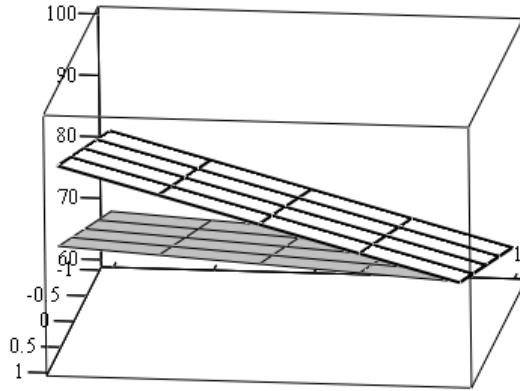


Рис. 2. Графіки залежності вмісту готового продукту (А-крохмалю):

$\hat{y}|_{z_2=-1}(z_1; z_2; z_3)$ — (сірий колір), відповідно при мінімальному $z_{2,min} = -1$ та

$\hat{y}|_{z_2=1}(z_1; z_2; z_3)$ — (білий колір), при максимальному $z_{2,max} = 1$ значенні нормалізованого 2-го фактора z_2 швидкості обертання барабана центрифуги

Зауважимо, що така думка потребує подальшого практичного підтвердження. Лінію перетину двох графіків $\hat{y}|_{z_2=-1}(z_1; z_2; z_3)$ та $\hat{y}|_{z_2=1}(z_1; z_2; z_3)$ на рис. 2 дослідили окремо. Для цього в рівняння (1) підставили окремо значення $z_{2,min} = -1$ та значення $z_{2,max} = 1$. Після перетворень отримали таку систему двох рівнянь (2):

$$\begin{cases} \hat{y}|_{z_2=-1}(z_1; z_2; z_3) = \hat{y}(z_1; -1; z_3) = 5,513 \cdot z_1 - 1,967 \cdot z_3 + 71,966; \\ \hat{y}|_{z_2=1}(z_1; z_2; z_3) = \hat{y}(z_1; 1; z_3) = 5,513 \cdot z_1 - 8,575 \cdot z_3 + 78,442. \end{cases} \quad (2)$$

Як видно із системи (2), функція $\hat{y}(z_1, -1, z_3)$ вмісту готового продукту при мінімальному значенні нормалізованого 2-го фактора $z_{2,min} = -1$, що відповідає першому рівнянню системи (2), є лінійною функцією і визначає площину (рис. 2, сірий колір) в просторі побудови графіка. Аналогічно, при максимальному значенні нормалізованого 2-го фактора $z_{2,max} = 1$, що відповідає другому рівнянню системи (2), функція $\hat{y}(z_1, 1, z_3)$ вмісту готового продукту також є лінійною функцією і також визначає площину в просторі (рис. 2, білий колір). Прирівнюючи дві функції між собою, в системі (2) визначили, при яких значеннях нормалізованих факторів графіки збігаються, тобто функція вмісту готового продукту (1) взагалі не залежить від другого нормалізованого фактора z_2 :

$$z_{3,onn} = \frac{1619}{1652} \approx 0,98. \quad (3)$$

Дійсно, якщо підставити у функцію $\hat{y}(z_1, z_2, z_3)$ рівняння (1) величину $z_{3,onn} = \frac{1619}{1652} \approx 0,98$, отримаємо:

$$\hat{y}_{onn}(z_1; z_2; \frac{1619}{1652}) = 70,0383 + 5,513 \cdot z_1 \quad (4)$$

Отже, дійсно функція $\hat{y}_{onn}(z_1; z_2; 0,98)$ вмісту готового продукту (4) взагалі не залежить від другого фактора z_2 . Тобто не залежить від швидкості обертання барабана центрифуги. Максимальний вихід готового продукту, як видно з лінійного рівняння (4), досягається при максимальному значенні нормалізованого фактора z_1 , тобто, $z_{1,onn} = 1$, і становить:

$$\hat{y}_{onn,max} = \hat{y}_{onn}|_{z_{1,onn}=1; z_{3,onn}=0,98} = \hat{y}_{onn}(1; z_2; 0,98) = 75,551, \quad (5)$$

для довільного z_2 в межах його визначення: $-1 \leq z_2 \leq 1$. Тобто при довільній швидкості обертання барабана центрифуги в межах від 2925 об/хв до 3150 об/хв. Зауважимо, що нормалізований змінний $z_{1,onn} = 1$ відповідає продуктивності завантаження центрифуги $x_{1,onn} = 20000$ кг/год, а нормалізований змінний $z_{3,onn} = 0,98$ відповідає диференційна швидкість обертання шнека $x_{3,onn} = 59,75$ об/хв.

Нарешті, при фіксації в рівнянні (1) третього нормалізованого фактора z_3 , який відповідає за диференційну швидкість шнека центрифуги, при мінімальному значенні $z_{3,min} = -1$ та максимальному значенні $z_{3,max} = 1$, для функції $\hat{y}(z_1, z_2, z_3)$ залежності вмісту готового продукту отримано результат, представлений на рис. 3.

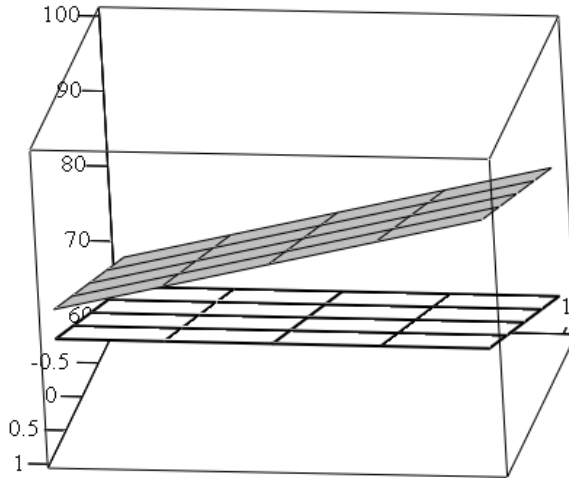


Рис. 3. Графіки залежності вмісту готового продукту (А-крохмалю):

$\hat{y}|_{z_3=-1}(z_1; z_2; z_3)$ — (сірий), відповідно при мінімальному $z_{3,min} = -1$ та

$\hat{y}|_{z_3=1}(z_1; z_2; z_3)$ — (білий), при максимальному $z_{3,max} = 1$ значенні

нормалізованого 3-го фактора z_3 диференційної швидкості шнека центрифуги

Як видно з рис. 3, графік $\hat{y}|_{z_3=-1}(z_1; z_2; z_3)$ залежності вмісту готового продукту при мінімальному значенні нормалізованого 3-го фактора z_3 представлений у вигляді поверхні (сірий колір) нелінійного характеру. Аналогічно нелінійною поверхнею (рис. 3, білий колір) представлений графік $\hat{y}|_{z_3=1}(z_1; z_2; z_3)$ залежності вмісту готового продукту при максимальному значенні нормалізованого 3-го фактора z_3 . Зауважимо, що ці два графіка, як і у випадку рис. 1, також не мають спільних точок перетину в замкненій області визначення $\bar{D}_3 = \{(z_1; z_2) \in [-1; 1] \times [-1; 1]\}$. Однак зауважимо, що розташовані вони з точністю до навпаки один до одного. Це свідчить про те, що диференціальна швидкість зі збільшенням абсолютної величини призводить до зменшення кількості виходу готового продукту.

Неочікуваний результат, приведений для випадку, зображеному на графіку (рис. 2), коли функція $\hat{y}(z_1, z_2, z_3)$ з рівняння (1) залежності вмісту готового продукту при певних умовах взагалі не залежить від швидкості обертання барабана центрифуги, що спонукає до подальших досліджень. Тому було розглянуто рівняння регресії залежності вмісту готового продукту (А-крохмалу) повного трифакторного експерименту, створеного на основі математичної моделі процесу осадження крохмалу типу «А» (Рожко, & Погорілий, 2024), записаного в нормалізованому вигляді, але вже з урахуванням всіх коефіцієнтів рівняння регресії:

$$\hat{y}_f(z_1, z_2, z_3) = 75,204 + 5,513 \cdot z_1 + 3,238 \cdot z_2 - 5,271 \cdot z_3 - 3,304 \cdot z_2 \cdot z_3 + 1,013 \cdot z_1 \cdot z_2 + 0,971 \cdot z_1 \cdot z_3 + 0,504 \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot z_3. \quad (6)$$

Проведемо аналогічні дослідження функції $\hat{y}_f(z_1, z_2, z_3)$ рівняння регресії (6) залежності вмісту готового продукту (А-крохмалу) та дослідимо її на оптимальність.

При фіксації в рівнянні (6) першого нормалізованого фактора z_1 , що відповідає за продуктивність завантаження центрифуги, при її мінімальному $z_{1,min} = -1$ та максимальному $z_{1,max} = 1$ її значенні, для функції $\hat{y}_f(z_1, z_2, z_3)$ залежності вмісту готового продукту отримано результат, представлений на рис. 4.

Як видно з рис. 4, графік $\hat{y}_f|_{z_1=-1}(z_1, z_2, z_3)$ залежності вмісту готового продукту при мінімальному значенні нормалізованого 1-го фактора z_1 представлений у вигляді поверхні (сірий колір) ще більш нелінійного характеру, ніж у випадку, представленою на рис. 1, який був побудований для класичного рівняння регресії $\hat{y}(z_1, z_2, z_3)$ з рівняння (1).

Аналогічний характер поведінки у поверхні (рис. 4, білий колір) графіка $\hat{y}_f|_{z_1=1}(z_1, z_2, z_3)$ залежності вмісту готового продукту при максимальному зна-

ченні нормалізованого 1-го фактора z_1 . Зауважимо, що ці два графіка (рис. 4), аналогічно до рис. 1, жодним чином не перетинаються в замкненій області визначення $\bar{D}_1 = \{(z_2; z_3) \in [-1; 1] \times [-1; 1]\}$.

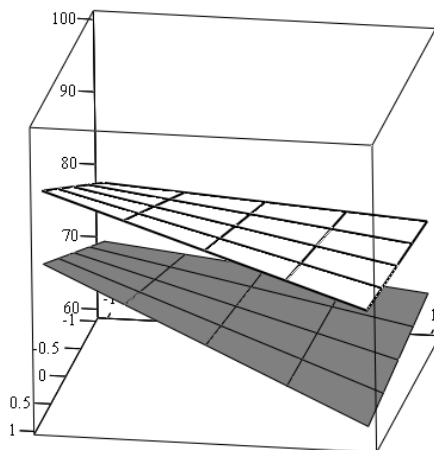


Рис. 4. Графіки залежності вмісту готового продукту (А-крохмалю):

$\hat{y}_f \Big|_{z_1=-1} (z_1, z_2, z_3)$ — (сірий), відповідно при мінімальному $z_{1,min} = -1$ та
 $\hat{y}_f \Big|_{z_1=1} (z_1, z_2, z_3)$ — (білий) при максимальному $z_{1,max} = 1$ значенні нормалізованого
 1-го фактора z_1 продуктивності завантаження центрифуги

При фіксації в рівнянні (6) другого фактора z_2 , що відповідає за швидкість обертання барабана центрифуги, при її мінімальному значенні $z_{2,min} = -1$ та максимальному значенні $z_{2,max} = 1$, для функції $\hat{y}_f(z_1, z_2, z_3)$ залежності вмісту готового продукту отримано результат, представлений на рис. 5.

Як видно з рис. 5, графік $\hat{y}_f \Big|_{z_2=-1} (z_1, z_2, z_3)$ (поверхня сірого кольору) залежності вмісту готового продукту, побудований при мінімальному значенні нормалізованого 2-го фактора z_2 , та графік $\hat{y}_f \Big|_{z_2=1} (z_1, z_2, z_3)$ (поверхня білого кольору),

побудований при максимальному значенні нормалізованого 2-го фактора z_2 , представлені вже не як лінійні залежності, площини (рис. 2), а як поверхні більш високого порядку. Між цими поверхнями відбувається перетин по кривій просторовій лінії. Зважаючи на викладене вище, можна зробити висновок, що при певних значеннях факторів $z_{1,onn}$ та $z_{3,onn}$ функція $\hat{y}_f(z_1, z_2, z_3)$ вмісту готового продукту

з рівняння (6), аналогічно для розглянутого вище випадку для класичного рівняння регресії (1), також взагалі не залежить від другого нормалізованого фактора z_2 , який відповідає за величину швидкості обертання барабана центрифуги.

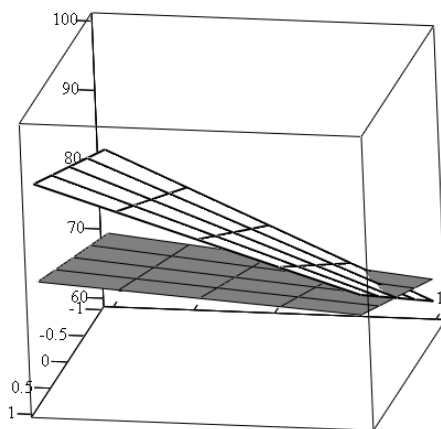


Рис. 5. Графіки залежності вмісту готового продукту (А-крохмалю):

$\hat{y}_f \Big|_{z_2=-1} (z_1, z_2, z_3)$ — (сірий), відповідно при мінімальному $z_{2,min} = -1$ та
 $\hat{y}_f \Big|_{z_2=1} (z_1, z_2, z_3)$ — (білий), при максимальному $z_{2,max} = 1$ значенні

нормалізованого 2-го фактора z_2 швидкості обертання барабана центрифуги

Проведені за аналогічною, описаною вище, методикою дослідження показали, що оптимального значення функція $\hat{y}_f(z_1, z_2, z_3)$ вмісту готового продукту досягає в точці

$$z_{1,f,onn} = 0,044; \quad z_{3,f,onn} = 1, \quad (7)$$

тобто при максимальній диференційній швидкості шнека та продуктивності завантаження 17131 кг/год і дорівнює:

$$\hat{y}_{f,onn,max} = \hat{y}_{f,onn} \Big|_{z_{1,f,onn}=0,044; z_{3,f,onn}=1} = \hat{y}_{f,onn}(0,044; z_2; 1) = 70,215. \quad (8)$$

З'ясовано, функція $\hat{y}_{f,onn}(0,044; z_2; 1)$ вмісту готового продукту (8) взагалі не залежить від другого фактора z_2 в межах його визначення: $-1 \leq z_2 \leq 1$, тобто не залежить від швидкості обертання барабана центрифуги. Отже, для режиму довільної швидкості обертання барабана центрифуги в межах від 2925 об/хв до 3150 об/хв максимальний вихід готового продукту, як видно з рівняння (8), досягається при значенні нормалізованого значенні фактора $z_{1,onn} = 0,044$, що відповідає продуктивності завантаження центрифуги $x_{1,onn} = 17131$ кг/год, та при максимальному значенні нормалізованої змінної $z_{3,onn} = 1$, якій відповідає диференційна швидкість обертання шнека $x_{3,onn} = 60$ об/хв.

Нарешті, при фіксації рівнянні (6) третього фактора z_3 , який відповідає за диференційну швидкість шнека центрифуги, при мінімальному її значенні $z_{3,min} = -1$ та максимальному значенні $z_{3,max} = 1$, для функції $\hat{y}_f(z_1, z_2, z_3)$ залежності вмісту готового продукту отримано результат, представлений на рис. 6.

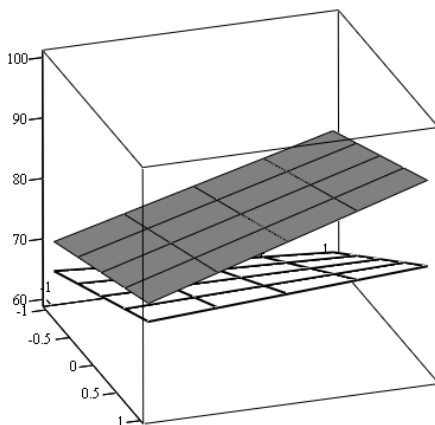


Рис. 6. Графіки залежності вмісту готового продукту (А-крохмалю):

$$\hat{y}_f \Big|_{z_3=-1} (z_1, z_2, z_3) \text{ — (сірий), відповідно при мінімальному } z_{3,min} = -1 \text{ та}$$

$$\hat{y}_f \Big|_{z_3=1} (z_1, z_2, z_3) \text{ — (білий), при максимальному } z_{3,max} = 1 \text{ значенні}$$

нормалізованого 3-го фактора z_3 диференційної швидкості шнека центрифуги

Як видно з рис. 6, графік $\hat{y}_f \Big|_{z_3=-1} (z_1, z_2, z_3)$ залежності вмісту готового про-

дукту при мінімальному значенні нормалізованого 3-го фактора z_3 представлений у вигляді поверхні (сірий колір) нелінійного характеру. Аналогічно нелінійною поверхнею (рис. 6, білий колір) представлений графік $\hat{y}_f \Big|_{z_3=1} (z_1, z_2, z_3)$ залежно-

сті вмісту готового продукту при максимальному значенні нормалізованого 3-го фактора z_3 . Зауважимо, що ці два графіки (рис. 6), як і у випадку на рис. 4, також не мають спільних точок перетину в замкненій області визначення $\bar{D}_3 = \{(z_1; z_2) \in [-1; 1] \times [-1; 1]\}$. Однак зауважимо, що розташовані вони з точністю до навпаки один до одного, як і у випадку на рис. 3. Отже, і в цьому випадку диференційна швидкість із збільшенням абсолютної величини призводить до зменшення кількості виходу готового продукту.

Проведено дослідження рівняння регресії (1) залежності функції $\hat{y}(z_1, z_2, z_3)$ відсоткового значення готового продукту (крохмалю типу «А») у важкій фракції

розділення в залежності від трьох факторів: z_1 — кількості вхідної сировини (продуктивності завантаження горизонтальної центрифуги), z_2 — швидкості обертання барабана центрифуги та z_3 — диференційної швидкості шнека, створеного на основі класичного підходу регресійного аналізу. Встановлено існування режиму роботи центрифуги, при якому функція $\hat{y}(z_1, z_2, z_3)$ виходу готового продукту (крохмалю типу «А») взагалі не залежить від другого фактора z_2 , тобто від швидкості обертання барабана центрифуги, яка працює в межах від 2925 об/хв до 3150 об/хв. Отже, за таких умов можливо використовувати режим роботи центрифуги при мінімальній швидкості обертання барабана для економії енерговитрат. Максимальний вихід готового продукту (крохмалю типу «А») у відсотковому значенні для такого режиму роботи становить 75,551%, і досягається при продуктивності завантаження центрифуги $x_{1,omt} = 20000$ кг/год (максимальна завантаженість) та диференційній швидкості обертання шнека $x_{3,omt} = 59,75$ об/хв (практично максимальна величина швидкості, яка дорівнює $x_{3,max} = 60$ об/хв).

Також використано нетрадиційний підхід, коли було розглянуто повне регресійне рівняння (6) з урахуванням усіх знайдених коефіцієнтів рівняння регресії того самого процесу отримання готового продукту (крохмалю типу «А»). Також встановлено існування режиму роботи центрифуги, при якому функція $\hat{y}_f(z_1, z_2, z_3)$

виходу готового продукту (крохмалю типу «А») також не залежить від другого фактора z_2 , тобто від швидкості обертання барабана центрифуги (яка працює в межах від 2925 об/хв до 3150 об/хв). Отже, при такому режимі також можливо використовувати режим роботи центрифуги за мінімальної швидкості обертання барабана з метою економії енерговитрат. Максимальний вихід готового продукту (крохмалю типу «А») у відсотковому значенні для такого режиму роботи становить 70,215%, і досягається при продуктивності завантаження центрифуги $x_{1,omt} = 17131$ кг/год та диференційній швидкості обертання шнека $x_{3,opt} = 60$ об/хв (максимальна величина диференційної швидкості).

Абсолютна похибка між знайденими режимами роботи горизонтальної центрифуги за умови максимального виходу готового продукту становить 7,6%. Варто зазначити, що отриманий на основі теоретичних досліджень результат варто перевірити на практиці.

Висновки

Знайдено оптимальний режим роботи горизонтальної центрифуги для отримання готового продукту (крохмалю типу «А»), який взагалі не залежить від швидкості обертання барабана центрифуги. Досліджено та встановлено оптимальні показники швидкості завантаження центрифуги та диференційної швидкості обертання шнека для отримання максимальної величини виходу готового продукту (крохмалю типу «А»), що у відсотковому значенні становить 75,551% за умов класичного підходу в отриманні регресійної функції, та 70,215% при врахуванні всіх коефіцієнтів рівняння регресії (тобто без застосування критерію Стюдента для

перевірки коефіцієнтів регресії на значущість). Останній результат автори вважають більш достеменним, однак отримані результати варто в подальшому перевірити на практиці.

Література

Гліненко, Л., & Сухоносів, О. *Основи моделювання технічних систем*. (2003). Львів: Бескид Біт.

Закупівельні ціни на зерно в Україні. (2025). <https://ukragroconsult.com/grain-prices>.

Лотиш, О. Я. (2022). Роль України на світовому ринку зерна: виклики і загрози. *Економіка та суспільство*, (45). 45—56. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-45-56>; <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/1959>.

Муха М., & Воробйова І. (2022). Проблеми експорту зерна через ЄС та потужностей зберігання в Україні. <http://elevatorist.com/blog/read/761eksport-cherez-suhoputni-shlyahi-do-yes-mojlivosti>.

Остапчук, М., & Станкевич, Г. (2006). *Математичне моделювання на ЕОМ*. Одеса: «Друк».

Пальчевський, Б. (2001). *Дослідження технологічних систем (моделювання, проектування, оптимізація)*. Львів: Світ.

Пушанко, М., & Лагода, В. (2010). *Центрифугування цукрових утфелів*. Київ: Вища школа.

Рожко, Ю., & Погорілий, Т. (2024). *Аналіз ефективності осадження крохмалю пшеничного типу «А» в полі дії відцентрових сил*. Матеріали 90 Міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів "Наукові здобутки молоді — вирішенню проблем харчування людства у ХХІ столітті", 11—12 квітня 2024 р. Київ: НУХТ.

Томашевський, В. М. (2005). *Моделювання систем*. Київ: Видавнича група BVH.

Кернел та Louis Dreyfus очолили рейтинг експортерів зерна з України у 2022/23 МР (2023). <https://latifundist.com/novosti/62962-kemel-ta-louis-dreyfus-ocholili-rejting-eksporteriv-zerna-z-ukrayini-u-2022-23-mr>.

Тулаїнова, Є. (2024). В топ-5 експортерів українського зерна тільки дві вітчизняні компанії. <https://latifundist.com/novosti/65934-v-top-5-eksporteriv-ukrayinskogo-zerna-tilki-dvi-vitchiznyani-kompaniyi>.

Akhmadiev, F. G., & Zinnatullin, N. N. (2014). Mathematical modeling of the separation of two-phase mixtures in a centrifugal thickener. *Theor Found Chem Eng.*, 48, 199—205. <https://doi.org/10.1134/S004057951402002X>.

Gleiß, M., & Nirschl, H. (2023). About Modeling and Optimization of Solid Bowl Centrifuges. *KONA Powder and Particle Journal*, 41. <https://doi.org/10.14356/kona.2024010>.

Leone, A., Romaniello, R., Zagaria, R., & Tamborrino, A. (2015). Mathematical modelling of the performance parameters of a new decanter centrifuge generation. *Journal of Food Engineering*, 166. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.05.011>.

Leung, W. (2004). New decanter centrifuge technology for improved separation and high throughput, 16, 37—51.

Leung, W. (2007). Centrifugal Separations in Biotechnology. *Centrifugal Separations in Biotechnology*. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-477-0.X5000-9>.

Lim, Y.-M., Hoobin, P., Ying, D. Y., Burgar, I., Gooley, P. R., & Augustin, M. A. (2015). Physical characterisation of high amylose maize starch and acylated high amylose maize starches. *Carbohydrate Polymers*, 117. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.09.068>.

Pouliot, Y., Conway, V., & Leclerc, P.-L. (2014). Separation and Concentration Technologies in Food Processing. *Food Processing: Principles and Applications*: Second Edition, 33—60. <https://doi.org/10.1002/9781118846315.ch3>.

Prabha, V., Dash, S. K., Rayaguru, K., Panda, M., & Nedunchezhiyan, M. (2020). Optimization of starch isolation process for sweet potato and characterization of the prepared starch. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 14. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00401-8>.

Saengchan, K., Nopharatana, M., & Songkasiri, W. (2014). Recovery of tapioca starch from pulp in a conical basket centrifuge — Effects of rotational speed and liquid to solid (L/S) ratio on cake formation and starch–pulp separation efficiency, *Separation and Purification Technology*, 127, 192—201, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.02.026>.

Schneider Karl-Heinz, & Dr. Götz Kröner. (2010). Weizenqualität für technische Anwendungen aus der Sicht der Stärkeindustrie, Proceedings des 23. Getreideseminars. Detmond.

Shin, H., & Cho, S.-C. (2013). Optimization of Cationic Corn Starch Production by Using Response Surface Methodology. *Food Engineering Progress*, 17, 143—150. <https://doi.org/10.13050/foodengprog.2013.17.2.143>.

World Food Situation. (2025). <https://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/en>.

Yuting, Q., Fangling, D., Zhuqing, J., Bin, Q., Qianqian, G., Jie, L., & Tongcheng, X. (2018). Optimization of starch isolation from red sorghum using response surface methodology. *LWT*, 91, 242—248. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.01.014>.

УДК 796.035+796.412:615.874.2-055.2

THE NOVELTY OPPORTUNITIES OF HEALTHY NUTRITION IN TERMS OF NUTRIGENETICS AND NUTRIGENOMICS

G. Simakhina, N. Naumenko*National University of Food Technologies***Key words:**

*Healthy nutrition
Nutritiology
Nutrigenomics
Nutrigenetics
Personalized nutrition
genome*

Article history:

Received 09.01.2025
Received in revised form
29.01.2025
Accepted 07.02.2025

Corresponding author:

N. Naumenko

E-mail:

lyutik.0101@gmail.com

Citation: Сімахіна Г. О.,
Науменко Н. В. (2025).
Нові можливості оздоров-
чого харчування з позицій
нутригенетики та нутри-
геноміки. *Наукові праці
НУХТ*, 31(1), 145—156.
DOI: 10.24263/2225-
2924-2025-31-1-13

ABSTRACT

The nutritiological researches accomplished during the last 10—15 years have improved the positive impact of principally new generation foodstuffs (foods for well-being) on normalization all body organs and systems functioning, prevention of alimentary dependent illnesses.

Having based on these researches, the new industrial branch — healthy food industry — emerged and is currently developing, particularly in Ukraine. The uniqueness of its theoretical as well as practical dimensions is that the purpose of its activity and the main effectiveness criterion is the social effect: improvement and retention of health state in our citizens, the enhancement of their life quality.

Therefore, the food industry, including its new branch — the healthy nutrition, is changing in accordance with the updated data obtained by nutritiology and, in process, by nutrigenetics and nutrigenomics. One of the main trends to apply their knowledge and opportunities is to correct the metabolic disorders in the body, and also to prevent the numerous chronic non-infectious diseases.

Now there are continuing the theoretical and experimental studies in the field of healthy nutrition and its ability to enhance the body mechanisms to get adapted to the malignant environmental factors and thenceforth to get ready for self-regulation and self-restoration. The other trends are the identification of the essential nutrients to make the special healthy influence on the body; the search for the new natural sources, including those nontraditional, to create the healthy foodstuffs and natural food supplements containing the biologically active components capable of "turning on" or "turning off" the certain genes, dependently on the body issues.

The authors of this article displayed the fact that, taking into consideration the nutrigenomic and nutrigenetic properties of foodstuffs and natural food additives, it would be possible in the nearer future to significantly increase the effectiveness of their intake to improve the health state in people, to prolong their active life, and to strengthen the Ukrainian nation genetic fund.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-1-13

НОВІ МОЖЛИВОСТІ ОЗДОРОВЧОГО ХАРЧУВАННЯ З ПОЗИЦІЙ НУТРИГЕНЕТИКИ ТА НУТРИГЕНОМІКИ

Г. О. Сімахіна, Н. В. Науменко

Національний університет харчових технологій

Нутриціологічними дослідженнями останніх 10—15 років доведено позитивний вплив принципово нового покоління харчових продуктів — оздоровчих, на нормалізацію функціонування усіх органів і систем організму людини, запобігання виникненню та розвитку аліментарних хвороб.

На основі цих досліджень у харчовій промисловості виокремилася та інтенсивно розвивається нова галузь — індустрія оздоровчих продуктів. Її своєрідність як науки, так і практики в тому, що метою діяльності і основним критерієм ефективності є соціальний ефект: поліпшення та збереження стану здоров'я, підвищення якості життя наших громадян.

Харчова індустрія, зокрема її принципово нова галузь — оздоровче харчування, стрімко змінюється відповідно до нових наукових даних нутриціології, а останнім часом і нутригеноміки та нутригенетики. До основних напрямів використання їхніх знань і можливостей належить корегування метаболічних порушень в організмі людини, а також запобігання розвитку багатьох хронічних неінфекційних хвороб.

Тривають теоретичні й експериментальні дослідження в галузі оздоровчого харчування; його здатність підвищувати адаптаційні можливості організму до несприятливих чинників довкілля, до саморегулювання та самовідновлення; ідентифікація основних нутрієнтів, які здійснюють специфічні оздоровчі впливи на організм; пошук нових природних джерел, зокрема нетрадиційних, для виробництва оздоровчих продуктів і натуральних дієтичних добавок, що містять біокомпоненти, здатні «вмикати» та «вимикати» певні гени залежно від потреб організму.

У статті на основі літературних даних показано, що врахування нутригеномних і нутригенетичних властивостей оздоровчих продуктів і натуральних дієтичних добавок надасть можливість у недалекому майбутньому істотно підвищити ефективність їх застосування для поліпшення стану здоров'я населення, подовження тривалості активного життя громадян, зміцнення генофонду української нації.

Ключові слова: оздоровче харчування, нутриціологія, нутригеноміка, нутригенетика, персоналізоване харчування, геном.

Постановка проблеми. Сучасний рівень життя вимагає великої уваги до всіх сторін функціонування організму людини, особливо у несприятливих умовах довкілля, і всіх можливих засобів його підтримання (Сімахіна, Кочубей-Литвиненко, & Науменко, 2024). Тому дедалі більшого значення набуває оздоровче харчування як напрям сучасної нутриціології, метою якого є підвищення розумової та фізичної працездатності індивіда, резистентності організму до екстремальних умов жит-

тедіяльності, поліпшення функціонування всіх органів і систем, підвищення якості життя, досягнення активного довголіття (Калашніков, Курділь, & Худайкулова, 2022; Матасар, & Петрищенко, 2023).

Протягом двох останніх десятиліть бурхливий розвиток молекулярно-генетичних методів дослідження спричинив виникнення і розвиток нових напрямів нутриціології — нутригеноміки та нутригенетики (Kohlmeier, 2016), у яких реально виокремити спеціалізовані піднапрями, наприклад, оздоровча нутригеноміка та оздоровча нутригенетика, за аналогією зі спеціалізованим піднапрямом «спортивна нутригеноміка та нутригенетика». Таку назву запропонували автори (Дроздовська, Пастухова, & Імас, 2018), виходячи з рекомендацій М. Абрахамса, який ввів до наукового обігу термін «практична нутригеноміка» (Abrahams, 2011).

Нутригеноміка вивчає вплив нутріюму (комбінації всіх нутрієнтів, що надходять в організм) на зміни метаболізму шляхом контролю активності генів, тобто досліджує спеціальний напрям у харчуванні (Guest, 2015; Nutrigenomics, 2009). Нутригеноміка послуговується молекулярними інструментами для розуміння характеру відповіді організму на певний раціон, відповідаючи на запитання, як нутрієнти впливають на активність геному (Ordovas, & Mooser, 2004). Фахівці з'ясували, що компоненти харчових продуктів можуть «вмикати» або «вимикати» певні гени, активуючи таким чином конкретні фізіологічні процеси в організмі, що сприяє розвиткові захворювань або їх запобіганню та лікуванню (Нутригеноміка, 2016).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нутриціологи, дієтологи, фізіологи, біохіміки одержали безмежне поле діяльності для вивчення особливостей харчування осіб різної статі і різних вікових категорій для персоналізованого харчування. З нашої точки зору, основою такого раціону може стати оздоровче харчування як реалізована на сьогодні прадавня мрія людства про ідеальну їжу.

Фахівці виявили понад 300 генів, поліморфізми яких (різні успадковані варіації) у структурах ДНК можуть зумовлювати індивідуальні реакції організму на специфічні нутрієнти (Terruzzi et al., 2011), і більш ніж 100 поліморфізмів, пов'язаних із розвитком ожиріння при неправильному харчуванні (Rankinen et al., 2006). Тож нутрієнти, які не відповідають особливостям геному конкретної людини, можуть викликати розвиток захворювання через порушення процесів метаболізму.

Можна також прогнозувати, що ефективність уживання оздоровчих продуктів і натуральних дієтичних добавок, які пропонувано включати до комбінованих харчових раціонів (Сімахіна, Науменко, & Михайлова, 2024), також залежатиме від генетичних особливостей споживача.

Відомо, наприклад, що ряд дієтичних добавок, зокрема омега-3 ПНЖК, альфа-ліпоева кислота, поліфеноли зеленого чаю, ізофлавоноїди сої, антоціаніни, деякі каротиноїди здійснюють позитивний вплив на геном (Calder, 2012). Акцент на ці біокомпоненти необхідно враховувати при розробленні нових оздоровчих продуктів.

Напрямок здорового харчування — наймолодша галузь харчових технологій, тому й не дивно, що досі ні доказова медицина, ні нутриціологія не досліджували його з позицій молекулярно-генетичних маркерів, з точки зору знань нутригено-

міки та нутригенетики. Тому дуже багато проблем і запитань, на які медики й технологи чекають відповідей і які дозволять адекватно скорегувати склад і рецептуру нових продуктів безпосередньо для персоналізованих дієт.

Сьогодні персоналізоване харчування — не просто модний термін, а й нагальна необхідність його розроблення та використання у зв'язку зі збільшенням кількості випадків порушення процесів метаболізму в населення і пов'язаним із цим зростанням аліментарних хвороб.

Персоналізоване харчування трактується як підхід до формування оптимізованого раціону споживача з урахуванням його індивідуальних особливостей, таких як генотип, метаболізм, схильність до певних захворювань тощо, а також уподобання та харчові звички (Chaudhary, 2021; Verma, 2018).

Нутригеноміка та нутригенетика на рівні з науковими напрямками мають і етичні проблеми, які досі у сфері оздоровчого харчування не розглядалися та зводилися лише до врахування уподобань споживачів у виборі тих чи тих продуктів. З цієї точки зору постають запитання: як люди сприйматимуть нові продукти, розроблені спеціально під їхні потреби, зважаючи на генотип? Чи з розумінням поставляться споживачі до рекомендацій нутриціологів щодо оформлення генетичного паспорта харчування? І таких питань виникатиме дедалі більше. Залишається сподіватись, що нові відкриття в галузі здорового персоналізованого харчування, отримані спільними зусиллями нутриціологів, дієтологів, технологів, допоможуть відповісти на всі поточні питання.

Мета статті: на основі сучасних наукових результатів нутриціології, нутригеноміки та нутригенетики окреслити новий вектор включення оздоровчого харчування як базового складника до персоналізованих дієт.

Матеріали і методи. Загальнонаукові методи (аналіз, синтез, абстрагування, узагальнення, порівняння та аналогії); аналіз друкованих праць українських та зарубіжних учених, електронних джерел інформації.

Викладення основних результатів дослідження. Знання генетичних особливостей організму та направленою регулювання експресії генів, що беруть участь в адаптації організму до підвищених фізичних і психоемоційних навантажень (найбільш характерних у наш час для військовослужбовців) уможливить, разом із відповідним персоналізованим харчуванням, запобігання розвитку ряду хвороб, особливо генетично зумовлених, прискорене одужання та реабілітацію, відновлення порушених функцій організму та забезпечення нормальної його життєдіяльності (Milner et al., 2008; Ross, 2003).

До відома: експресія генів — це процес, у ході якого спадкова інформація, що кодується в гені, перетворюється на РНК або білок.

Останні дослідження показали, що в арсеналі нутриціологів, дієтологів, терапевтів, гастроентерологів з'явилася інформація щодо 38 генів, поліформізми яких корелюють саме з аліментарними захворюваннями (Pavlidis, 2015), і ці дані реально пов'язати з реакцією організму на різний тип харчування. А нутриціологія, своєю чергою, отримує надзвичайно перспективний напрям досліджень, у якому оздоровчі продукти та натуральні дієтичні добавки знайдуть своє пріоритетне призначення.

Потреба в персоналізованому харчуванні підтверджується також дослідженнями у галузі нутригеноміки, яка застосовує молекулярні інструменти для пошуку та розуміння відповіді індивідуума на певний раціон. На думку фахівців, потреба в персоналізованому харчуванні викликає необхідність застосування методів проєкту «Геном людини» (Watson, 1990) в українській практиці.

Це міжнародний проєкт наукових досліджень геному людини, мета якого полягала у визначенні послідовностей ДНК, локалізації генів та їхніх функцій. Проєкт було розпочато у 1990 р. під керівництвом Нобелівського лавреата Джеймса Вотсона. Перший робочий проєкт геному опубліковано у 2000 р., завершено у 2003 р., а подальший аналіз генів усе ще триває. Такі дослідження з'ясовують механізм впливу експресії генів на стан здоров'я людини у відповідь на метаболічні процеси в організмі, а також взаємодії між генотипом (тобто спадковою основою організму, єдиною системою взаємодіючих генів) і нутрієнтами.

За результатами виконання міжнародного проєкту «Геном людини» було сформульовано ряд питань, які потрібно вивчити у подальших дослідженнях за даним напрямом (Powledge, 2003):

Чи впливає експресія генів у відповідь не метаболічні процеси в організмі людини на стан її здоров'я?

Чи є експресія генів і метаболічна відповідь результатом взаємодії між генотипом людини і її раціоном?

Яким чином процеси взаємодії, що відбуваються між генетичною інформацією та нутрієнтами, можуть визначити особливості харчування конкретної людини?

Імовірно, що саме пошук відповідей на ці запитання і стимулював зародження та розвиток двох нових наукових напрямів — нутригенетики та нутригеноміки. Ці дослідження можуть стати основою нових підходів до побудови харчових раціонів із переважанням різноманітних оздоровчих харчових продуктів та натуральних дієтичних добавок.

Треба віддати данину вдячності за далекоглядність і розуміння стратегічного розвитку харчових галузей колективу авторів Одеського національного технологічного університету та Національного університету харчових технологій, очолюваного відомим в Україні і за її межами ученим, професором, доктором технічних наук Леонідом Капрельянцом за публікацію масштабної і оригінальної оглядової статті, присвяченої сучасним трендам в омікс-біотехнологіях (Капрельянц, Пожіткова, Велічко, Охотська, & Білик, 2024).

Автори першими у вітчизняних публікаціях, присвячених новому поглядові на продукцію харчової промисловості, порушили питання про можливість і доцільність удосконалення технологій, складу та призначення харчових продуктів за рахунок залучення здобутків таких напрямів омікс-технологій, як нутригеноміка і нутригенетика.

Оміксні технології — це комплекс сучасних технологій у молекулярній біології та біотрансформатиці, що включають геноміку, епігеноміку та інші науки (Debnath, Prasad, & Bisen, 2015). Застосування омікських технологій допомагає вивчати організм людини на різних рівнях його організації, а у сфері, яка стосується харчування, нутригеноміка та нутригенетика, забезпечують розуміння взаємовпливу генів і нутрієнтів.

На сьогодні в розпорядженні нутриціологів і дієтологів уже є рекомендації з підбору харчових продуктів для осіб з метаболічними порушеннями за наявності певних поліформізмів генів (Martí, 2002). Відомо також, що нутрієнти здатні впливати на ініціацію процесу експресії генів, змінювати активність тієї їх великої кількості, які безпосередньо пов'язані з метаболічними порушеннями (Martinez, 2003). У ряді досліджень зафіксовано факт взаємодії між генами, що відповідають за ожиріння та діабет II типу, з деякими компонентами харчових продуктів. Отже, одним із механізмів впливу нутрієнтів на генотип людини є їхня участь у молекулярно-генетичних взаємодіях.

Фахівці з'ясували, що продукти, які містять сульфорафан (усі сорти капусти, рукола, редис, редька) та діалілсульфіл (часник), мають здатність «вмикати» гени, пов'язані з позитивними ефектами в організмі людини, зменшуючи ступінь запальних процесів, пригнічуючи мутації. Ще ширший перелік продуктів, які «вимикають» потенційно шкідливі гени; вони водночас активують певні фізіологічні процеси, що сприяє запобіганню хвороб та одужанню (Нутригеноміка, 2016).

Ось приклад продуктів, які мають стати предметами детального вивчення для фахівців зі здорового харчування: холіновмісні продукти (яйця, бобові, печінка); фолієва кислота (хліб, крупи, всі зелені листові овочі, особливо шпинат); бетаїн у складі червоного буряка; усі морепродукти (за рахунок йоду); вітаміни B₆ і B₁₂ (печінка, пивні дріжджі); продукти з підвищеним вмістом ПНЖК омега-3, а також вітамін D₃.

Відома київська дієтологиня Оксана Скиталінська запропонувала ще один термін: «регулювальники роботи генів», які, залежно від умов, можуть «вмикати» або «вимикати» гени. Це біокомпоненти кави (кофеїн), зеленого чаю (катехіни), базиліку, м'яти, шавлії (урсолова кислота), помідорів, броколі, шпинату (альфа-ліпоева кислота). І, як завжди, пріоритетна роль належить вітамінові C, який не лише відіграє одну з найважливіших ролей у підтриманні здоров'я людини, а й захищає геном від ушкоджень та сприяє його відновленню. Очевидно, перелік таких продуктів буде постійно поповнюватись, оскільки інтенсивно розвиваються дослідження з біохімічного складу сільськогосподарських культур, лікарської та пряноароматичної сировини.

Цікавим є також спостереження дієтологів, що на активність генів впливають не лише компоненти їжі, а й зовнішнє оточення, умови життя людини, стресові ситуації, відсутність фізичної діяльності, неконтрольоване вживання ліків тощо.

Для повноти картини слід згадати, що їжа складається з білків, жирів, вуглеводів, вітамінів, мінеральних речовин. Науковиця з Університету штату Мічиган (США) Моніка Дас переконана, що всі нутрієнти та продукти їхнього розпаду здатні запускати так звані «генетичні перемикачі» (очевидно, це те, що Оксана Скиталінська назвала «регулювальниками роботи генів»), які містяться у геномі.

Останні дослідження в нутриціології поглиблюють розуміння того, яким чином можна найбільш ефективно застосувати біокомпоненти харчових продуктів, передусім оздоровчих, для поліпшення і підтримання стану здоров'я людей.

Можна вважати доведеним той факт, що для підвищення результативності будь-яких харчових раціонів, особливо з переважанням оздоровчих продуктів і натураль-

них дієтичних добавок, харчування має бути персоналізованим з урахуванням спадкових і набутих генетичних особливостей організму, залежно від тривалості життя, стану здоров'я та довкілля, харчових звичок і уподобань (Приліпка, Герасименко, & Іщейкіна, 2024). Тому застарілим стало уявлення про те, що всі індивіди мають потреби в одних і тих же нутрієнтах. З цієї точки зору офіційний документ «Норми фізіологічних потреб населення в основних харчових речовинах і енергії» (наказ МОЗ України №1073 від 03.09.2017) теж ґрунтується на застарілих положеннях і не враховує сучасних відомостей про індивідуальні потреби кожної людини в тих чи тих нутрієнтах. Це має спонукати нутриціологів, дієтологів, фізіологів до розроблення персоналізованого харчування: його основу, на наш погляд, мають становити оздоровчі продукти, у складі яких передбачено підвищені концентрації біокомпонентів, здатних «вмикати» гени, що несуть позитивну інформацію, сприяють попередженню розвитку багатьох хронічних захворювань.

На думку фахівців (Voloshyn, Vlasyk, Voloshyna, Ainussi, & Sukholotiuk, 2020), оздоровчі компоненти можуть ініціювати позитивні наслідки та відігравати ключову роль у контролі метаболічних порушень, зокрема таких, як дисліпідемія, інсулінорезистентність, артеріальна гіпертензія тощо. Автори (Фадєєнко, Курінна, & Вовченко) наголошують на тому, що целіакія та ожиріння належать до захворювань, за яких провідну роль у лікуванні посідає персоналізоване харчування. Єдиним імовірним способом лікування целіакії є сувора довічна безглютенова дієта, завдяки якій можна контролювати генетичну схильність індивіда до цієї хвороби.

Український ринок пропонує ряд харчових безглютенових продуктів, і їхній асортимент постійно розширюється. Автори (Дзюндзя, & Труш, 2023) представили досить наочну інформацію щодо найбільш відомих виробників безглютенової продукції, яка відповідає стандартам AOESC. Це українська фірма Ms. Tally, польські Bezgluten та Incoba, італійська Spat, німецька Dr. Schar. Практично всі ці підприємства реалізують борошно із зернових безглютенових культур, макаронні вироби та крупи, деякі борошняні кондитерські вироби. Цими найменуваннями поки що обмежується асортимент українських виробників, а зарубіжні фірми поповнюють наш ринок ще й різноманітними хлібобулочними та кондитерськими виробами, тістечками, пластівцями. Польська і німецька фірми пропонують також сухі сніданки.

Навіть цей короткий перелік показує, що найбільша частка безглютеновий виробів належить закордонним фірмам. У перспективі можна очікувати на зростання асортименту такої продукції від українських виробників, адже саме цей сегмент ринку називають найдинамічнішим. Відомо, що Україна є лідером з вирощування зернових безглютенових культур і при раціональних способах їх перероблення може скласти гідну конкуренцію зарубіжним фірмам, а з часом (зокрема, після завершення російсько-української війни) досягти належного рівня продовольчої безпеки і в цьому важливому напрямі інноваційних харчових технологій.

Підтвердженням цієї тези є перелік безглютенових продуктів, які вже можна придбати у Києві (Горач, Михалик, & Гусар, 2021): ТМ «Asparagus» — борошно соргове; ТОВ «Крохмалепродукти України» — крупа саго; ТМ «Healthy Tradition»

— сухі сніданки «Raw Granola» та батончики без цукру; ТОВ «Ай да Бейкер» — печиво «Кориця».

Щодо лікування ожиріння, автори зазначеної статті посилаються на результати наукового дослідження, виконаного під керівництвом професора І. Аркадіаноса (Arkadianos, Valdes, & Marinos, 2007), у ході якого всім пацієнтам було запропоновано персоналізоване харчування з урахуванням 24 генетичних поліморфних маркерів у 19 генах, які регулюють метаболізм. Установлено, що така немедикаментозна терапія, розроблена відповідно до генотипу, сприяла істотному зниженню маси тіла, і надалі виявила тенденцію до підтримання швидкості зниження маси тіла протягом року.

Якщо ж розробляти нові оздоровчі продукти для лікування ожиріння, то потрібно насамперед включати до їхніх рецептур вітаміни, амінокислоти, антиоксиданти, поліненасичені жирні кислоти, харчові волокна. Застосування методів нутригеноміки та нутригенетики надасть можливість визначити їхні оптимальні концентрації та співвідношення для активації тих генів, які регулюють процеси метаболізму.

Урахування нутригеномних і нутригенетичних властивостей оздоровчих продуктів та натуральних дієтичних добавок дасть змогу в недалекому майбутньому істотно підвищити ефективність їх використання з точки зору поліпшення стану здоров'я громадян і подовження тривалості життя.

Незважаючи на революційність ідей нутригенетичної та нутригеномної інформації, досі не проведено спеціальних медичних наукових досліджень щодо залучення цих ідей до розроблення нових харчових продуктів для системи здорового харчування. Сьогодні можна орієнтуватись поки що на генетичний харчовий паспорт.

Паспорт харчування на основі ДНК надає індивідуальний та науково обґрунтований підхід до покращення здоров'я та загального самопочуття через персоналізоване харчування. Генетичний паспорт харчування враховує особливості організму людини, її генетичні дані, і це допомагає розробити оптимальну дієту, що підтримує метаболізм, знижує ризик захворювань і підвищує ефективність засвоєння нутрієнтів.

Рекомендації щодо харчування, засновані на генетичній інформації конкретного індивіда, допоможуть краще збалансувати споживання жирів, білків і вуглеводів, сприяючи досягненню та підтриманню нормального функціонування організму. У разі виявлення генетичної непереносимості лактози, глютену, підвищеної чутливості до кофеїну, можна змінити харчування, щоб уникнути негативних симптомів і покращити самопочуття.

Харчування, підібране з урахуванням генетичного профілю окремої людини, може підвищити рівень енергії, покращити сон і зміцнити імунну систему (Генетичний, 2024).

Дослідження, необхідні для формування генетичного паспорта харчування, дають змогу об'єктивно оцінити потребу індивіда в певних нутрієнтах. Досить характерним є оцінювання ефективності включення ПНЖК омега-3 до харчових раціонів, необхідних для нормального функціонування. Дуже важливо отримувати

омега-3 жирні кислоти із харчуванням, адже адекватне споживання омега-3 забезпечує профілактику захворювань мозку, хронічних запалень, утомлюваності, хвороб серця (Москоні, 2019). Під час розроблення генетичного паспорта харчування слід ураховувати, що різні люди, які вживають продукти із омега-3 (морепродукти, рибу), засвоюють різну кількість жирних кислот. Тому декому рекомендують підвищені дози омега-3 як із харчовими продуктами, так і у вигляді дієтичних добавок. Для таких людей характерна наявність варіації гену, через який організм не встигає збалансувати вміст омега-3 та омега-6 жирних кислот. Отож їм необхідно ретельно стежити за вживанням омега-3 з метою збереження здоров'я (Генетичний, 2024).

Дуже важливим компонентом харчування є вітамін B₉ (фолієва кислота). Цей вітамін міститься переважно у зелені та продуктах тваринного походження. Але сам вітамін B₉ неактивний у клітинах організму і набуває активної форми (L-метилфолат) за допомогою власних ферментів. В активній формі цей вітамін запобігає багатьом хворобам серця (регулюючи рівень гомоцистеїну), мозку, а також розвитку онкологічних захворювань (Никоненко, Никоненко, Чмуть, & Осауленко, 2020). L-метилфолат особливо важливий у період розвитку плоду.

Вітамін D допомагає підтримувати нормальний рівень кальцію в організмі та забезпечує міцність кісток. Окрім того, що він є у деяких харчових продуктах, людина отримує вітамін, перебуваючи на сонці, а також завдяки діяльності мікроорганізмів у кишечнику. Для багатьох людей, особливо в Україні, сонячного світла недостатньо для оптимального вироблення цього вітаміну, а на мікробіоту кишечника впливають харчові токсини та антибіотики, тому вона не завжди справляється зі своєю функцією. Без достатньої кількості вітаміну D людина потрапляє до групи підвищеного ризику розвитку остеопорозу і деяких патологій мозку. Крім того, вітамін D є потужним геропротектором — речовиною, що сповільнює старіння. Недарма у довгожителів виявлено підвищений вміст цього вітаміну в крові (Паньків, 2021). Наявність даних про вітамін D у генетичному паспорті харчування зумовлює можливість оцінити ризики виникнення і розвитку таких хвороб, як ожиріння і цукровий діабет, і запобігти їм (Маліновська та ін., 2023).

Давати медичні рекомендації з харчування на основі даних нутригенетичного тестування може лише сертифікований лікар-дієтолог, обізнаний у сучасних наукових здобутках нутригенетики, нутригеноміки, нутриціології, а також можливостях оздоровчого персоналізованого харчування в ефективній профілактиці та лікуванні різноманітних хвороб, особливо генетично зумовлених.

Висновки

Нутригеноміка та нутригенетика зародились як результат сучасних досліджень у нутриціології, фізіології із залученням молекулярної біології та генетики. До можливостей цих двох нових наук належить корегування метаболічних станів і синдромів, що забезпечує істотне зменшення кількості аліментарних хвороб.

З огляду на зростання запитів населення на здорове харчування, імплементацію сучасних знань нутригеноміки та нутригенетики у сферу нутриціології, харчова індустрія повинна стрімко змінюватись, відповідаючи на ці виклики часу і

задовольняючи потреби населення в якісних, безпечних, ефективних харчових продуктах, на основі яких реально формувати персоналізовані раціони.

Перспективами подальших досліджень є оптимізація харчування за рахунок включення до раціонів оздоровчих продуктів і натуральних дієтичних добавок з підвищеним вмістом сполук рослинного походження, здатних регулювати активність генів, що допоможе запобігти розвитку багатьох хронічних неінфекційних хвороб.

Дієтологи, нутриціологи, геронтологи отримають необхідну базу даних для розроблення індивідуальних рекомендацій і формування комбінованого складу персоналізованого харчування, у якому генетичні дані пов'язані з оптимальною для певного генотипу дієтою, орієнтованою на зменшення ризику виникнення і розвитку захворювань. Важливим є також подальший пошук і детальніше вивчення харчових сполук, які, впливаючи на певні гени, справляють позитивний вплив на організм людини. Це стосується насамперед флавоноїдів (кверцетин, епігеніні) у складі плодовоовочевої сировини, фітоестрогенів соєвих бобів, ресвератролу винограду, куркуміну прянощів тощо.

Поєднання оздоровчої нутригеноміки та нутригенетики з новітніми харчовими технологіями дасть новий поштовх до вдосконалення системи оздоровчого харчування і, як результат, поліпшення здоров'я нації.

Література

Генетичний (2024). Генетичний паспорт харчування та оптимальної ваги. URL: <https://www.testdnk.com.ua/analyzy-dnk/genetic-nutrition-passport> (дата звернення 28.01.2025).

Дзюндзя, О. В., Труш, С. С. (2023). Аналіз ринку та перспективи розширення безглютенової продукції. *Таврійський науковий вісник*, 1, 57—64. DOI: <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2023.1.6>.

Дроздовська, С. Б., Пастухова, В. А., Імас, С. В. (2018). Нутригенетичні підходи у спортивній дієтології. *Спортивна медицина, фізична терапія та ерготерапія*, 2, 29—39. DOI: <https://doi.org/10.32652/spmed.2018.2.29-39>.

Калашніков, А. А., Курділь, Н. В., Худайкулова, О. О. та ін. (2022). Перспективні напрямки розробки засобів, що здатні підвищувати адаптаційні можливості організму людини в умовах негативного впливу середовища життєдіяльності. *Єдине здоров'я та проблеми харчування України*, 2(57), 41—62. DOI: <https://doi.org/10.33273/2663-9726-2022-57-2-41-62>.

Капрельянц, Л. В., Пожіткова, Л. Г., Велічко, Т. О., Охотська, М. І., Білик, О. А. (2024). Сучасні тренди в омікс-біотехнологіях — від геноміки до персоналізованих дієт. *Наукові праці НУХТ*, 30(2), 180—202. DOI: <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2024-30-2-16>.

Маліновська, Т. М., Орленко, В. Л., Попова, В. В., Соколова, Л. К., Кравченко, В. І., Булдігіна, Ю. В. (2023). Вітамін D і поліморфізм гена VDR як можливі ланки генетичного патогенезу ожиріння та цукрового діабету в дітей та підлітків. *Ендокринологія*, 28(3), 276—287. DOI: <https://doi.org/10.31793/1680-1466.2023.28-3.276> (дата звернення 28.01.2025).

Матасар, І. М., Петрищенко, Л. М. (2023). Профілактика захворювань аліментарного та аліментарно залежного генезу. *Єдине здоров'я та проблеми харчування України*, 1(58), 56—67. DOI: <https://doi.org/10.33273/2663-9726-2023-58-1-56-67>.

Москоні, Л. (2019). *Їжа для мозку. Наука розумного харчування* / пер. З англ. Київ: Наш формат.

Никоненко, О. С., Никоненко, А. О., Чмуть, К. О., Осауленко, В. В. (2020). Вивчення впливу порушення метаболізму гомоцистеїну та вітаміну D на розвиток деструктивних процесів судинної стінки. *Український журнал серцево-судинної хірургії*, 3(40), 22—27. DOI: <https://doi.org/10.30702/ujcvs/20.4009/050022-027/11.9>.

Нутригеноміка (2016). Нутригеноміка та нутригенетика — науки майбутнього. URL: <https://medwestsnab.com.ua/news/nutrigenomika-i-nutrigenetika-nauki-maybutnogo-chastina-1/> (дата звернення 26.01.2025).

Паньків, І. В. (2021). Вітамін D: нові аспекти застосування, ефективні дози. Сучасний стан проблеми. *Міжнародний ендокринологічний журнал*, 17(1), 38—42. DOI: <https://doi.org/10.22141/2224-0721.17.1.2021.226430> (дата звернення 28.01.2025).

Приліпка, К. О., Герасименко, Л. О., Ішейкіна, Ю. О. (2024). Харчові звички як складові якості життя та стану здоров'я у студентів медиків в умовах воєнного часу. *Перспективи та інновації науки. Серія «Педагогіка», Серія «Психологія», Серія «Медицина»*, 11(45), 2005—2012. DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-4952-2024-11\(45\)-2005-2011](https://doi.org/10.52058/2786-4952-2024-11(45)-2005-2011).

Сімахіна, Г. О., Кочубей-Литвиненко, О. В., Науменко, Н. В. (2024). Дієтична добавка адаптогенної дії для екстремальних умов довкілля. *Proceedings of the 7th International Scientific Conference «Global science: prospects and innovations» (March 1-3, 2024)*. Liverpool, GB. P. 247—255. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2024/03/GLOBAL-SCIENCE-PROSPECTS-AND-INNOVATIONS-1-3.03.24.pdf>.

Сімахіна, Г. О., Науменко, Н. В., Михайлова, Р. В. (2024). Концептуальні засади формування комбінованого харчового раціону для екстремальних умов життєдіяльності. *Наукові праці НУХТ*, 30(3), 125—137. DOI: <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2024-30-3-13>.

Фадєєнко, Г., Курінна, О., Вовченко, М. (2015). Нутригеноміка і нутригенетика: можливості практичного застосування. *Сучасна гастроентерологія*, 6(86), 7—12.

Abrahams, M. (2011). Practical Nutrigenomics: a guide to setting up your personalised nutrition service.

Arkadianos, I., Valdes, A. M., Marinos, E. et al. (2007). Improved weight management using genetic information to personalize a calorie controlled diet. *Nutr. J.*, 6, 29—30.

Calder, Ph. C. (2012). Mechanisms of Action of (n-3) Fatty Acids. *J. Nutrition*, 1—8. DOI: <https://doi.org/10.3945/jn.111.155259>.

Chaudhary, Nisha; Kumar, Vinod; Sangwan, Punesh; Pant, Naveen Chandra; Saxena, Abhishake; Joshi, Shourabh; Yadav, Ajar Nath (2021). Personalized Nutrition and Omics. In: *Comprehensive Foodomics*. Oxford: Elsevier, 495—507. DOI: <https://doi.org/10.1016%2Fb978-0-08-100596-5.22880-1>.

Cozzolino, S., Cominetti, C. (2013). Biochemical and physiological bases of nutrition in different stages of life in health and disease. São Paulo, Brazil: Monole.

Debnath, M., Prasad, G. B. K. S., Bisen, P. S. (2015). Omics Technology. In: *Molecular Diagnostics: Promises and Possibilities*, 11—31. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-90-481-3261-4>.

Guest, N. S., Jamnik, J., Womack, Ch., El-Sohemy, A. (2015). Genetic variation related to caffeine metabolism or response during exercise. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 12 (Suppl. 1), 53.

Kohlmeier, M. (2016). Nutrigenetics: Applying the Science of Personal Nutrition, 324.

Marti, A., Corbalan, M. S., Martinez-Gonzalez, M. A. et al. (2002). TRP64ARG polymorphism of the beta 3-adrenergic receptor gene and obesity risk: effect modification by a sedentary lifestyle. *Diabetes Obes. Metab.*, 4, 428—430.

Martinez, J. A., Corbalan, M. S., Sanchez-Villegas, A. et al. (2003). Obesity risk is associated with carbohydrate intake in women carrying the Gln27Glu beta2-adrenoceptor polymorphism. *J. Nutr.*, 133, 2549—2554.

Milner, J., Trujillo, E. B., Kaefer, C. M., Ross, S. (2008). Nutrigenomics. In: *Biosocial Surveys. Committee on advances in collecting and utilizing biological Indicators and Genetic Infomation in Social Science Surveys*. Washington: The National Academies Press.

Nutrigenomics (2009). Nutrigenomics and Proteomics in Health and Disease: Food Factors and Gene Interactions / ed. by Yoshinori Mine, Kazuo Miyashita and Fereidoon Shahidi. Wiley-Blackwell.

Ordovas, J. M., Mooser, V. (2004). Nutrigenomics and nutrigenetics. *Current Opinion in Lipidology*, 15(2), 101—108.

Pavlidis, C., Patrinos, G. P., Katsila, T. (2015). Nutrigenomics: A controversy. *Applied and translational genomics*, 4, 50—53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atg.2015.02.003>.

Powledge, T. (2003). Human Genome Project Completed. *Genome Biology*. DOI: <https://doi.org/10.1186%2Fgb-spotlight-20030415-01>.

Rankinen, T., Aamir, Z. Y., Chagnon, C. et al. (2006). The human obesity gene map: the 2005 update. *Obesity*, 14, 529—644.

Ross, S. A. (2003). Diet and DNA methylation interactions in cancer prevention. *Ann. N Y Acad. Sci*, 983, 197—207.

Terruzzi, I. M., Senesi, P., Montesano, A. et al. (2011). Genetic polymorphisms of the enzymes involved in DNA methylation and synthesis in elite athletes. *Physiol. Genomics*, 43(16), 965—973.

Verma, M., Hontecillas, R., Tubau-Juni, N., Abedi, V., Bassaganya-Riera, J. (2018). Challenges in Personalized Nutrition and Health. *Frontiers in Nutrition*, 5. DOI: <https://doi.org/10.3389%2Ffnut.2018.00117>.

Voloshyn, A., Vlasys, L., Voloshyna, L., Ainussi, N., Sukholotiuk, L. (2020). Features of a health-improving diet for patients with chronic fatigue syndrome: Arguments, experience, discussion. *Єдине здоров'я та проблеми харчування України*, 1, 19—25. DOI: <https://doi.org/10.33273/2663-9726-2020-52-1-19-25>.

Watson, J. D. The Human Genome Project: Past, Present and Future. *Science*, 248(4951), 44—49. DOI: <https://doi.org/10.1126%2Fscience.2181665>.

УДК 637.523

RESEARCH OF THE PROPERTIES OF THE INNOVATIVE SEMI-FINISHED PRODUCTS IN A DOUGH SHELL

O. Batrachenko*Cherkasy State Technological University***Key words:**

*Semi-finished products
frozen in a dough shell
Improvement
"Design" of a food
product
Sensory characteristics
Nutritional and energy
value*

Article history:

Received 03.01.2025
Received in revised form
17.01.2025
Accepted 03.02.2025

Corresponding author:

O. Batrachenko

E-mail:

avbtrachenko1980@gmail.com

Citation: Батраченко О. В. (2025). Дослідження властивостей нових інноваційних напівфабрикатів у тістовій оболонці. *Наукові праці НУХТ*, 31(1), 157—167.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-1-14

ABSTRACT

The disadvantages of known methods of manufacturing a semi-finished product frozen in a dough shell (SFPF) are: insufficient taste of the product (due to the small number of types of filling that can be simultaneously added to the product); insufficient nutritional properties; insufficient consumer qualities (due to the standard external form and internal structure). A new appearance and internal structure of the SFPF, which is stylized as a pea pod and is aimed primarily at a children's target audience is presented in the article. All SFPF, which were manufactured according to the four developed recipes, have better sensory characteristics compared to control samples.

The proposed appearance and internal structure of the SFPF "Classic" caused an increase in the resulting score for sensory characteristics (SO) from 3.80 to 4.57. Adding hard cheese to the SFPF recipe allowed, in addition to the above mentioned characteristics, to improve the aroma, taste and juiciness of the product, which achieved the maximum SO value of 4.92 points. Also, due to this, the energy value of the product was significantly increased compared to the control sample (382.77 kcal/g versus 322.21 kcal/g). The use of minced vegetables allowed to make a product with an original taste and adapt it to the needs of people interested in a balanced diet (SO 4.64). The production of meatballs from individual types of meat raw materials at the SFPF "Three Meats" allowed to achieve an original pleasant taste and aroma of the finished product.

The results presented in this work can be used at food enterprises, public catering establishments and machine-building companies. The developed method of manufacturing SFPF has received a patent of Ukraine for a utility model No. 60862.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-1-14

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ НОВИХ ІННОВАЦІЙНИХ НАПІВФАБРИКАТІВ У ТІСТОВІЙ ОБОЛОНЦІ

О. В. Батраченко

Черкаський державний технологічний університет

Недоліками відомих способів виготовлення напівфабрикату, замороженого в тістовій оболонці (НЗТО), є: недостатні смакові якості продукту (обумовлені малою кількістю видів начинки, що можуть одночасно вноситись у виріб); недостатні поживні властивості; недостатні споживчі якості (обумовлено стандартною зовнішньою формою та внутрішньою структурою). У статті представлено новий зовнішній вигляд і внутрішню структуру НЗТО, який стилізований під стручок гороху і спрямований насамперед на дитячу цільову аудиторію. Всі НЗТО, що були виготовлені за чотирма розробленими рецептурами, володіють кращими органолептичними показниками порівняно з контрольними зразками.

Запропонований зовнішній вигляд і внутрішня структура НЗТО «Класичний» обумовила підвищення результуючого бала за органолептичні властивості (РО) від 3,80 до 4,57. Додавання до рецептури НЗТО твердого сиру, крім означених вище показників, поліщило аромат, смак і соковитість продукту, завдяки чому було досягнуте максимальне значення РО у 4,92 бала. Також завдяки цьому суттєво підвищено енергетичну цінність продукту порівняно з контрольним зразком (382,77 ккал/г проти 322,21 ккал/г). Використання овочевого фаршу дало змогу зробити продукт з оригінальним смаком та адаптувати його до потреб людей, які зацікавлені у збалансованому харчуванні (РО 4,64). Виготовлення м'ясних кульок з окремих видів м'ясної сировини у НЗТО «Три м'яса» сприяло досягненню оригінального приємного смаку й аромату готового продукту.

Результати, представлені в пропонованій статті, можуть бути використані на харчових підприємствах і закладах громадського харчування. На розроблений спосіб виготовлення НЗТО отримано патент України на корисну модель № 60862.

Ключові слова: напівфабрикати, заморожені в тістовій оболонці, вдосконалення, «дизайн» харчового продукту, органолептика, харчова і енергетична цінність.

Постановка проблеми. Харчова продукція, як відомо, повинна володіти низкою властивостей, основними з яких, безумовно, є висока поживна цінність та якість продукту. Ці завдання на сьогодні вирішуються двома основними шляхами: забезпечення поживної оздоровчої цінності продукту.

Водночас для виробників властивості харчової продукції набувають зовсім іншого значення — це насамперед забезпечення високого попиту на харчову продукцію. А попит споживача на сьогодні обумовлюється не одним або двома факторами, а цілою їх низкою. Відповіддю на це питання є низка шляхів підвищення конкурентоспроможності харчових продуктів (рис. 1).



Рис. 1. Шляхи підвищення конкурентоспроможності харчових продуктів

Одним із таких факторів є зовнішнє та внутрішнє оформлення продукту, його структури та зовнішнього вигляду. Назвемо такі фактори «дизайном» харчового продукту. Ці властивості повинні привертати увагу до продукту, бути оригінальними та не створювати перешкод для масового випуску такого харчового продукту.

Прикладами вдалих «дизайнерських» рішень у харчовій технології є ковбаса з малюнком у розрізі від німецького ковбасного заводу Feldhues Fleischwarenbetriebe GmbH; шоколадний набір пазлів «Meiji Chocolate Bar Puzzle» від японської компанії Strayua World; їстівні шоколадні фотографії від компанії Tasty Image; чипси Spoonachos у вигляді ложки від сербського дизайнера Denis Bostandzic; кавові палички з різним смаком від дизайнера Neo Jeong Im; чайні пакетики у вигляді сорочок на вішалці, що зберігаються в коробці, яка стилізована під гардероб від дизайнеру Сун Мо Канг; макаронні вироби у формі автомобілів, мотоциклів, літаків, принцес, квіток, карет, замків тощо від компаній «Pasta Zara Macchinette», «Dalla Costa Travel»; смажені равіолі, начинкою яких є пиво.

В Україні, як і у всьому світі, обсяг виробництва напівфабрикатів неухильно зростає, адже споживачі вважають за краще витратити мінімум часу на приготування їжі. Тож продукти, що вимагають лише термічної обробки в домашніх умовах, є розумним компромісом між бажанням харчуватися швидко і необхідністю харчуватися повноцінно. Незмінною популярністю в наших співвітчизників користуються напівфабрикати, заморожені в тістовій оболонці (НЗТО).

Доцільно звернути увагу як на покращення дизайнерського оформлення саме цього виду харчових продуктів, так і підвищення поживних та смакових властивостей, а також розробку нової технології виготовлення НЗТО, яка б дала змогу забезпечити вирішення всіх трьох вказаних завдань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомі численні дослідження властивостей НЗТО і технологічних аспектів їх виготовлення. Так, у статті (Sahin, & Schieberle, 2019) проаналізовано ароматичні властивості дріжджів для пельменів.

У дослідженні (Wang, Wang, Zhao, & Zhang, 2019) було визначено вплив прежелатинізованого крохмалю (PGS) на характеристики, мікроструктуру та параметри якості клейкого рисового борошна та пельменів. Науковці (Li, Ding, Yokoyama, & Zhong, 2018) оцінювали характеристики борошна з клейкого рису, обсмаженого в різних умовах. Дослідники (Lin, Zhang, Zhao, & Cui, 2016) оцінювали антибактеріальну активність олії мускатного горіха та олії мускатного горіха, інкапсульованого в ліпосоми. В публікації (Wang та ін., 2021) визначено, що солодкі галушки, приготовані із сирої воскоподібної рисової муки, мають незадовільні якості при зберіганні та приготуванні: висока швидкість розтріскування і занадто висока липкість при ковтанні. У дослідженнях (Go, Lee, & Kim, 2022) досліджено ефект сушіння гарячим повітрям на якість і органолептичні властивості пельменів. У публікації (Lin, Geng, & Tong, 2021) увагу було зосереджено на вивченні впливу пошкодженого крохмалю на властивості клейкого рисового борошна та якості солодких галушок. У (Huang, Ding, & Xiong, 2019) визначено, що окислення є основною причиною втрати поживних властивостей та якості пельменів під час замороженого зберігання. Додавання екстрактів спецій у заморожені пельмені може обмежити та придушити окисні порушення.

Дослідження показали (Pan, Bai, & Huang, 2023), що процес швидкого заморожування сортів пшениці та їхні гліadini пов'язані з якістю й терміном зберігання пельменів. У (Wang, Liu, & Wang, 2022) досліджувалися біоактивні компоненти клейкого коричневого рису протягом 48-годинного пророщування, а також вивчався вплив пророщеного рисового борошна з різними добавками (5—25%, за вагою) на якісні показники пельменів із клейкого рису.

У (Голубков, Войтенко, & Бурдо, 2020) досліджено технологічні проблеми виробництва пельменної продукції кубічної форми. У праці (Дюкарева, Акмен, & Беякова, 2008) досліджено якість пельменів українських виробників та удосконалено властивості клейковини тіста під час їх виробництва. У (Погожих, Дюкарева, Акмен, & Яковлєва, 2008) досліджено споживчі властивості пельменів і шляхи підвищення якості тіста для їх виробництва. Моніторинг ринку заморожених напівфабрикатів в Україні дав змогу визначити (Комарова, 2013), що в нас більший акцент робиться на ринок пельменів вареників, які є традиційними стравами української кухні. У праці (Баль-Прилипко, 2011) показано роль жирів у формуванні якісних характеристик м'ясної сировини.

У (Мурликін, 2013) представлено наукове обґрунтування й удосконалення технології м'ясних січених виробів шляхом використання емульгаторів ацилгліцеринної природи з поліпшеними функціонально-технологічними властивостями. Матеріал монографії (Гринченко, Дроменко, Крайнюк, Потапов, & Янчева, 2015) узагальнює результати досліджень теплофізичних, функціонально-технологічних, структурно-механічних показників і мікроструктури систем на основі подрібненого м'яса яловичини з використанням емульсійних систем під впливом технологічних чинників. У статті (Ярошевич, 2022) проаналізовано фактори, що впливають на формування споживних властивостей заморожених пельменів: органолептичну привабливість, рівень якості вихідного сировини, технологію виготовлення.

Можна дійти висновку, що недоліками відомих способів виготовлення НЗТО є: недостатні смакові якості (обумовлені малою кількістю видів начинки, що можуть одночасно вноситись у виріб); недостатні поживні властивості; недостатні споживчі якості (обумовлено стандартною зовнішньою формою та внутрішньою структурою).

Актуальним є обґрунтування технології виготовлення нового виду НЗТО.

Мета статті: розробка зовнішнього вигляду, внутрішньої структури та рецептури нового виду напівфабрикатів, заморожених у тістовій оболонці, а також дослідження органолептичних властивостей, харчової та енергетичної цінності.

Матеріали і методи. Розробка нового зовнішнього вигляду та внутрішньої структури НЗТО проводилася з використанням методології розробки інноваційних патентоспроможних рішень, яка відображена у (Батраченко, 2017) та (Батраченко, 2022).

Нова рецептура НЗТО розроблялась на основі результатів аналізу дослідження ринку харчових продуктів. Кількісний склад інгредієнтів контрольного та розроблених зразків НЗТО наведено у табл. 1.

Таблиця 1. Кількість інгредієнтів на 1 кг НЗТО

Назва інгредієнту	Кількість інгредієнтів для різних видів зразків НЗТО				
	Контроль	«Класичний»	«Сирний»	«Фітнес»	«Три м'яса»
Тісто круте					
Борошно (вищий гатунок) г	308	308	308	308	308
Яйця, шт.	1	1	1	1	1
Сіль, г	7	7	7	7	7
Вода, мл	110	110	110	110	110
Барвник харчовий жиророзчинний, зелений, г	—	0,15	0,15	0,15	0,15
Фарш м'ясний					
Яловичина (вищий гатунок), г	280	280	280	280	143
Свинина напівжирна, г	150	150	150	150	143
Курятина, г	—	—	—	—	144
Цибуля ріпчаста, г	38	38	38	38	38
Сіль, г	8	8	8	8	8
Перець чорний, г	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Вода, мл	90	90	90	90	90
Начинка сирна					
Сир «Сметанковий» ТМ «Глобіно», 50% жирн., г	—	—	55	—	—
Начинка овочева					
Перець болгарський, г	—	—	—	12	—
Листя салату, г	—	—	—	12	—
Цибуля зелена, г	—	—	—	8	—

Першим етапом технологічного процесу виготовлення НЗТО була підготовка сировини (борошна, м'яса та інших інгредієнтів). Борошно, просіяне та очищене від металевих та інших домішок, витримувалось не менше одного тижня для дозрівання при температурі 20—25 °С та відносній вологості 75—85%. Температура сировини контролювалась з допомогою електронного термометра DT-34.

Охолоджена м'ясна сировина була зачищена від забруднень, кров'яних згустків тощо. Після цього вона була обвалена та жилована.

Жиловане м'ясо було подрібнене на м'ясорубці Moulinex ME626132 з використанням решітки з отворами діаметром 3 мм. Цибуля (світла ріпчаста) було очищена від оперення і промита холодною водою, а потім подрібнена на м'ясорубці. Змішування інгредієнтів м'ясного фаршу та замішування тіста здійснювалось за допомогою кухонної машини Tefal MASTERCHEEF Essential QB15E838. При замішуванні тіста використовувалось борошно із температурою 18—20 °С. З м'ясного фаршу формувались кульки діаметром 10 мм, які одразу направлялись у морозильну камеру SAMSUNG RB38T676FEL/UA для заморожування при температурі -18 °С. Сирна та овочева начинки готувались в кутері HURAKAN HKN-CL6 при частоті обертання ножів 25 с⁻¹, сир при цьому був попередньо охолоджений до +2 °С.

Формування НЗТО здійснювалось вручну. В тістову оболонку вкладались м'ясні кульки та, відповідно до рецептури, сирна або овочева начинка. Сформовані НЗТО в десятихвилинний термін направлялись на заморожування в морозильну камеру. Заморожування НЗТО проводилось до температури в центрі виробу -18 °С.

Органолептична оцінка розробленого виду НЗТО проводилась відповідно до ДСТУ 4437:2005 «Напівфабрикати м'ясні та м'ясо-рослинні посічені». Зразки розробленого виду НЗТО були досліджені на харчову та енергетичну цінність. Вміст білка визначався методом К'ельдаля (ISO 937, 1978). Загальний вміст жиру визначався методом Сокслета (ISO 1443, 1973).

Енергетична цінність розраховувалася за системою загального коефіцієнта Етуотера. Середні значення енергії виражаються як кількість калорій на 1 г макроелемента. Загальна система коефіцієнтів Етуотера включає енергетичні значення 4 ккал на грам (ккал/г) (17 кДж/г) для білка, 4 ккал/г для вуглеводів та 9 ккал/г (37 кДж/г) для жирів (Bozhko, Pasichnyi, & Strashynskyi, 2021).

Викладення основних результатів дослідження. Розробка зовнішнього вигляду та внутрішньої структури нового виду НЗТО проводилась відповідно до прямої задачі застосування науково-винахідницького бінома при вдосконаленні технологічних систем — спочатку були використані методи активізації технічної творчості, після яких використовувалась методологія проведення експериментальних наукових досліджень.

На основі законів динамізації технічних систем і переходу з макрорівня на мікрорівень та із використанням таких прийомів усунення таких технічних суперечностей, як «Принцип дроблення» і «Принцип місцевої якості», було динамізовано (змінено) внутрішню структуру НЗТО (один шматок м'ясного фаршу в пельменях замінено на декілька менших за розміром м'ясних кульок всередині НЗТО, причому передбачено, що різні кульки можуть мати різні параметри, зокрема бути виготовленими із різної м'ясної сировини).

Використовуючи такий прийом усунення технічних суперечностей, як «Принцип зміни фізико-механічних параметрів об'єкта», було запропоновано заморожувати м'ясні кульки перед їх подачею всередину тістової трубки при формуванні НЗТО. А використання такого прийому усунення технічних суперечностей, як «Принцип зміни забарвлення», дало змогу отримати рішення щодо додавання в тісто зеленого харчового барвника для зміни кольору тістової оболонки і більш повної відповідності зовнішнього вигляду НЗТО стручкам гороху.

У результаті було запропоновано використовувати такі нові етапи технологічного процесу виготовлення НЗТО, як формування з м'ясного фаршу кулеподібних заготовок і їх подальше заморожування до етапу формування самого НЗТО.

Додатково відбувається приготування начинки та її подача всередину тістової трубки таким чином, що начинка розташовується навколо кулеподібних заготовок з м'ясного фаршу, які розташовуються в один ряд всередині тістової трубки. Начинкою може бути паштет, сир або овочевий фарш. У тісто додатково можуть бути внесені харчові барвники з метою надання тісту зеленого, жовтого або червоного відтінків.

Завдяки таким етапам технології стає можливим виготовити НЗТО, які за своїм зовнішнім видом (колір, геометрична форма) та внутрішньою структурою стилізовані до рослинних харчових продуктів: стручків гороху, квасолі тощо. Це дає змогу підвищити споживчі якості даного виду харчової продукції, що особливо актуально при споживанні її дітьми.

Внутрішня структура і загальний вигляд розробленого НЗТО показані на рис. 2.

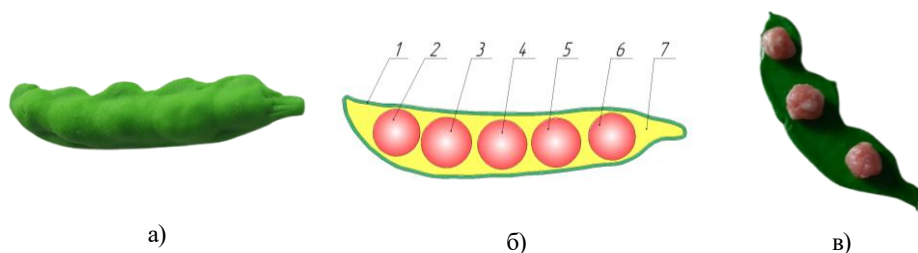


Рис. 2. Загальний вигляд (а) і внутрішня структура (б, в) розробленого виду НЗТО, що стилізований на зразок стручка гороху: 1 — тістова оболонка; 2—6 — кульки з м'ясного фаршу; 7 — начинка (сир або овочевий фарш)

Результати органолептичної оцінки розроблених НЗТО наведені в табл. 2.

Таблиця 2. Результати органолептичної оцінки НЗТО

Органолептичний показник	Вид НЗТО				
	Контроль	«Класичний»	«Сирний»	«Фітнес»	«Три м'яса»
Зовнішній вигляд	3,74±0,33	4,86±0,11	4,92±0,21	4,78±0,25	4,84±0,85
Внутрішня структура	3,52±0,59	4,88±0,42	4,95±0,54	4,80±0,48	4,85±0,43
Аромат	3,86±0,25	4,53±0,65	4,92±0,62	4,83±0,34	4,65±0,28
Смак	4,15±0,67	4,25±0,88	4,95±0,22	4,62±0,38	4,80±0,16
Соковитість	3,74±0,34	4,32±0,44	4,84±0,33	4,15±0,13	4,45±0,63
Результуючий бал	3,80	4,57	4,92	4,64	4,71

Варто зазначити, що всі чотири види розроблених НЗТО, виготовлені за відповідними рецептурами, показали кращий результуючий бал порівняно з контрольними зразками, виготовленими за рецептурою пельменів.

НЗТО «Класичний» отримав 4,57 результуючих бали на відміну від контрольного зразка (3,80 бала). Він перевищив контрольний зразок за всіма п'ятьма органолептичними показниками, що досліджувались, однак найбільше відрізнялись від контролю такі його показники, як «Зовнішній вигляд» і «Внутрішня структура». Це обумовлено запропонованими рішеннями щодо стилізації НЗТО до стручка бобових рослин.

Найвищий результуючий бал отримав НЗТО «Сирний» (4,92). У нього, на відміну від НЗТО «Класичний», суттєво вищими були бали не лише за показниками «Зовнішній вигляд» і «Внутрішня структура» (які теж були вищими порівняно з НЗТО «Класичний»), а й за показниками «Аромат», «Смак» і «Соковитість». Отримані підвищені значення показників обумовлені наявністю в рецептурі НЗТО «Сирний» сирної начинки з якісного сиру, яка розташовується навколо м'ясних кульок.

НЗТО «Фітнес» отримав результуючий бал — 4,64. Підвищення результуючого бала порівняно із контрольним зразком відбулось за рахунок усіх досліджуваних органолептичних показників. А підвищення результуючого бала щодо НЗТО «Класичний» відбулось за рахунок показників «Аромат» і «Смак», що обумовлено наявністю ароматної овочевої начинки в НЗТО «Фітнес».

Перевагою НЗТО «Три м'яса», якщо порівняти з НЗТО «Класичний», стали його аромат, смак і соковитість, що обумовлено використанням м'ясних кульок із трьох окремих видів м'ясної сировини. Це дало змогу зробити смак і аромат різних кульок НЗТО «Три м'яса» більш виразним та оригінальним.

Загалом можна стверджувати, що всі чотири запропоновані рецептури нового виду НЗТО дають змогу отримати готові вироби, які за основними органолептичними показниками перевершують контрольні зразки, виготовлені за рецептурою і технологією пельменів.

Харчова й енергетична цінність досліджених зразків НЗТО наведена в табл. 3. Як впливає з отриманих даних, НЗТО «Класичний» та НЗТО «Три м'яса» показали зниження енергетичної цінності порівняно з контрольним зразком. Натомість НЗТО «Сирний» та НЗТО «Фітнес» володіють вищою енергетичною цінністю, ніж контроль.

Таблиця 3. Харчова та енергетична цінність зразків НЗТО

Показник	Вид НЗТО				
	Контроль	«Класичний»	«Сирний»	«Фітнес»	«Три м'яса»
Білки, г/100 г продукту	13,44±0,45	15,12±0,23	16,75±0,47	14,82±0,19	17,46±0,11
Жири, г/100 г продукту	11,45±0,21	12,22±0,34	17,53±0,58	11,58±0,18	11,15±0,25
Вуглеводи, г/100 г продукту	41,35±0,55	37,40±0,48	39,50±0,32	42,20±0,27	40,52±0,19
Енергетична цінність, ккал/г	322,21	319,98	382,77	332,30	291,04

Знижена енергетична цінність НЗТО «Класичний» (319,98 ккал/г) обумовлена дещо більшим вмістом білка та зменшеним вмістом вуглеводів через більшу питому кількість м'яса та дещо зменшену питому кількість тістової оболонки порівняно з контрольним зразком. Причиною зміни питомої ваги м'яса та тістової оболонки є запропонована форма та внутрішня структура НЗТО.

Висока енергетична цінність НЗТО «Сирний» (382,77 ккал/г) обумовлена наявністю в його рецептурі сирної начинки відповідно до табл. 1. Маса НЗТО «Сирний» при цьому є більшою за масу НЗТО «Класичний».

Підвищення енергетичної цінності НЗТО «Фітнес» (332,30 ккал/г) порівняно з контрольним зразком (322,21 ккал/г) спричинене наявністю в його рецептурі овочевого фаршу, що дало незначний приріст вмісту вуглеводів.

Помітне зниження енергетичної цінності НЗТО «Три м'яса» (291,04 ккал/г) порівняно з контрольним зразком (322,21 ккал/г) відбулось за рахунок вмісту м'яса курятини (філе), яке володіє підвищеним вмісту білка і пониженим вмістом жиру порівняно з яловичим і свинячим м'ясом, яке використовувалось в інших досліджених зразках.

Загалом, НЗТО «Сирний» можна рекомендувати до вживання споживачам, для яких важливим є висока енергетична цінність харчового продукту. А НЗТО «Три м'яса» і НЗТО «Фітнес» можна рекомендувати тим споживачам, для яких важливим є високий вміст тваринного білка в продукті та покращена збалансованість харчового продукту.

Подальші дослідження доцільно присвятити пошуку шляхів спрощення виготовлення м'ясних кульок та способів внесення начинки. Також актуальним є обґрунтування технології виготовлення розробленого виду НЗТО та її машино-апаратного оформлення.

Висновки

Запропоновані в дослідженні новий зовнішній вигляд і внутрішня структура напівфабрикату, замороженого у тістовій оболонці, дають змогу покращити низку властивостей такого виду харчової продукції. Продукт має більш привабливий вигляд, кращі органолептичні властивості, а також покращену харчову й енергетичну цінність.

Новий зовнішній вигляд і внутрішня структура НЗТО «Класичний» обумовила підвищення результуючого бала за органолептичні властивості від 3,80 до 4,57. Додавання до рецептури НЗТО твердого сиру дало змогу, крім означених вище показників, поліпшити аромат, смак і соковитість продукту, чим була досягнута максимальна оцінка за органолептичні показники — 4,92 результуючого бала. Також завдяки цьому суттєво підвищено енергетичну цінність продукту порівняно з контрольним зразком (382,77 ккал/г проти 322,21 ккал/г). Використання овочевого фаршу дало змогу зробити продукт з оригінальним смаком та адаптувати його до потреб людей, які зацікавлені у збалансованому харчуванні (загальний бал за органолептичні властивості 4,64). Виготовлення м'ясних кульок з окремих видів м'ясної сировини у НЗТО «Три м'яса» дало змогу досягти оригінального приємного смаку й аромату готового продукту. На розроблений спосіб виготовлення

виробів із тіста з м'ясою начинкою отримано патент України на корисну модель № 60862.

Література

- Баль-Прилиппко, Л. В. (2011). Роль жирів у формуванні якісних характеристик м'ясної сировини. *М'ясні технології світу*, (1). 57—64. <https://scholar.google.com/citations?user=MjP4qRkAAAAJ&hl=uk>.
- Батраченко, О. В. (2017). Методологічна концепція розвитку технічних систем харчової промисловості. *Вісник Хмельницького національного університету: технічні науки*, 4. <http://www.irbis-nbuv.gov.ua>.
- Батраченко, О. В. (2022). *Взаємоузгодження робочих процесів в м'ясорізальних машинах. Монографія*. Черкаський державний технологічний університет. <https://er.chdtu.edu.ua/>.
- Голубков, П. С., Войтенко, О. К., Бурдо, О. Г. (2020). Моделювання термомеханічних процесів виготовлення пельменів спеціальної форми. *Scientific Works*, 84(1), 54—60. <https://journals.opu.edu.ua/index.php/swonaft/article/view/1869>.
- Гринченко, О. О., Дроменко, О. Б., Крайнюк, Л. М., Потапов, В. О., & Янчева, М. О. (2015). *Технологічні аспекти виробництва напівфабрикатів м'ясних посічених заморожених із використанням емульсійних систем*. https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/21642/1/Mon_Dromenko_%20Yancheva_2015.pdf.
- Дюкарева, Г. І., Акмен, В. О., Стрикова, Н. О., Белякова, Ю. М. (2008). Дослідження якості пельменів українських виробників та удосконалення властивостей клейковини тіста під час їх виробництва. *Збірник наукових праць ХДУХТ*, 1. <http://opaco.btu.kharkiv.ua>.
- Комарова, Т. В. (2013). Виробництво та споживання заморожених напівфабрикатів в Україні та світі. *Збірник наукових праць SWorld*, 13(3), 51—58. <https://repo.btu.kharkov.ua>.
- Мурликіна, Н. В. (2013). *Удосконалення технології м'ясних січених виробів шляхом використання емульгаторів ацилгліцеринної природи* (дис. ... докт. техн. наук). Харківський державний університет харчування та торгівлі, м. Харків. <https://uacademic.info/ua/document/0413U002720>.
- Погожих, М. І., Дюкарева, Г. І., Акмен, В. О., Яковлева, Н. І. (2008). Дослідження споживчих властивостей пельменів та підвищення якості тіста для їх виробництва. *Збірник наукових праць ХДУХТ*, 1. 28—32. http://opaco.btu.kharkiv.ua/cgi-bin/cgiirbis_64.exe?LNG=uk&P21DBN=TR1&I21DBN=TR1_PRINT&S21FMT=fullw_print&C21COM=F&Z21MFN=37310.
- Ярошевич, Т. С. (2022). Формування споживних властивостей пельменів та практичні аспекти їх ідентифікації. *Товарознавчий вісник*, 1(15), 138—147. <https://doi.org/10.36910/6775-2310-5283-2022-15-13>.
- Bozhko, N., Pasichnyi, V., Tischenko, V., Marynin, A., Shubina, Y., & Strashynskyi, I. (2021). Determining the nutritional value and quality indicators of meat-containing bread made with hemp seeds flour (*Cannabis sativa* L.). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(11(112)), 58—65. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.237806>.
- Go, H. Y., Lee, S. H., & Kim, H. Y. (2022). The effect of hot-air dried *Lentinula edodes* on the quality and oranoleptic properties of rolled-dumplings. *Food Science of Animal Resources*, 42(4), 593. doi: 10.5851/kosfa.2022.e24.
- Huang, L., Ding, B., Zhang, H., Kong, B., & Xiong, Y. L. (2019). Textural and sensorial quality protection in frozen dumplings through the inhibition of lipid and protein oxidation with clove and rosemary extracts. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(10), 4739—4747. doi: 10.1002/jsfa.9716.
- Li, Y., Ding, G., Yokoyama, W., & Zhong, F. (2018). Characteristics of annealed glutinous rice flour and its formation of fast-frozen dumplings. *Journal of Cereal Science*, 79, 106—112. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.09.016>.
- Lin, L., Zhang, X., Zhao, C., & Cui, H. (2016). Liposome containing nutmeg oil as the targeted preservative against *Listeria monocytogenes* in dumplings. *RSC advances*, 6(2), 978—986. <https://doi.org/10.1039/C5RA22098J>.

Lin, Z., Geng, D. H., Qin, W., Huang, J., Wang, L., Liu, L., & Tong, L. T. (2021). Effects of damaged starch on glutinous rice flour properties and sweet dumpling qualities. *International Journal of Biological Macromolecules*, 181, 390—397. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.03.160>.

Pan, Z., Bai, Y., Xu, L., Zhang, Y., Lei, M., & Huang, Z. (2023). The Effect of Freeze-Thaw Cycles on the Microscopic Properties of Dumpling Wrappers. *Foods*, 12(18), 3388. <https://doi.org/10.3390/foods12183388>.

Sahin, B., & Schieberle, P. (2019). Characterization of the key aroma compounds in yeast dumplings by means of the sensomics concept. *Journal of agricultural and food chemistry*, 67(10), 2973—2979. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b00556>.

Wang, H., Xiao, N., Wang, X., Zhao, X., & Zhang, H. (2019). Effect of pregelatinized starch on the characteristics, microstructures, and quality attributes of glutinous rice flour and dumplings. *Food Chemistry*, 283, 248—256. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.047>.

Wang, H., Zhang, J., Wang, R., Liu, X., Zhang, Y., Sun, J., ... & Zhang, H. (2021). Improving quality attributes of sweet dumplings by germination: Effect of glutinous rice flour microstructure and physicochemical properties. *Food Bioscience*, 44, 101445. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101445>.

Wang, Y., Liu, S., Yang, X., Zhang, J., Zhang, Y., Liu, X., ... & Wang, H. (2022). Effect of germination on nutritional properties and quality attributes of glutinous rice flour and dumplings. *Journal of Food Composition and Analysis*, 108, 104440. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104440>.

0УДК 637.03

EFFECTIVE STRATEGY FOR THE DEVELOPMENT OF POULTRY PROCESSING ENTERPRISES

I. Oshchypok

Lviv National University named after I. Franko

Key words:

*Poultry
Slaughter
Processing
Automated line
Equipment
Offal*

Article history:

Received 09.01.2025
Received in revised form
24.01.2025
Accepted 13.02.2025

Corresponding author:

I. Oshchypok

E-mail:

ihosh.ypok@gmail.com

Citation: Ощипок І. М. (2025). Ефективна стратегія розвитку птахопереробних підприємств. *Наукові праці НУХТ*, 31(1), 168—184.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-1-16

ABSTRACT

The development of poultry processing enterprises is analyzed in the article. The efficiency of poultry processing and the success of the enterprise depend on the quality of the final product. The presence of modern equipment significantly increases the efficiency and productivity of work, starting from slaughterhouse equipment and ending with small tools for poultry processing. The modern system of poultry slaughter, thanks to the automated evisceration and cooling processes, allows to obtain a significant increase in productivity and a reduction in processing time. The technological process of poultry meat processing includes a number of large links of various purposes with technological equipment: starting with breeding and fattening of poultry — delivery to poultry processing enterprises, pre-slaughter aging — slaughter — processing — cooling or freezing. Using modern equipment, effective management practices and an unwavering commitment to quality and safety, manufacturers can optimize their operations and achieve unprecedented success in a competitive market. Modern poultry processing processes are discussed in the article: stunning, the effectiveness of which was determined by the strength and frequency of current or the use of gas, requirements for slaughter, research on scalding processes, evisceration on rotary-type machines with a new by-product processing system. Internal quality control measures are shown, ensuring the integrity of the final product, which undoubtedly involves regular inspections, thorough sanitation protocols and constant monitoring of production processes to identify and address any potential hazards. Checking the presence of various signs of contamination or equipment malfunction should be actively detected and eliminated. The company will then earn a reputation for producing safe, high-quality products that meet or exceed industry standards. It is shown that when reaching a new level of production, it should be taken into account that efficiency is the key to success in poultry processing processes.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-1-16

ЕФЕКТИВНА СТРАТЕГІЯ РОЗВИТКУ ПТАХОПЕРЕРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВ

І. М. Ощипок

Львівський національний університет ім. І. Франка

Ефективність переробки птиці та успіх роботи підприємства залежать від якості кінцевого продукту. Наявність сучасного обладнання значно підвищує ефективність і продуктивність праці, починаючи від обладнання бойнь і закінчуючи невеликими інструментами для переробки птиці. Сучасна система забою птиці, завдяки автоматизованим процесам потрошіння та охолодження, дає змогу отримати значне підвищення продуктивності та скорочення часу переробки. Технологічний процес переробки м'яса птиці включає ряд великих ланок різного призначення з технологічним оснащенням, починаючи з вирощування та відгодівлі птиці — доставки на птахопереробні підприємства, передзабійної витримки — забою — переробки — охолодження чи заморожування. Використовуючи сучасне обладнання, ефективні методи управління і непорушну відданість якості та безпеці, виробники можуть оптимізувати свою діяльність і досягти безпрецедентного успіху на конкурентному ринку.

Розглянуто сучасні процеси переробки птиці: оглушення, ефективність якого визначається силою та частотою струму чи використанням газу та вимог до забою, ошпарювання, потрошіння на машинах роторного типу з новою системою обробки субпродуктів. Проаналізовано заходи внутрішнього контролю якості, забезпечення цілісності кінцевого продукту, що безсумнівно передбачає регулярні перевірки, ретельні санітарні протоколи та постійний моніторинг виробничих процесів для виявлення та вирішення будь-яких потенційних небезпек. Підкреслено, що при перевірці на наявність різних ознак забруднення або несправності обладнання слід активно виявляти та усувати їх, тоді підприємство заслужуватиме на репутацію виробника безпечної високоякісної продукції, яка відповідає галузевим стандартам або перевищує їх. Показано, що при досягненні нового рівня виробництва слід враховувати те, що ефективність є ключем до успіху в процесах переробки птиці.

Ключові слова: *птиця, забій, переробка, автоматизована лінія, обладнання, субпродукти*

Постановка проблеми. Важливість роботи всієї системи переробки м'яса птиці в сировинну продукцію, готову до відпуску, досягнення оптимальної продуктивності вимагає не тільки кваліфікованих працівників і найсучаснішого обладнання, але й цілісного підходу до ефективності та якості. Незважаючи на те, що сучасне обладнання, безсумнівно, кардинально змінює ситуацію, ефективне управління не менш важливе для оптимізації операцій на птахопереробних підприємствах. Це включає в себе всю наявну номенклатуру: від планування, залучення відповідно підготовленого персоналу та розробки завдань з управління ланками постачання, оснащення та обслуговування об'єктів виробництва.

Є, звичайно, багато не вирішених або частково вирішених питань, наприклад, вилов і доставка птиці, оглушення, ошпарювання і навіть добре науково й технічно розроблена холодильна обробка птиці вимагає осучаснення.

Розвиваючи культуру контролю та постійного вдосконалення процесів виробництва, слід забезпечувати безперебійне та ефективне виконання всіх технологічних операцій. Для цього на підприємствах з переробки птиці потрібно запроваджувати комплексну програму підготовки своїх працівників, яка охоплює весь цикл виробництва: від протоколів безпеки харчових продуктів до процедур експлуатації обладнання. Інвестуючи в професійний розвиток своїх працівників, підприємство значно скорочує кількість нештатних ситуацій і помилок на виробництві. Це забезпечить підвищення продуктивності та покращення якості готової продукції.

Незважаючи на високу оцінку продукції птахівництва в регіоні, на нашу думку, виробники мають значні резерви для підвищення своєї конкурентоспроможності. Для цього необхідно використовувати організаційно-економічний механізм, основним важелем якого має стати формування конкурентної стратегії (Savchenko, Basiurkina, & Kwilinski, 2019). Головною стратегічною метою таких підприємств птахівництва має бути утвердження своїх позицій на ринку м'яса птиці та його продуктів переробки шляхом розвитку дистрибуційної мережі, створення позитивного іміджу та формування власного бренду.

Крім того, доцільно постійно здійснювати моніторинг впровадженої маркетингової політики та оцінювати її ефективність (Агапова, 2020). Це дасть змогу швидко та ефективно керувати якістю і асортиментом кінцевої продукції відповідно до вимог ринку, а також систематично розвивати створені асоціації, враховуючи весь комплекс факторів, що беруть участь у цьому процесі.

Застосування такого підходу дасть змогу промисловим підприємствам птахівництва вирішити актуальну проблему виробництва високоякісної продукції, що відкриє їм шлях до успішного виходу на світовий ринок.

Економічний ефект досягається шляхом розширення масштабів виробництва, поглиблення спеціалізації підприємств, підвищення якості та конкурентоспроможності продукції, зниження витрат, зокрема витрат на реалізацію продукції, визначення пріоритетних напрямів інвестування, впровадження досягнень науково-технічного прогресу в усіх секторах, вирішення соціальних питань, насамперед підвищення мотивації до праці та забезпечення матеріальної підтримки кожного працівника відповідно до його трудового, майнового й грошового внеску.

Є всі підстави вважати, що технологічні інновації у промисловому птахівництві, а також міжгалузева інтеграція дозволять підприємствам розширити сферу впливу в інших регіонах і підвищити інвестиційну привабливість регіону в цілому (Мельник, 2002).

Пріоритет птахівництва за підтримка аграрного сектору з боку держави, яке вже довело свої конкурентні переваги, якщо порівняти з виробництвом яловичини, має стати правилом (Мельник, 2002). Наступним важливим напрямом аграрної політики у сфері птахівництва має стати усунення «торговельних війн» між регіонами, що загострилися в цій галузі. Необхідно встановити правила підтримки аграрного сектору на регіональному рівні, які б виключали можливість демпінгу одного регіону на ринку іншого.

Підвищення конкурентоспроможності місцевої продукції птахівництва безпосередньо залежить від можливості впровадження сучасних технологій, заснованих на використанні вискоєфективних і якісних комбікормів, які займають найбільшу частку у собівартості виробництва м'яса птиці.

Також необхідно створити регіональний резерв зернових кормів, відрегулювати ціни на корми, зменшити податок на додану вартість для компонентів кормів, що ввозяться з інших територій України і з-за кордону, і які або не виробляються в Україні, або виробляються в недостатній кількості та неналежної якості, встановити пільги на тарифи для залізничних перевезень м'яса птиці, кормів і їх компонентів (Кириченко, 2017).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Важливим завданням у роботі птахопереробних підприємств є ефективність переробки, а успіх вимірюється якістю кінцевого продукту (Tkachenko, Rodina, & Savchenko, 2018). Ключовою стратегією оптимізації діяльності підприємств стає використання передового обладнання для забою птиці і впровадження суворих заходів контролю якості (Віннікова, Поварова, & Синиця, 2020). Потужності птахопереробних підприємств відіграють важливу роль у перетворенні сирого м'яса птиці на продукцію, готову для реалізації (від курячих нагетсів до індичих сосисок). Однак досягнення оптимальної продуктивності вимагає не тільки кваліфікованих працівників і найсучаснішого обладнання, але й цілісного підходу до ефективності та якості (Кириченко, 2017; Маньковський, & Антонюк, 2014; Savchenko, Basiurkina, & Kwilinski, 2019).

В основі будь-якого успішного підприємства з переробки птиці лежить його номенклатура обладнання. Інвестиції в сучасне обладнання можуть значно підвищити ефективність і продуктивність, починаючи від обладнання бойнь і закінчуючи невеликими інструментами для переробки птиці (Mielnik, Dainty, Lundby, & Mielnik, 1999). Новітнє обладнання для забою птиці, оснащене передовими технологіями, такими як автоматизовані лінії обробки та механізми точного різання. Використовуючи ефективність нових технологій, підприємства можуть оптимізувати свою роботу, зменшивши витрати на оплату праці та мінімізувавши помилки персоналу. Сучасна система забою птиці, завдяки автоматизованим процесам потрошіння та охолодження, значно підвищує продуктивність і скорочує тривалість переробки (Tkachenko, Rodina, & Savchenko, 2018). Те, на що раніше витрачалися години, тепер можна виконати всього за кілька хвилин, що дає змогу підприємству задовольняти зростаючий попит без шкоди для якості.

Забезпечення стандартів якості та безпечності при переробці м'яса птиці має першорядне значення в галузі переробки. Дотримання державних стандартів, впровадження заходів внутрішнього контролю якості, забезпечення цілісності кінцевого продукту є безсумнівним і передбачає регулярні перевірки (Баль-Прилипка, 2012), ретельні санітарні протоколи та постійний моніторинг виробничих процесів для виявлення та вирішення будь-яких потенційних загроз (Baker, 2020). Перевіряючи наявність будь-яких ознак забруднення або несправності обладнання, виявляючи та активно вирішуючи ці проблеми, підприємство матиме репутацію виробника безпечної та високоякісної продукції, яка відповідає галузевим стандартам або перевищує їх (Пешук, 2021).

Керування підприємством з переробки м'яса птиці вимагає тонкого балансу між технологією, управлінням і контролем якості (Savchenko, Basiurkina, & Kwilinski, 2019; Tkachenko, Rodina, & Savchenko, 2018). Використовуючи сучасне обладнання, ефективні методи управління та непохитну відданість якості та безпеці, виробники можуть оптимізувати свою діяльність і досягти безпрецедентного успіху на конкурентному ринку. Отже, діюче підприємство, бажаючи вивести свою діяльність на новий рівень, повинне забезпечувати ефективність, яка є ключем до успіху в процесах переробки птиці (Olukosi, Helmbrecht, & Olori, 2019).

Підкреслюючи важливість галузі птахівництва в рамках забезпечення продовольчої безпеки України, завдяки низьким матеріальним затратам на виробництво, високу продуктивність та швидкий інноваційний розвиток галузі, не можна оминути той факт, що галузь птахівництва займає суттєвий відсоток серед експорту продукції нашої країни (Череп, Потопа, & Ткаченко, 2009).

Технологічні чинники відображають основні особливості діяльності підприємств м'ясопереробної галузі. Одним із ключових напрямів зменшення матеріаломісткості продукції є комплексна переробка сировини, що передбачає повторне використання відходів і виготовлення супутньої продукції.

Виробництво підприємств м'ясопереробної галузі має сезонний характер, що зумовлено залежністю від розвитку тваринництва, зокрема вирощування худоби й птиці. Органічна природа технологічних процесів вимагає ретельного вибору операцій, у межах яких можна виміряти кількісні та якісні параметри виробництва, зокрема щодо напівфабрикатів, та визначити їх собівартість (Лисенко, 2017).

Процеси виробництва є складними й безперервними. Сучасні м'ясопереробні підприємства оснащені обладнанням, що забезпечує реалізацію складних і автоматизованих технологічних операцій. Завдяки науково-технічному прогресу та впровадженню новітніх технологій, таких як високий тиск, глибоке охолодження, ультразвук, НВЧ-струми й мембранне розділення, значно скорочується тривалість виробничих циклів і підвищується якість продукції (Шуст, 2011).

Висока матеріаломісткість м'ясної продукції підтверджується тим, що витрати на сировину та основні матеріали становлять 70—75% від загальної собівартості. У процесі переробки худоби й птиці утворюється значна кількість вторинної сировини (обрізки, шкури, кров, пір'я тощо), яку не завжди використовують раціонально. Її обсяг може перевищувати 30% від загальної кількості сировини (Логоша, 2012). Залежно від характеристик сировини та її ветеринарно-санітарного стану вторинні ресурси перетворюються на харчову, кормову або технічну продукцію.

Продукція окремих цехів може слугувати сировиною чи напівфабрикатами для інших підрозділів. Наприклад, основна продукція — м'ясо (яловичина, свинина, баранина, птиця тощо), використовується як сировина в ковбасному, консервному або кулінарному виробництві. Внутрішньовиробничі ціни на сировину впливають на кінцеву вартість такої продукції, як ковбаси, консерви чи кулінарні вироби (Маньковський, & Антонюк, 2014).

Особливістю діяльності підприємств м'ясопереробної галузі є те, що бізнес-процеси формуються на рівні кожного структурного підрозділу, орієнтованого на задоволення потреб споживачів. Ці процеси відрізняються тим, що їх результати обмінюються на грошові кошти, забезпечуючи рентабельність діяльності (Лозовський, 2014).

Конкурентоспроможність слід визначати як властивість продукту, яка характеризується ступенем задоволення реальних і потенційних потреб порівняно з подібними товарами, представленими на ринку. Вона визначає здатність продукції витримувати конкуренцію серед аналогічних об'єктів на цьому ринку (Логоша, 2012).

Зростання конкурентоспроможності продукції проявляється у її проникненні на нові ринки та їх завоюванні. Як відомо, птахівництво є однією з найбільш ефективних і швидкоокупних галузей. Забійний вихід м'яса птиці в середньому становить 66% живої ваги, що у 1,5 рази більше, ніж у великої рогатої худоби. У зв'язку з цим птахівництво є найбільш чутливим до ендемічних та екзогенних факторів, які визначають конкурентні переваги. Ці переваги можна оцінювати за різними характеристиками: якістю, ціною, собівартістю виробництва (Родіна, 2022).

Кожну з цих конкурентних переваг потрібно постійно зміцнювати, цьому сприяє впровадження стратегічного маркетингового управління (Шуст, 2011). Пріоритетним показником конкурентоспроможності продукції залишається якість. Відсутність професійної маркетингової служби на більшості підприємств птахівництва призводить до втрати частини можливих переваг (Баль-Прилипка, Бесулін, & Куцак, 2003).

Попри це, українським підприємствам потрібно гідно конкурувати як на внутрішньому, так і на зовнішньому ринках. Необхідно визначити перспективні напрями стратегічної поведінки вітчизняних виробників, які б сприяли забезпеченню їх переваг або рівних можливостей на світовому ринку. Важливо застосовувати сучасні технології оглушення, зокрема в газовому середовищі (Ноєн та ін., 1999).

Птахофабрикам потрібно активно долучитися до процесу реформування системи сертифікації та впровадження систем контролю безпеки продукції на фермах (Мельник, 2002). На міжнародному рівні найбільш визнаною та поширеною є концепція НАССР (аналіз ризиків і критичні контрольні точки).

Натепер вітчизняні харчові підприємства, які прагнуть вийти на закордонні ринки, часто стикаються з вимогою використовувати систему НАССР, адже принципи та механізми, закладені в ній, значно знижують ризик загрози для життя та здоров'я споживачів продукції (Родіна, 2022). Варто зазначити, що птахофабрики постачають свою продукцію в інші регіони України і на експорт.

Зараз можна говорити про посилену конкуренцію на внутрішньому ринку не з боку імпорту, а з боку продукції інших регіонів України, що загострює низку проблем, притаманних птахофабрикам різних областей:

- традиційна орієнтація на стратегії економії витрат;
- сильна залежність формування цін на кінцеву продукцію від стану сировинних ринків і застосовуваного обладнання у зв'язку з матеріалоємністю продукції.

Мета статті: дослідити сучасні напрями розвитку технологічних процесів на птахопереробних підприємствах для забезпечення високих стандартів якості та безпечності м'яса птиці; проаналізувати новітню систему забою з автоматизованими процесами потрошіння та охолодження птиці на основі збільшення продуктивності та скорочення часу переробки; вивчити обладнання, яке включає сучасну ком-

плексну систему переробки із застосуванням автоматизованих процесів оглушення, знекровлення, ошпарювання, потрошіння та сприяє отриманню субпродуктів птиці високої якості.

Матеріали і методи. Використовувались методологічні підходи до оцінки рівня розвитку ринків продукції птахівництва, моделі формування технології переробки птиці із застосуванням високопродуктивного обладнання та необхідності впровадження ефективних механізмів підвищення кваліфікації працівників, технології управління і контролю якості. Сукупність загальнонаукових і спеціальних методів наукового дослідження, зокрема логічного узагальнення, методи індукції та дедукції — для визначення і моделювання технологічних параметрів ліній переробки птиці, та комплексної оцінки виробництва.

Викладення основних результатів дослідження. Технологія переробки м'яса птиці включає ряд великих ланок, які мають відповідати міжнародним і вітчизняним вимогам до забою худоби різного призначення (European Food and Safety Authority, 2004; Council Directive, 1993) з технологічним оснащенням: починаючи з вирощування та відгодівлі птиці — доставки на птахопереробні підприємства, передзабійної витримки — забою — переробки — охолодження чи заморожування (Пасічний, 2009). Останні роки практично в усіх ланках технології переробки м'яса птиці досягнуто суттєвих результатів (Hoen, & Lankhaar, 1998; Hillebrand, Lambooy, & Veerkamp, 1996). Більшість вітчизняних і зарубіжних птахопереробних підприємств оснащені ефективним обладнанням, що відповідає сучасному рівню розвитку науки і техніки (Bilgili, 1999; Blackmore, & Delaney, 1988): задана послідовність технологічних операцій, механізоване переміщення птиці просторовими конвеєрами від однієї операції до іншої, автоматизовані операції знепірення, потрошіння, миття тушок, санітарної обробки з високим рівнем механізації та необхідною якістю обробки тушок (Шуст, 2011). Проте переважна більшість ефективних науково-технічних удосконалень у галузі переробки м'яса птиці, незважаючи на очевидну корисність і простоту, не використовуються в галузі (Шуст, 2011). Однією з причин неповного використання досягнень науки і техніки є їхня слабка популяризація в галузевій літературі, відсутність відповідних рекомендацій, що особливо містять конкретні пропозиції. Щоправда, і на птахопереробних підприємствах не завжди виконуються очевидні ефективні заходи (Hillebrand, Lambooy, & Veerkamp, 1996). Птицю відловлюють у приміщеннях без належної обережності в денний час, а не рано вранці чи вночі; перевозять птицю до цехів переробки пристосованим, а не спеціалізованим транспортом, миття і дезінфекцію тари й транспортних засобів після вивантаження птиці часто не виконують що, природно, відображається на її мікробіологічному стані (Мельник, 2002). При перевезенні птиці на великі відстані та при великій продуктивності ліній переробки, наприклад, 6000 гол/год і більше, виникають серйозні труднощі. З одного боку, для мінімізації транспортних витрат птицю бажано підвозити великими партіями великовантажними спеціалізованими автомобілями, але при цьому загальна тривалість знаходження птиці в стресових умовах (відлов, навантаження, транспортування та розвантаження) досягає 4—8 годин. У таких умовах неминуче зниження її живої маси та маси м'яса, а також і збільшений падіж птиці. За несприятливих погодних умов, тобто при мокрій або морозній погоді, падіж може досягати 5—10%

від загальної кількості птиці, що транспортується. Цих втрат уникають при кондиціонуванні кузова автомобіля з птицею та передзабійному переміщенні птиці з регульованими температурно-вологісними умовами доставки і передзабійного утримання.

На підвісних просторових конвеєрах для переробки птиці останніми роками встановлюють високочастотні регулятори швидкості, що змінюють швидкість конвеєра. Це зручно при змінному попиті та випуску готової продукції на замовлення. При великій довжині конвеєра, у тому числі на лініях охолодження птиці, на одній підвісці ефективно застосовують електронні регулятори натягу ланцюга. Це значно знижує і навіть майже виключає можливість його розриву, тобто виходу з ладу конвеєра (Blackmore, & Delaney, 1988).

Наступною технологічною операцією, під час якої часто знижується якість обробки тушок, є оглушення (Gregory, & Wotto, 1990). Несприятливий вплив електричного струму промислової частоти — 50 Гц на організм птиці проявляється у судорожному скороченні м'язів, пригніченні серцевої та дихальної діяльності. Як наслідок, на тушках з'являються синці, точкові крововиливи та переломи, зумовлені різким скороченням м'язів (Bilgili, 1999). Через припинення діяльності серця практично у всіх тушок кінчики крил стають червоними від крові, що залишилася в них (Saveniye, Lambooiy, Pieterse, & Korft, 1999). Встановлено, що ефективність оглушення птиці визначається силою та частотою струму, а також часом його дії (Gregory, Wilkins, & Wotton, 1991). Порівняльний аналіз якості тушок птиці, оглушеної традиційним способом і струмом високої частоти (2000 Гц), показав (Lambooiy та ін., 1999; Croft, 1952), що при оглушенні струмом високої частоти значно зменшується кількість синців і переломів у тушках (практично не було тушок з червоними кінчиками крил) (Kranen та ін., 2000). Вважають, що струм високої частоти діє переважно на мозок птиці, а не на серцево-судинну систему, як при оглушенні струмом промислової частоти (Gregory, Wilkins, & Wotton, 1991; Croft, 1952). Тому під час оглушення серце птиці продовжує працювати і знекровлення тушки проходить повніше. Крім того, при оглушенні струмом високої частоти знерухомлення птиці настає при меншому напруженні і відповідно меншій силі струму (Anil, & McKinstry, 1992). За отриманими даними, ефективне знерухомлення птиці можна забезпечити і при промисловій частоті струму, якщо зменшити напругу до 60 В та збільшити час дії струму до 1,5—2 хвилин. Зрозуміло, що це потребує зміни конструкції апаратів оглушення — збільшення розмірів ванни з електролітом (Saveniye, Lambooiy, Pieterse, & Korft, 2000).

Вплив газового середовища на оглушення птиці є важливим аспектом їх промислової переробки. Цей метод використовується з метою забезпечення гуманного поводження з птахами, зменшення їхнього стресу, а також покращення якості м'яса (Hoen, & Lankhaar, 1998). Нижче наведено основні аспекти впливу газового середовища на оглушення птиці (рис. 1).

Діоксид вуглецю часто застосовується для оглушення. Висока концентрація CO₂ викликає втрату свідомості через зниження рівня кисню в крові. Проте занадто висока концентрація може спричинити дискомфорт у птахів перед втратою свідомості. Інертні гази (азот, аргон) використовуються для створення гіпоксичного середовища. Ці гази позбавляють кров кисню, що призводить до втрати свідомості

без подразнення. Комбіновані гази часто застосовуються суміш CO_2 та інертних газів для досягнення ефективного оглушення.

Газові методи вважаються гуманнішими порівняно з іншими способами, оскільки птах втрачає свідомість поступово. Менший стрес завдяки зниженню рухової активності під час оглушення, якість м'яса покращується (менше гематом, синців тощо). Покращення умов праці працівників, які не мають прямого контакту з птахами під час забою.

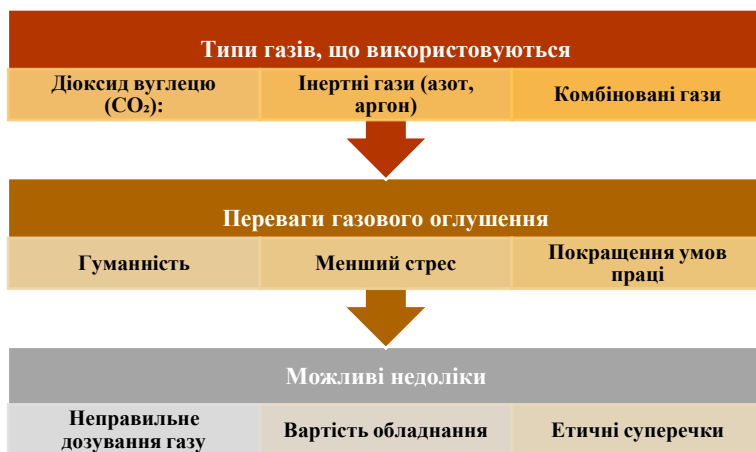


Рис. 1. Типи, переваги та можливі недоліки газового оглушення птахів

Серед можливих недоліків газового оглушення — неправильне дозування газу. Якщо концентрація газу недостатня або умови використання недотримані, птахи можуть відчувати стрес. Обладнання для газового оглушення може бути дорогим у встановленні та обслуговуванні.

Етичні дискусії полягають у тому, що використання високих концентрацій CO_2 можуть викликати дискомфорт у птахів. До факторів, що впливають на ефективність газового оглушення віднесемо:

- концентрація газу та час експозиції;
- тип птахів (кури, індички, качки тощо) та їхній фізіологічний стан;
- технологічне обладнання та умови його експлуатації.

У багатьох країнах застосування газового оглушення регулюється нормативами, такими як стандартами Європейського Союзу (EU Regulation 1099/2009), які визначають допустимі методи оглушення для забезпечення добробуту тварин.

Газове оглушення є ефективним і гуманним методом, якщо дотримуються правильних технологічних умов. Воно дає змогу зменшити стрес птахів, покращити якість продукції та відповідати етичним стандартам, однак потребує чітких процедур і належного контролю (Lambooij, Pieterse, Hillebrand, & Dijksterhuis, 1999; Lambooij та ін., 1999).

Вимоги до забою птиці:

- розріз біля горла або подвійний розріз на рівні шиї;
- забезпечення виконання операції для будь-якої швидкості руху конвеєра та маси птиці;

- забезпечення виконання всіх операцій для птиці, підданої оглушенню електричним струмом, або анестезії в контрольованій газовій атмосфері.

Точний і послідовний розріз — це крок, необхідний для початкового процесу забою. Розріз повинен забезпечити повне знекровлення птиці до початку ошпарювальної операції. Діючі установки Marel дають змогу надрізати шийку (вени та артерії розрізають, а стравохід і трахея залишаються цілими), якщо порівняти з працюючими установками, які перерізають горло (вени, артерії, трахею і стравохід). Розріз на горлі і подвійний розріз на шії зменшують втрати маси птиці. Очевидно, що ріжучий механізм фірми Marel відповідає описаним вимогам.

Під час ошпарювання тушок при високій температурі, так званому «жорсткому ошпарюванню», що найчастіше практикується в нашій країні, з поверхні тушок повністю злущується епідерміс і після холодильної обробки вона набуває рожево-червоного забарвлення. При м'яких режимах ошпарювання, наприклад, при температурі 51—52 °C, епідерміс залишається на поверхні тушки, яка після холодильної обробки має природне забарвлення. Однак ефективне ослаблення сили утримання оперення при температурі 52 °C досягається за рахунок його впливу щонайменше 3,5—4 хвилини. На діючих серійних установках для ошпарювання птиці моделей К7-ФЦЛ-6/5, К7-ФЦЛ-6/5-01 важко забезпечити такий режим ошпарювання.

За результатами проведених досліджень установка ошпарювання має відповідати таким вимогам: забезпечити тривалість ошпарювання не менше 4 хв; каркас установки має бути досить жорстким, щоб у ньому можна було зміцнити ділянку конвеєра, яка проходить через установку і може бути автономною, тобто він не повинен кріпитися до конструкцій підвісного конвеєра; установка повинна бути повністю закритою і мати кришки, що відкидаються, для огляду, миття і дезінфекції ванни; нагрівання води у ванні може бути від електронагрівачів, гарячою водою або паром, краще через теплообмінники; перемішування води у ванні повинно забезпечуватись активаторами, паро-повітряною сумішшю або циркуляцією води насосами; слід передбачити можливість початкового заповнення ванни гарячою водою.

Запропоновані понад 40 років тому машини для знепірнення птиці типу «All round» (дискові автомати) виявилися дуже вдалим в конструктивному виконанні і використовуються дотепер без істотних змін. Немає підстав очікувати найближчим часом на появу принципово нових машин для знепірнення птиці: практично всі вітчизняні та зарубіжні моделі дискових автоматів забезпечують повне видалення оперення та високу якість обробки (Olukosi, Helmbrecht, & Olori, 2019).

Машини роторного типу для потрошіння птиці: вирізують клоаку, розрізають черевну порожнину, виймають нутрощі, миють, остаточно обробляють. На вітчизняних підприємствах використовуються машини зарубіжного виробництва компаній Сторк, Мейн, Сістимейт Ньюмара (Нідерланди). Це складне і дороге обладнання. Для забезпечення хорошої якості потрошіння застосування його економічно виправдане за високої продуктивності лінії — 6000, 9000 і більше голів за годину або дорогою робочою силою. В інших умовах потрошіння краще виконувати вручну. Як свідчать розрахунки, під час обґрунтування інвестицій у будівництво цехів продуктивністю лінії переробки 3000 голів на годину, витрати на придбання роторних машин для потрошіння не окупуваються до їх зносу, тобто протягом семи років.

При використанні засобів «малої механізації»: ножів для розрізання шкіри ший, вилок для вилучення нутрошків, машин для розрізання, миття та чищення шлунків пневматичних або механічних ножиць для відрізання ший, дзеркал на ділянці ветсанекспертизи тощо, а також за чіткої організації праці навіть за ручного потрошіння продуктивність праці буде порівняно високою.

Розвиток техніки переробки птиці тривалий час був спрямований на механізацію та інтенсифікацію виробничих процесів. Питанням підвищення якості м'яса, його мікробіологічного стану приділялося менше уваги. Останнім часом ця тенденція стала змінюватися, точніше, дещо зрушуватися на краще. Наприклад, на багатьох птахофабриках, особливо великої продуктивності, миють і дезінфікують контейнери (ящики) та транспорт після транспортування птиці на переробку (Lambooij та ін., 1999). При традиційному способі потрошіння комплект нутрошків після вилучення з тушки залишається висіти на спині до проведення ветеринарно-санітарного контролю. Тільки наприкінці потрошіння кишечник відрізають і скидають у жолоб чи горловину бака для передування відходів. Основний недолік такого способу потрошіння — забруднення поверхні тушок вмістом кишечника, а в разі розриву жовчного міхура - жовчю. Якщо забруднення тушки вмістом можна відмити при подальшій обробці, то зелена пляма від жовчі не відмивається і тушки з таким забрудненням змушені спрямовувати на промислову переробку, що позначається на економічній ефективності виробництва.

Компанією Сторк Мейн розроблено нову систему потрошіння Nu-Tech. За цією системою нутрошкі відразу після виймання відокремлюються від тушки і навішуються на підвіски конвеєра для оброблення потрухів, причому серце і легені розташовуються над затискачем підвіски для потрухів, а печінка і шлунок з кишечником нижче підвіски. В результаті розбирання потрухів можна проводити простіше і швидше, при цьому забруднення тушки та потрухів вмістом кишечника і жовчю виключається. В принципі систему Nu-Tech можна використовувати і при ручному потрошінні — відразу після вилучення нутрошків не залишати їх на тушці, а навішувати на окремий конвеєр для їх розбирання (Lambooij та ін., 1999). На рис. 2 показана підвіска конвеєра для отримання потрухів.



Рис. 2. Підвіска конвеєра для отримання потрухів

Однак таке обладнання — конвеєр для розбирання потрухів, повинен мати підвіски особливої конструкції, які в нашій країні не виготовляють і поки що не розробляють.

Для потрошіння птиці в системі Nu-Tech фірма Сторк пропонує машину Nuova для вилучення нутрощів, яка відрізняється унікальною формою вузла вилучення нутрощів і забезпечує точне та повне виконання цієї операції. Нутрощі витягуються разом із стравоходом, зобом і легеньми. У машину Nuova тушки птиці надходять спиною до центру машини, що забезпечує високу якість потрошіння не тільки бройлерів, але також курей-несучок і цесарок. За даними компанії, за системою Nu-Tech на машині Nuova можна обробляти птицю живою масою 0,7—4,5 кг. За системою Nu-Tech кишечник і жовчний міхур відокремлюються від тушки відразу після виймання для ветеринарної інспекції. При цьому ветеринарний контроль потрухів здійснюється значно простіше та якісніше. Оскільки конвеєри потрошіння і розбирання нутрощів у системі Nu-Tech рухаються синхронно, то до закінчення ветсанекспертизи можна визначити, від якої тушки відокремлений кожен комплект нутрощів.

Потрухи є популярною та економічно ефективною частиною переробки птиці, тому для цього важливо всю отриману сировину від птиці ефективно використовувати.

Обробка субпродуктів Nuova включає такі операції:

- модульна переробка субпродуктів: ручна, напіваавтоматична або повністю автоматична;
- оптимальна продуктивність, якість і гігієна;
- дуже гнучкий монтаж.

Обладнання підходить для виробництва субпродуктів, призначених для споживання людиною або для виробництва кормів для домашніх тварин. При цьому гарантується висока якість субпродуктів і оптимальний рівень гігієни. Після отримання субпродукти необхідно промити, охолодити і транспортувати тушки.

На лініях зарубіжного виробництва, наприклад компаній «Сторк» або «Мейн», птицю миють зовні і всередині порожнини на машинах роторного типу. На лініях вітчизняного виробництва миють лише поверхню тушки за допомогою форсунок зрошення спрямованим потоком води. Якість миття залежить від витрати води й тиску розпилювача. Однак за такого способу миття якість обробки залишається низькою. Частково цей недолік, тобто неповне миття тушок, усувається під час охолодження птиці у воді, точніше у ванні попереднього охолодження, де за технологічною інструкцією тушки охолоджуються та промиваються водопровідною водою. У промислових умовах птицю охолоджують у крижаній воді, або в повітрі при природній або примусовій циркуляції, або в повітрі насиченому вологою, при примусовій вентиляції. Останній спосіб називають випарним, повітряно-крапельним або гідроаерозольним охолодженням. Всі способи науково й технічно добре опрацьовані, хоча на практиці науково-технічні рекомендації, на жаль, часто не виконуються. Крижану воду після одноразового проходження птиці через ванну рекомендують зливати в каналізацію для поліпшення санітарного стану охолоджених тушок. Оскільки зливати велику кількість холодної води економічно недоцільно, підприємства мимоволі обмежують її кількість. Тепер слід переконувати підприємства в необхідності застосування циркуляції води. Наприклад, за розрахунком

теплого балансу лінії переробки бройлерів продуктивністю 3000 гол/год через ванну охолодження крижаною водою має проходити за годину не менше 40 м³ води з температурою на вході 1—2 °С та на виході 6—8 °С. Фактично при прямому скиданні води в каналізацію підприємство використовує високопродуктивний насос. Крім того, холодильне обладнання обирається з теплообмінником, тепловий баланс якого враховує витрати холоду на охолодження м'яса, не враховуючи обсягу води, який має пройти через теплообмінник із проміжним теплоносієм. Через це на підприємстві доводиться змінювати не тільки відцентровий насос більшої потужності, а й монтувати інший теплообмінник більшої продуктивності. При застосуванні плівкових теплообмінників подібна проблема не виникає, тому при виборі холодильного обладнання підприємствам краще перевіряти його потужність хоча б за температурним тепловим балансом, наведеним у спеціальній літературі.

Зазвичай, замовник віддає перевагу фірмі, яка запропонувала менші інвестиційні витрати. Проте всі відомі нам фірми використовують практично одне й те саме холодильне обладнання. Як правило, це компресори компаній Bitzer, Copeland (ФРН), Tanenrop (Франція), теплообмінне обладнання (конденсатори та охолоджувачі повітря) компаній Alfa Laval (Італія), Günter (ФРН), Fincoil (Фінляндія), автоматику компаній Danfoss (Данія), Johnson Gontrol, AC and components, Packless (США), Korel, Caslal (Італія). Оскільки постачальники комплектують холодильне обладнання від тих самих виробників, то й вартість його має бути приблизно однаковою, за винятком, мабуть, вітчизняних виробників, які збирають на своїх заводах обладнання з комплектуючих зарубіжних компаній. Якщо постачальник пропонує суттєво дешевше обладнання, слід хоча б перевірити холодопродуктивність компресорів, конденсаторів і повітроохолоджувачів.

На сьогоднішньому ринку можна підібрати охолоджувачі повітря з викидом струменя 60 м і швидкістю повітря на цій відстані не менше 1 м/с. Вибір способу охолодження залежить від зовнішніх умов, наприклад, від температури водопровідної води, що надходить із свердловини, інвестиційних можливостей підприємства, вимог ринку м'яса птиці. Провідні закордонні фірми охолоджують птицю у повітрі чи випарним охолодженням на конвеєрі (Mielnik, Dainty, Lundby, & Mielnik, 1999). Якщо птицю охолоджують у камері невеликого об'єму або в тунелі, вологість повітря в камері швидко збільшується до насиченого. У цьому випадку швидкість охолоджувача та втрати маси, тобто природний спад при охолодженні в повітрі або при випарному охолодженні приблизно однакові. У той же час при випарному охолодженні вологість повітря вища за точку насичення, розпорошені краплі води потрапляють в охолоджувач повітря, де осідають на теплообмінну поверхню, істотно погіршуючи умови теплообміну, що вимагає більш частого його відтавання. Це одна із причин того, що охолодження птиці на конвеєрі по одній тушці на підвісці частіше проводять без розпилення води.

Справді спірним і принциповим є питання використання фреонового чи аміачного устаткування (Reindl, & Jekel, 2009). Ще кілька років тому через велику аміачкоємність камерного аміачного обладнання перевага надавалася холодильному устаткуванню, де як холодоносії використовувався фреон. Однак з теплофізичного боку використання аміаку, безумовно, набагато краще: аміак має високу теплоту пароутворення: при мінус 5 °С — 209 кДж/кг, тоді як у фреону вона становить

27—26 кДж/кг, коефіцієнт тепловіддачі при конденсації парів (Вт/см³·К): вода — 11600, аміак — 9300, фреон 12 і фреон 22 — 2300 і нарешті ентальпія аміаку — 401 ккал/кг, фреону — 149 ккал/кг (Лоуко, 1989).

За останні роки освоєно випуск аміачного холодильного компресорного та камерного обладнання за своїми характеристиками цілком порівнянню з фреоновими апаратами (Briley, 1992). Це насамперед конденсатори й охолоджувачі повітря з розвиненою теплопередавальною поверхнею і, відповідно, з низькою аміакоемністю. Така відома фірма, як «Бітцер» (ФРН), освоїла виробництво аміачного машинного та камерного обладнання з малою аміакоемністю. З економічного боку аміачне обладнання також краще за фреонове. Робота фреонових холодильних установок залежно від установки та експлуатації на 5—30% дорожча за аміачні. Поряд з високою вартістю початкової заправки (фреон 404А в 10 разів дорожчий за аміак) цілком імовірний повний витік із системи фреону, який не має запаху, тож його витік на відміну від аміаку, що має різкий запах, відразу не виявляється.

Широкі знання та практичний досвід дають змогу постачати надійне обладнання відомою фірмою Eguis, виробником високоякісного автоматизованого обладнання для переробки птиці, яка має значний досвід роботи в галузі. Це високо-ефективне обладнання з винятковими можливостями повного обслуговування за конкурентоспроможною ціною (рис. 3).



Рис. 3. Автоматизована машина для забою птиці 300 ВРН фірми Eguis

Розроблене компактне обладнання з підвищеною ефективністю знекровлення, ошпарювання та знепірення забезпечує високоякісний забій птиці. Ця машина ідеально підходить для дрібносерійної переробки. Спеціалізовані машини для забою та переробки різноманітних порід птиці, які задовольняють сучасні вимоги до продукції, можна налаштувати відповідно до конкретних потреб виробництва, зможуть задовольнити національні критерії виготовлення продукції та експортні стандарти.

Висновки

Використовуючи можливості сучасних технологій при переробці птиці, можна оптимізувати роботу підприємств, зменшити витрати на оплату праці та мінімізувати помилки персоналу. Те, на що раніше витрачалось багато часу, тепер можна виконати всього за кілька хвилин, що дає змогу задовольнити зростаючий попит на продукцію птахопереробки без шкоди для якості.

Теперішнє новітнє обладнання для забою птиці оснащено передовими позиціями, такими як автоматизовані лінії обробки та механізми точного різання. Автоматизовані процеси знекровлення, потрошіння та охолодження дають змогу значно підвищити продуктивність та суттєво скоротити час обробки. В основі будь-якого успішного підприємства з переробки птиці лежить і його арсенал невеликих інструментів, які впливають на нарізку, обвалювання, сортування, зважування, примножуючи асортимент продукції птахопереробки.

Постійне вдосконалення процесів контролю на виробництві вимагає забезпечення безперебійного й ефективного виконання всіх технологічних операцій. Підприємства мають запроваджувати комплексну платформу підготовки свого персоналу, яка охоплює все виробництво: від протоколів безпеки харчових продуктів до процедур експлуатації обладнання. Інвестуючи в професійний розвиток своїх працівників, підприємство значно скорочує кількість нештатних ситуацій і помилок на виробництві.

Очевидно невирішеним, особливо для невеликих підприємств, з продуктивністю до 3000 гол./год птиці, є питання переробки відходів виробництва та інкубації. Цех з переробки відходів для лінії продуктивністю 3000 гол./год за вартістю прирівнюється до цеху переробки птиці з холодильником, тому слід повернутися до цілком правильної ідеї створення міжрайонних заводів з переробки відходів, вартість якої буде значно нижчою, а головне буде забезпечена повна їх стерилізація та виключене забруднення навколишнього середовища відходами виробництва.

Отримання функціональних побічних продуктів високої цінності забезпечить додаткові надходження підприємству і відкриває значні можливості для підвищення економічної ефективності та покращення екологічного впливу м'ясної промисловості. Наші дослідження зосереджені на використанні потенційних можливостей птахопереробки для отримання цінних функціональних побічних продуктів із сировини (наприклад, кісток, субпродуктів тощо). Потрібно розглядати ефективні протоколи для вилучення функціональних білків/пептидів із тканин (субпродуктів) і рідин (наприклад, крові). Сфери застосування включають як харчову (для людей і тварин), так і нехарчову (біоматеріали/біомедицину) продукцію.

Отже, сьогодні розвиток виробництва і переробки птиці в Україні найменше залежить від імпорту, тому політика підтримки має бути переглянута як з точки зору регулювання зовнішньої торгівлі, так і внутрішньої політики.

Література

Агапова, Є. М. (2020). Комплексний підхід до проблеми якості м'яса і яєць птиці. *Птахівництво*, 1(25), 18—19.

Баль-Прилипка, Л. В. (2012). *Інноваційні технології якісних та безпечних м'ясних виробів*: монографія. Київ: НУБіП.

- Баль-Прилипка, Л. В., Бесулін В. І., & Куцак С. М. (2003). Птахівництво і технологія виробництва яєць та м'яса птиці. Біла Церква.
- Віннікова, Л. Г., Поварова, Н. М., & Синиця, О. В. (2020). *Основи птахівництва та переробки птиці*. Одес. нац. акад. харч. технологій. Київ: Освіта України.
- Кириченко, Г. Д. (2017). *Технологія виробництва продукції птахівництва*: Електронний підручник: Агроосвіта.
- Лисенко, Г. П. (2017). Сучасний стан і перспективи розвитку м'ясопереробної галузі. *Вісник аграрної науки*, 1, 72—75.
- Логоша, Р. В. (2012). Стан і тенденції розвитку підприємств м'ясопереробної галузі України. *Збірник наукових праць, ВНАУ. Серія: Економічні науки*, 3(69), 120—124.
- Лозовський, А. П. (2014). *Основи технологічного проектування промислових підприємств переробних галузей*. Суми: Університетська книга.
- Маньковський, А. Я., & Антонюк, Т. А. (2014). *Технологія продуктів забою тварин*. Київ: Агроосвіта.
- Мельник, Б. А. (2002). Стан і резерви збільшення обсягів виробництва продукції птахівництва. *Тваринництво України*, 2, 10—12.
- Огороднічук, Г. М. (2019). Продуктивність і забійні показники курчат-бройлерів за дії препарату «Пробіол». *Аграрна наука та харчові технології*, 1(104), 36—44.
- Пасічний, В. М. (2009). Перспективні напрямки виробництва м'ясних та м'ясо-рослинних напівфабрикатів, *М'ясна справа*, 8, 15—19.
- Пешук, Л. В. (2021). *Технологія і переробка вторинних продуктів м'ясної галузі*. Київ: ЦУЛ.
- Родіна, О. В. (2022). Аналіз ринку м'яса птиці в Україні: сучасний вектор у контексті продовольчої безпеки. *Підприємництво та інновації*, 23, 91—96. <https://doi.org/10.37320/2415-3583/23.16>.
- Теличкун, В. І. (2019). *Технологічні комплекси харчових виробництв*. Навчальний посібник. Київ: Сталь.
- Череп, А. В., Потопа К. Л., & Ткаченко О. В. (2009). Реінжиніринг — філософія управління підприємством харчової промисловості: монографія. Київ: Кондор.
- Шуст, О. А. (2011). Сучасний стан функціонування підприємств м'ясопереробної галузі України. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України*, 168(2), 199—204.
- Loyko, L. (1989). Hydraulic Shock in Ammonia Systems. IAR 11th Annual Meeting March 12—15, Austin, TX.
- Anil, M. H., and McKinstry, J. L. (1992). The effectiveness of high frequency electrical stunning in pigs. *Meat Science*, 31, 481—491.
- Baker, F. (2020). *Dairy Science Handbook*. CRC Press.
- Bilgili, S. F. (1999). Recent advances in electrical stunning. *Poultry Science*, 78, 282—286.
- Blackmore, D. K., & Delaney, M. W. (1988). Slaughter of stock. Publ. No. 118. Vet. Con. Ed. Massey University. Palmerston North, New Zealand.
- Briley, G. C., (1992). Hot Gas Defrost Systems for Large Evaporators in Ammonia Liquid. Overfeed Systems, IAR 14th Annual Meeting, Miami, FL, March.
- Cook, C. J., Maasland, S. A., Devine, C. E., Gilbert, K. V., and Blackmore, D. K. (1996). Changes in the release of amino acid neurotransmitters in the brains of calves and sheep after head-only electrical stunning and throatcutting. *Research in Veterinary Science*, 60, 225—261.
- Council Directive (1993). On the protection of animals at the time of slaughter or killing. *Official Journal European Communities*, 1, 340/21.
- Croft, P. G. (1952). The effect of electrical stimulation of the brain on the perception of pain. *Journal Mental Science*, 42, 421—426.
- European Food and Safety Authority (2004). Welfare aspects of animal stunning and killing methods. AHAW/04-027.
- Gregory, N. G., and Wotton, S. B. (1990). Effect of stunning on spontaneous physical activity and evoked activity in the brain. *British Poultry Science*, 31, 215—220.

Gregory, N. G., Wilkins, L. J., and Wotton, S. B. (1991). Effect of electrical stunning frequency on ventricular fibrillation, downgrading and broken bones in broilers, hens and quails. *British Veterinary Journal*, 147, 71—77.

Hillebrand, S. J. W., Lambooy, E., and Veerkamp, C. H. (1996) The effects of alternative electrical and mechanical stunning methods on hemorrhaging and meat quality of broiler breast and thigh muscles. *Poultry Science*, 75, 664—671.

Hoen, T., and Lankhaar, J. (1998). Controlled atmosphere stunning of poultry. *Poultry Science*, 78, 287—289.

Kranen, R. W., Lambooy, E., Veerkamp, C. H., Van Kuppevelt, T. H., and Veerkamp, J. H. (2000). Histological characterization of hemorrhages in muscles of broiler chickens. *Poultry Science*, 79, 110—116.

Lambooy, E., Gerritzen, M. A., Engel, B., Hillebrand, S. J. W., Lankhaar, J., and Pieterse, C. (1999). Behavioural responses during exposure of broiler chickens to different gas mixtures. *Applied Animal Behaviour Science*, 62, 225—265.

Lambooy, E., Pieterse, C., Hillebrand, S. J. W., and Dijksterhuis (1999). The effects of captive bolt and electrical stunning and restraining methods on broiler meat quality. *Poultry Science*, 78, 600—607.

Mielnik, V., Dainty, R., Lundby, F., & Mielnik, J. (1999). The effect of evaporative air chilling and storage Temperature on Quality and shelf life of fresh chicken carcasses. *Poultry Science*, 78, 1065—1073. doi: 10.1093/ps/78.7.1065.

Olukosi, O., Helmbrecht, A., & Olori, V. (2019). *Poultry Feathers and Skin*. CABI Publishing. 10.

Reindl, D. T., and Jekel, T. B. (2009). Defrosting Industrial Evaporators. *ASHRAE Journal*: August, 30—40.

Savchenko, T., Basiurkina, N., Rodina, O., & Kwilinski, A. (2019). Improvement of the assessment methods of product competitiveness of the specialized poultry enterprises. *Management Theory and Studies for Rural Business and Infrastructure Development*, 41(1), 43—55. doi: <https://doi.org/10.15544/mts.2019.05>.

Savenije, B., Lambooy, E., Pieterse, C., & Korf, J. (2000). Electrical stunning and exsanguination decrease the extracellular volume in the broiler brain as studied with brain impedance recordings. *Poultry Science*, 79(7), 1062—6. doi: 10.1093/ps/79.7.1062. PMID: 10901211.

Tkachenko, V., Rodina, O., & Savchenko, T. (2018). Influence of the technological factors of breeding on the cost management efficiency of specialized poultry enterprises. *Management Theory and Studies for Rural Business and Infrastructure Development*, 40(1), 91—102. doi: <https://doi.org/10.15544/mts.2018.09>.

УДК 628.16:628.35

USE OF COAGULANTS AND AFM LOADING FOR PRE-TREATMENT OF WATER FROM SURFACE SOURCES FOR THE NEEDS OF THERMAL POWER PLANTS OF FOOD ENTERPRISES

I. Potapchuk, N. Husiatynska*National University of Food Technologies***Key words:**

*Filtration
Coagulation
Water purification
Water supply of
enterprises*

Article history:

Received 08.01.2025
Received in revised form
29.01.2025
Accepted 14.02.2025

Corresponding author:

N. Husiatynska
E-mail:
ngusyatynska@ukr.net

Citation: Потапчук І. М.,
Гусятинська Н. А. (2025).
Використання коагулянтів і
завантаження AFM для
попереднього очищення
води з поверхневих
джерел для потреб
теплових установок хар-
чових підприємств. *Нау-
кові праці НУХТ*, 31(1),
185—196.

DOI: 10.24263/2225-
2924-2025-31-1-16

ABSTRACT

The technology of pre-treatment of water from surface sources for thermal plants using coagulants and AFM loading is reviewed in the article. The problem is the deterioration of the quality of water used in thermal power plants due to the presence of mineral and organic impurities that lead to scale, corrosion and a decrease in the efficiency of the equipment. It is shown that the technological scheme for surface water purification should ensure high purification efficiency, the ability to regulate the main technological parameters, the structural simplicity of the equipment and a long service life.

An instrumental and technological scheme of a water purification plant has been developed, which includes: oxidation (disinfection) with sodium hypochlorite; filtration to remove impurities larger than 130 microns; coagulation clarification of water using contact coagulation on an AFM loading.

Industrial tests of the effectiveness of the developed technology have been carried out. The dependence of the pressure difference in the filtration process on the AFM loading on the duration of the process has been determined. It was found that the rational duration of the filter cycle process during contact coagulation on a multilayer AFM loading of fractional composition 2—4 mm, 0.7—2 mm and 0.4—0.8 mm is 140—150 min. For regeneration of the loading, backwashing with clean water for 10—20 min is recommended, which in general ensures complete cleaning of the loading under the condition of an operating pressure difference of 0.2—0.8 bar.

Among the advantages of the proposed technology, it should be noted high productivity with relatively compact dimensions of the equipment compared to the classical technology, stability of cleaning efficiency, automated operation mode. The obtained research results in industrial conditions confirm the possibility of using the developed technology at the stage of preliminary water preparation before feeding for further cleaning by ion-exchange softening.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-1-16

ВИКОРИСТАННЯ КОАГУЛЯНТІВ І ЗАВАНТАЖЕННЯ АФМ ДЛЯ ПОПЕРЕДНЬОГО ОЧИЩЕННЯ ВОДИ З ПОВЕРХНЕВИХ ДЖЕРЕЛ ДЛЯ ПОТРЕБ ТЕПЛОСИЛОВИХ УСТАНОВОК ХАРЧОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

І. М. Потапчук, Н. А. Гусятинська

Національний університет харчових технологій

У статті розглянуто технологію попереднього очищення води з поверхневих джерел для теплових установок з використанням коагулянтів і завантаження АФМ. Проблема полягає у погіршенні якості води, яка використовується в теплосилових установках, через наявність мінеральних та органічних домішок, що призводять до накипу, корозії та зниження ефективності обладнання. Показано, що технологічна схема для очищення поверхневих вод повинна забезпечити високу ефективність очищення, можливість регулювання основних технологічних параметрів, конструктивну простоту обладнання і тривалий термін його роботи.

Розроблено апаратурно-технологічну схему установки для очищення води, що включає: окиснення (дезінфекція) гіпохлоритом натрію; фільтрацію для видалення домішок розміром більше 130 мкм; коагуляційне освітлення води з використанням контактної коагуляції на завантаженому типу АФМ.

Проведено промислові випробування ефективності розробленої технології. Визначено залежність різниці тиску в процесі фільтрування на завантаженому АФМ від тривалості процесу. Встановлено, що раціональна тривалість процесу фільтроциклу під час контактної коагуляції на багатопаровому завантаженому АФМ фракційного складу 2—4 мм, 0,7—2 мм та 0,4—0,8 мм складає 140—150 хв. Для регенерації завантаження рекомендується зворотне промивання чистою водою протягом 10—20 хв, що в цілому забезпечує повне очищення завантаження за умови робочої різниці тиску 0,2—0,8 бар.

Серед переваг запропонованої технології слід відзначити високу продуктивність при відносно компактних габаритах обладнання порівняно з класичною технологією, стабільність ефективності очищення, автоматизований режим роботи. Отримані результати досліджень у промислових умовах підтверджують можливість застосування розробленої технології на стадії попередньої підготовки води перед подачею на подальше очищення шляхом іонообмінного пом'якшення.

Ключові слова: *фільтрація, коагуляція, очищення води, водопостачання підприємств.*

Постановка проблеми. При переробці харчової сировини широко використовуються теплові процеси, що обумовлює технологічну потребу одержання та використання пари. Використання води як теплоносія обумовлюється її високою питомою теплоємністю, відносною дешевизною і доступністю. Особливістю роботи теплосилових установок є потреба у спеціально підготовленій воді, оскільки термін служби обладнання котелень багато в чому залежить від її фізичних і хімічних

властивостей (Душенко, & Ткачук, 2024). Так, наявність солей жорсткості, кисню, вуглекислоти у воді призводить до утворення накипу на поверхні теплообміну, кислотної корозії металу, що впливає на умови безпечної експлуатації обладнання, зменшення терміну його роботи, збільшення витрат палива внаслідок зниження коефіцієнта теплопередачі (Obodovych, Sydorenko, & Rezakova, 2023). Отримання водяної пари при високій температурі забезпечується в парових котлах високого тиску, тому розчинені солі, що містяться в поживній воді навіть у незначній кількості (наприклад, загальна жорсткість менше 3 мкг/кг), можуть призвести до аварійного стану котельних агрегатів і виходу їх з ладу (Айрапетян, & Чуб, 2024). Важливу роль у боротьбі з утворенням відкладень і корозією металевих труб відіграє система очищення живильної та підживлювальної вод (Ospanova, Nussupbekov, & Oshapov, 2023).

Для водопостачання теплового господарства підприємств харчової галузі, зазвичай, використовують поверхневі і підземні природні води, зокрема з поверхневих прісних джерел — 81%, підземних — 13%, солоних — 6% (Долина, Машихіна, & Козачина, 2021). Проте слід зазначити, що якість поверхневих вод постійно погіршується, спостерігається прогресуючий дефіцит води, зокрема внаслідок змін клімату й антропогенної діяльності людини (Delpla, Jung, & Thomas, 2009), що вимагає подальших досліджень технологічних аспектів водопідготовки, в тому числі з використанням поверхневих вод, води з циркуляційних систем підприємств тощо. Зазначені води характеризуються різним хімічним складом домішок, що потрапляють унаслідок природного коловороту та в результаті техногенного забруднення стоками промислових та сільськогосподарських підприємств.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні науковці пропонують різні способи підвищення ефективності підготовки води з використанням коагуляції з мікрофільтрацією (Shaheen, & Cséfalvay, 2023); іонообміну (Gomelya, Hrabitchenko, & Shablii, 2016); дискретно-імпульсного введення енергії (Ободович, Целень, & Степанова, 2024); зворотного осмосу (Сербов, & Згадова, 2021) та ін. Оскільки для забезпечення роботи теплосилових установок потребується велика кількість прісної води як підживлювальної води для компенсації втрат кругообігу води в теплогенеруючих системах (Shaheen, & Cséfalvay, 2023), то питання підготовки води для теплового господарства харчових підприємств залишається актуальним і потребує подальших досліджень з метою усунення існуючих проблем якості вихідної води та відповідно розроблення раціонального способу її підготовки для подальшого використання.

Вимоги до води, що використовується для роботи котельного обладнання, регулюють прозорість, жорсткість, значення рН, вміст заліза, міді, розчиненого у воді кисню, нафтопродуктів, та знаходяться в межах, визначених у «Правилах будови і безпечної експлуатації теплових і водогрійних котлів».

Природна вода є складною дисперсною системою, дисперсна фази якої містять гази, мінеральні і органічні речовини, мікроорганізми. Наявність хімічних речовин у воді з поверхневих і підземних джерел визначається як умовами природного походження, так і є наслідком техногенного забруднення стічними водами промислових підприємств, шахтними водами, сільськогосподарськими та побутовими стоками.

До розчинних мінеральних сполук, що містяться у природній воді, належать

хлориди, сульфати і нітрати лужних і лужноземельних металів, які знаходяться у вигляді дисоційованих іонів: катіонів водню (H^+), металів (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}), аніонів кислотних залишків (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-}), гідроксиду (OH^-). Прості органічні сполуки у водному середовищі перебувають у вигляді молекулярних розчинів. Складні органічні речовини (білки, полісахариди, жири) у водному розчині знаходяться у нанодиспергованому стані у вигляді колоїдів. У воді містяться деякі газоподібні речовини: кисень (O_2), діоксид вуглецю (CO_2), сірководень (H_2S), водень (H_2), азот (N_2), метан (CH_4) тощо. Окрім макроелементів (натрію, калію, кальцію, магнію, азоту, сірки, фосфору, хлору тощо), у воді виявлено біля 65 мікроелементів (залізо, мідь, цинк, марганець, кобальт, селен, молібден, фтор, йод тощо) (Бабієнко, & Мокієнко, 2021).

У складі природних вод з різних джерел містяться різні за складом домішки мінерального або органічного походження, тому без попереднього очищення та підготовки природні води є непридатними для живлення котлів. Досягнення визначених показників якості живильної води забезпечується складним і багатоетапним технологічним процесом, що включає стадії попереднього очищення від зважених домішок та колоїдних речовин, знезалізнення, деаерацію, іонообмін та ін. (Долінський, Ободович, & Лимар, 2021).

Домішки, що містяться у воді, можна розділити на дві групи: розчинені і нерозчинені (механічні). Висока каламутність, наявність зважених і колоїдних частинок призводить до накопичення шламу, забивання трубої системи котла і порушення циркуляції теплоносія. Залежно від джерела водозабору і кількісних показників нерозчинених забруднень обирається метод механічного очищення і освітлення води. У найпростішому випадку застосовують механічний фільтр з рейтингом фільтрації 200—500 мкм, а при поверхневому водозаборі — додаткову обробку коагулянтами і флокулянтами з подальшим відстоюванням і освітленням (Obodovych, Sydorenko, & Rezakova, 2023).

Ефективність очищення води з поверхневих джерел (річок, озер, ставків) значною мірою залежить від вибору коагулянту і встановлення раціональних умов його використання (Гусятинська, Деменюк, & Шульга, 2022). Наявність колоїдів може інтенсифікувати процес утворення накипу та навіть призводити до фізичного блокування трубопроводів (Shaheen, & Cséfalvay, 2023). При цьому важливим є забезпечення високої ефективності дії коагулянту за умови мінімізації його дозування. На сьогодні науковцями та практиками приділяється багато уваги проблемам очищення води, проте питання вибору ефективного й економічно вигідного коагулянту залишається не до кінця вирішеним. Складність питання зумовлюється необхідністю раціонального підбору коагулянту з урахуванням хімічного складу води, показника рН, температури, що, зазвичай, впливає як безпосередньо на процес коагуляції високомолекулярних сполук та колоїдів, так і на подальшу поведінку коагулянтів, що, у свою чергу, зумовлює необхідність ретельної оцінки різних коагулянтів, враховуючи їх повний склад і гідрохімічні властивості для забезпечення умов найбільш повного видалення речовин колоїдної дисперсності та досягнення мінімального залишкового вмісту коагулянту у воді (Pivokonsky та ін., 2024).

Для знекиснення живильної води водогрійних котлів і підживлювальної води теплових мереж використовується деаерація води, яка може бути хімічною і термічною з вакуумними деаераторами (Поржезінський, 2020). Як варіант хімічної деаерації води є технологія, що заснована на дії монорозчином сульфиту натрію в стехіометричній кількості концентрацією 10—15% з подальшою фільтрацією через Redox-K фільтр. Фільтр використовується як каталізатор прискорення реакції окислення сульфиту натрію (Поржезінський, 2019). Однак ця стадія підготовки є кінцевою та вимагає навіть при заміні пом'якшення на стабілізаційну обробку комплексом реагентів, дотримання відсутності механічних домішок, оскільки їх наявність призводить до забруднення фільтрувального матеріалу фільтру Redox-K та відповідно зниження його експлуатаційних параметрів.

Для зниження жорсткості до відповідних норм, залежно від якості вихідної води, застосовують реагентний, термічний, мембранний, іонообмінний методи пом'якшення, а також різні їх комбінації (Kovalenko, Lys, & Lashkovska, 2019). Зазначені методи повинні забезпечувати можливість досягнення необхідних значень по загальній жорсткості в межах 0,1—0,01 мг-екв/дм³ (НПАОП 0.00-1.08-94.), залежно від особливостей вимог котлового обладнання.

Однак більшість запропонованих методів є достатньо чутливими до якості вихідної води, зокрема вмісту колоїдних забруднень, що вимагає попередньої її підготовки перед процесом пом'якшення. В Інституті технічної теплофізики НАН України проведені дослідження щодо використання методу дискретно-імпульсного введення енергії для очищення води (Ободович, Переяславцева, & Чернявський, 2024). В промислових умовах було встановлено, що при застосуванні методу дискретно-імпульсного введення енергії в процесі аераційної обробки води відбувається інтенсифікація процесу її очищення від іонів заліза та мангану (Долінський, Ободович, & Гусятинська, 2018). Також зазначається, що в разі додавання до вихідної води гідроксиду амонію у кількості 0,008—0,015% з наступною обробкою за використання методу дискретно-імпульсного введення енергії в роторно-пульсаційному апараті забезпечується суттєве зниження жорсткості живильної води, що сприятиме підвищенню надійності та подовження ресурсу котлів ДКВР (Ободович, Переяславцева, & Чернявський, 2024).

Доцільність застосування іонного обміну визначається складом мінералізованих вод і оптимальними умовами проведення процесів сорбції іонів, десорбції і переробки сорбатів. Натрій-катіонітовий метод пом'якшення води застосовують для пом'якшення підземних поверхневих вод із вмістом завислих речовин не більше 5—8 мг/дм³ і кольоровістю не більше 30 град. (Макаренко, Крисенко, & Глушко, 2024), що, у свою чергу, особливо актуально при використанні поверхневих джерел, по типу річок та озер, та вимагає попередньої підготовки води.

Отже, підготовка води для теплосилового господарства харчових підприємств складається з ряду технологічних стадій, метою яких є видалення органічних та мінеральних сполук. Важливою стадією попереднього очищення води перед пом'якшенням є її освітлення та видалення колоїдних домішок, що можливо шляхом застосування хімічних реагентів, зокрема коагулянтів і фільтрування.

Мета дослідження: проведення аналізу та вибір технології попереднього очищення води з поверхневих джерел для потреб теплосилових установок і встановлення ефективності окремих технологічних операцій (фільтрування, окиснення та

коагуляції) з використанням випробувальної промислової установки на основі фільтруючого матеріалу AFM виробництва компанії Dryden Aqua.

Матеріали і методи. Методи досліджень — аналітичні, хімічні, фізико-хімічні з використанням приладів і методик досліджень якості води згідно ДСанПіН 2.2.4-171-10 та ДСТУ 7525:2014.

Під час експериментальних досліджень використовували завантаження для фільтрування AFM®, що являє собою штучний фільтрувальний матеріал алюмосилікат (скло) у діапазоні розмірів часток завантаження 4,0—0,4 мм (Фільтруючий матеріал AFM).

Для очищення води використовували такі хімічні реагенти:

- 1) сульфат алюмінію $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$;
- 2) розчин гідроксихлориду алюмінію — $\text{Al}_2(\text{OH})_n\text{Cl}_{6-n}$ (конц. Al_2O_3 — 17%), марки ITS WATER™ AC-114;
- 3) розчин хлориду заліза (конц. FeCl_3 40—47%), марки ITS WATER™ FC-117;
- 4) гіпохлорит марки А (конц. активного хлору не менше 190 г/дм³).

Під час експерименту також проводили визначення прозорості водяного стовпа, контроль робочого тиску за допомогою манометрів, швидкості фільтрації за допомогою ротаметра.

Викладення основних результатів дослідження. Під час вибору раціональної технологічної схеми для очищення поверхневих вод важливо забезпечити високу ефективність очищення, можливість регулювання основних технологічних параметрів, конструктивну простоту обладнання й тривалий термін його роботи. Для забезпечення необхідної ефективності очищення води важливо визначити необхідні дози реагентів, що залежить від властивостей дисперсної системи: температури, кількості зважених і колоїдно-дисперсних речовин, забарвленості, іонного складу, значення рН та інших фізико-хімічних показників води (Гусятинська, Деменюк, & Шульга, 2022).

У лабораторії було проведені попередні порівняльні випробування двох коагулянтів — сульфату алюмінію та гідроксихлориду алюмінію (марки ITS WATER™ AC-114) у разі використання води з поверхневого джерела (р. Дніпро). Результати експериментальних досліджень наведено в табл. 1, 2.

Таблиця 1. Показники якості води при обробці сульфатом алюмінію

Показники	Доза алюміній сульфату, мг/дм ³				
	Вода без очищення	25	50	100	150
Забарвленість, град	41,0 ± 2,0	36,0 ± 2,0	35,0 ± 1,8	18,0 ± 1,0	15,0 ± 1,0
Каламутність, НОК	3,8 ± 0,4	1,18 ± 0,2	0,99 ± 0,2	0,71 ± 0,2	0,7 ± 0,15
Вміст загального заліза, мг/дм ³	0,39 ± 0,05	0,19 ± 0,02	0,22 ± 0,02	0,09 ± 0,02	0,1 ± 0,02
Перманганатна окиснюваність, мг O_2 /дм ³	12,16 ± 0,6	11,84 ± 0,5	10,72 ± 0,4	6,72 ± 0,2	6,72 ± 0,2

Таблиця 2. Показники якості води при обробці гідроксохлоридом алюмінію

Показники	Доза гідроксохлориду алюмінію, мг/дм ³				
	0	40	80	120	160
Забарвленість, град	41,0 ± 2,0	26,1 ± 1,8	9,0 ± 1,5	8,1 ± 1,5	8,0 ± 1,4
Каламутність, НОК	3,8 ± 0,4	1,18 ± 0,2	0,42 ± 0,2	0,4 ± 0,2	0,23 ± 0,15
Вміст загального заліза, мг/дм ³	0,39 ± 0,05	0,13 ± 0,02	0,09 ± 0,01	0,03 ± 0,01	0,05 ± 0,01
Перманганатна окиснюваність, мг О ₂ /дм ³	12,16 ± 0,6	7,36 ± 0,5	6,56 ± 0,3	4,48 ± 0,2	4,16 ± 0,2

Отже, за результатами експериментальних досліджень встановлено вищу ефективність гідроксохлориду алюмінію порівняно із сульфатом алюмінію. Відповідно, на основі отриманих результатів для подальших напівпромислових досліджень було обрано гідроксохлорид алюмінію.

Для реалізації попереднього очищення води для теплових установок харчових підприємств розроблена принципова технологічна схема, що включає такі стадії очищення води: 1) окиснення (дезінфекція) гіпохлоритом натрію; 2) фільтрація з метою видалення домішок розміром більше 130 мкм; 3) коагуляційне освітлення води з використанням напірної фільтрації на завантаженні типу AFM. Для реалізації запропонованої технології на підприємстві ТОВ «ФАЗОР» змонтовано випробувальну установку (рис. 1).

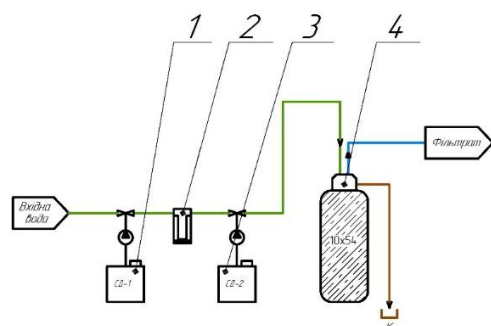


Рис. 1. Схема установки: 1 — станція дозування гіпохлориту натрію; 2 — дисковий фільтр 130 мкм; 3 — станція дозування коагулянту; 4 — мультимедійний фільтр, завантажений 3-ма фракціями AFM

Принцип роботи установки для попереднього очищення природної води з поверхневих джерел полягає в тому, що вода з поверхневого джерела подається насосом безпосередньо на експериментальну установку, де у трубопроводі додається гіпохлорит натрію за допомогою автоматичної станції дозування (1). Обробка води

гіпохлоритом натрію забезпечує процеси хімічного окиснення органічних домішок і дезінфекції від мікроорганізмів, що містяться у вхідній воді. Після цього вода надходить на дисковий фільтр (2) з рейтингом фільтрації 130 мкм для відділення зважених домішок. Вода після грубого фільтрування надходить у фільтрувальну колону (4) із завантаженням AFM, яке складається з трьох фракцій, зокрема з підтримуючого шару розміром 2—4 мм, далі розміщуються шари з фракціями 0,7—2 мм та 0,4—0,8 мм. Попередньо до води, за допомогою дозатора (3), додається розчин коагулянту (гідроксохлорид алюмінію або хлорид заліза) для забезпечення перебігу процесу коагуляції колоїдних речовин, одержання та осадження укрупнених міцел осаду, що відбувається під час проходження через фільтруючий шар AFM у фільтрувальній колоні. За допомогою ротаметра забезпечується підтримання певного навантаження води під час проходження через фільтрувальну колону (типорозміру 10×54 з площею фільтрації 0,05 м²) в межах 0,4—0,5 м³/год, що відповідає швидкості фільтрації 8—10 м/год.

Процес коагуляції високомолекулярних сполук і речовин колоїдної дисперсності в технології очищення води включає дві основних стадії: перша — швидке змішування з реагентом, що відповідно до розробленої схеми забезпечується введенням коагулянту у трубопровід подачі води до фільтраційної колоні, де внаслідок турбулентного руху відбувається швидке розподілення реагенту в об'ємі води. На другій стадії важливо забезпечити умови стабілізації зважених частинок та утворення міцел осаду, що досягається зменшенням швидкості потоку у фільтраційній колоні і, відповідно, перебігу процесу контактної коагуляції. Використання процесу контактної коагуляції, що відбувається на завантаженні, має ряд переваг, зокрема: компактні габарити апаратурного виконання порівняно з класичною схемою відстоювання та фільтрації; можливість забезпечення достатньо високої і стабільної ефективності при різних фізико-хімічних умовах коагуляції, що змінюються за сезонами року; зменшення доз коагулянту (Душенко, & Ткачук, 2024). Слід зазначити, що завантаження AFM[®] використовується як фільтруюче середовище при одно- або двокомпонентній фільтрації як у відкритих (RGF), так і в закритих (напірних) фільтрах для очищення води з різних джерел, таких як ґрунтові води, поверхневі води, морська вода та стічні води. AFM[®] має оптимізовану форму та розміри частинок для фільтрації. Також AFM[®] не є пасивним фільтруючим середовищем — його поверхня активується за допомогою хімічної та термічної обробки в процесі, подібному до сольгелю, де структура поверхні кожного зерна матеріалу змінюється, що призводить до появи стійкої поверхні матеріалу до біозаростання, а також збільшення активної площі фільтрації матеріалу (фільтруючий матеріал AFMS).

Випробувальна установка оснащена контрольно-вимірювальними приладами та засобами автоматики (насоси дозатори — 2 шт.; ручний клапан керування роботою фільтраційної колоні; ротаметр на лінії фільтрату; манометри, встановлені до та після фільтрувальної колоні), а також трубопроводами з відповідною запірною арматурою.

У процесі виконання дослідження було визначено ефективність застосування фільтрувального матеріалу AFM та якісних показників води під час робочого режиму пілотної установки з комбінацією реагентів: 1 варіант — гідроксохлорид алюмінію та гіпохлорит натрію; 2 варіант — хлориду заліза та гіпохлориту натрію.

Як об'єкт дослідження використовували воду з поверхневого джерела р. Кам'янка. В табл. 3 наведено показники якості вхідної води з поверхневого джерела (річка) в літній період, коли проводилося дослідження.

Слід зазначити, що вода з поверхневого джерела характеризувалася високим показниками забарвленості (79,00 град.), каламутності (17,30 мг/дм³), вмісту заліза (0,566 мг/дм³), перманганатної окиснюваності (17,6 мг/дм³).

Таблиця 3. Показники якості вхідної води

Найменування показника	Значення	
	фактичне	за ДСанПІН 2.2.4-171-10*
Запах при 20 °С, бали	5	<2
рН	7,46	6,5—8,5
Забарвленість, град.	79,00	<20
Каламутність, мг/дм ³	17,30	<0,58
Жорсткість загальна, мг-екв/дм ³	7,350	<7
Кальцій, мг-екв/дм ³	4,300	не регл.
Магній, мг-екв/дм ³	3,050	не регл.
Лужність загальна, мг-екв/дм ³	6,720	не регл.
Залізо загальне, мг/дм ³	0,566	<0,2
Марганець, мг/дм ³	0,632	<0,05
Сульфати, мг/дм ³	12,00	<250
Хлориди, мг/дм ³	53,00	<250
Гідрокарбонати, мг/дм ³	410,00	не регл.
Перманганатна окиснюваність, мг/дм ³	17,60	<5
Запах при 60 °С, бали	5	<2

У табл. 4 представлено показники якості води після очищення.

Таблиця 4. Усереднені результати аналізу очищеної води на модульній установці для випробувань за різних варіантів очищення

Найменування показника	Значення			
	гідроксохлорид алюмінію та гіпохлорит натрію	ефективність видалення, %	хлорид заліза та гіпохлорит натрію	ефективність видалення, %
рН	7,66	—	6,93	—
Забарвленість, град.	21,00	73,4	25,00	68,4
Каламутність, мг/дм ³	0,20	98,8	0,30	98,3
Жорсткість загальна, мг-екв/дм ³	6,400	12,9	6,720	8,57
Лужність загальна, мг-екв/дм ³	5,360	20,2	3,600	46,4
Залізо загальне, мг/дм ³	0,024	95,8	0,033	94,2
Марганець, мг/дм ³	0,010	98,4	0,010	98,4
Перманганатна окиснюваність, мг/дм ³	8,10	54	5,30	69,9

Важливим етапом у процесі фільтрування через зернисте завантаження є видалення осаду шляхом зворотного промивання, що забезпечує ефективне прояснення води за оптимального значення перепаду тиску. Важливим показником для автоматизації процесу фільтрування є визначення тривалості робочого циклу та промивки фільтра. На рис. 2 представлено залежність зміни тиску ΔP води до та після фільтра. З наведеної діаграми випливає, що за тривалості фільтрування та контактної коагуляції (за середніх витрат коагулянту 20—40 мг/дм³) протягом 140—150 хв перепад тиску збільшується з 0,2 бар до 0,8—1,0 бар, що є свідченням накопичення осаду в об'ємі фільтраційного завантаження і показником щодо необхідності проведення промивки фільтра.

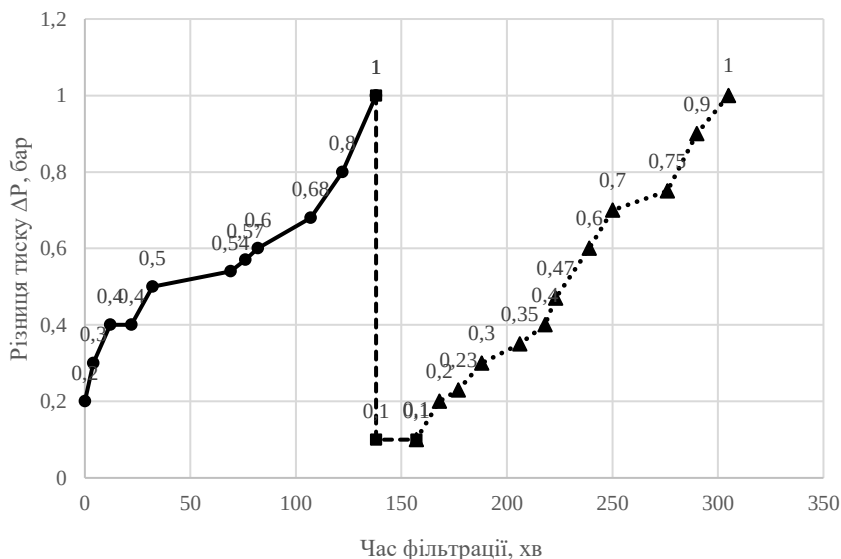


Рис. 2. Залежність різниці тиску ΔP від тривалості процесу фільтрації: ● — перший фільтроцикл; ■ — зворотна промивка; ▲ — другий фільтроцикл

На основі експериментальних досліджень розробленої напівпромислової установки встановлено, що раціональна тривалість процесу фільтроциклу під час контактної коагуляції на завантаженні AFM, яке складається з трьох фракцій (з підтримуючого прошарку розміром 2—4 мм і прошарків з фракціями 0,7—2 мм та 0,4—0,8 мм) становить 140—150 хв. При цьому зниження тиску після фільтра становило до 1,0 бар. Подальше фільтрування за таких умов призводить до погіршення якості води та зниження ефективності фільтраційного завантаження, що проявляється у погіршенні якості фільтрату внаслідок виносу затриманих забруднень. Для регенерації завантаження рекомендується зворотне промивання чистою водою протягом 10—20 хв, що в цілому забезпечувало повне очищення завантаження, про що свідчать результати вимірювання тиску в системі до та після промивки (рис. 2).

Висновки

За результатами випробувань встановлено, що застосування запропонованої технології очищення води з використанням контактної коагуляції, при використанні

комбінації реагентів: гіпохлорит + коагулянт і мультимедійного завантаження AFM, забезпечує стабільний результат попереднього очищення за лінійної швидкості фільтрації порядку 8—10 м/год.

Вперше визначено раціональну тривалість фільтроциклу 140—150 хв для багатшарового завантаження AFM (з розмірами фракцій 2—4 мм, 0,7—2 мм та 0,4—0,8 мм) до досягнення значення різниці тисків в межах до 1 бар. У разі подальшої фільтрації без промивання відбувається погіршення якості очищуваної води і, відповідно, ефективності фільтраційного завантаження щодо утримання диспергованих часток забруднень. Тож при досягненні перепаду тиску в 1 бар необхідно проводити зворотне промивання для відновлення оптимального робочої різниці тиску 0,2—0,8 бар.

Основною перевагою цієї перспективної апаратурно-технологічної схеми є її висока продуктивність при відносно компактних габаритах обладнання порівняно до класичної технології, в якій наявні габаритні відстійники, що є досить капітально затратними спорудами при невеликій продуктивності. На основі випробування схеми у промислових умовах було підтверджено її ефективність для реалізації стадії попередньої підготовки води перед подачею на подальше очищення шляхом іонообмінного пом'якшення.

Проведені теоретичні й експериментальні дослідження підтвердили можливість використання розробленого способу, що ґрунтується на процесі контактної коагуляції з використанням сучасного багатшарового завантаження AFM, для попереднього очищення води теплогенераційних установок невеликої продуктивності, що використовують як живильну воду поверхневі джерела водопостачання або оборотні системи виробничих вод. Ефективність способу очищення води з використанням фільтруючого матеріалу AFM для контактної коагуляції забезпечується шляхом зменшення витрати коагулянтів із збереженням якості очищеної води. Запропонований спосіб може бути використаний в різних схемах водопідготовки та очищення вод харчових підприємств.

Література

- Айрапетян, Т. С., Чуб, І. М. (2024). *Водопідготовка на підприємствах теплоенергетики з використанням Na-катіонітових фільтрів: монографія*. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова.
- Бабієнко, В., Мокієнко, А. (2021). *Гігієна води та водопостачання населених місць: навчальний посібник*. Одеса: Прес-кур'єр.
- Гусятинська, Н. А., Деменюк, О. М., Шульга, С. А. (2022). Ефективність застосування поліоксихлориду алюмінію для очищення питної води. *Наукові праці НУХТ*, 28(6), 125—136.
- Долина, Л. Ф., Машихіна, П. Б., Козачина, В. А. (2021). *Реконструкція систем водопостачання та водовідведення: монографія*. Дніпро: Журфонд.
- Долінський, А. А., Ободович, О. М., Сидоренко, В. В., Гусятинська, Н. А. (2018). Реалії сьогодення та перспективи майбутнього підготовки питної і технологічної води. *Наукові праці НУХТ*, 24(2), 247—255.
- Долінський, А., Ободович, О., Сидоренко, В., Лимар, А. (2021). Особливості водопідготовки для котельних. *Теплофізика та Теплоенергетика*, 43(4), 17—24. <https://doi.org/https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2021.2>.
- Душенко, О., Ткачук, В. (2024). Обладнання вхідної магнітно-кавітаційної підготовки води для тепломереж. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*, 337, 3(2), 73—80. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-337-3-10>.

Макаренко, І., Крисенко, Т., Глушко, О. (2024). Пом'якшення води в процесах водопідготовки виробництв косметичних засобів. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство»*. <https://doi.org/10.20535/ehs2710-3315.2023.291013>.

Ободович, О. М., Переяславцева, О. О., Степанова, О. Є., Чернявський, К. Є. (2024). Підвищення надійності та подовження ресурсу котлів шляхом використання механізмів дискретно-імпульсного введення енергії. Збірник тез доповідей XXXIV Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів». Київ: «КПІ ім. Ігоря Сікорського».

Ободович О., Целень Б., Переяславцева О., Степанова Л. (2024). Дискретно-імпульсне введення енергії — ефективний метод видалення гідрокарбонату кальцію та зменшення жорсткості води. *Теплофізика та теплоенергетика*, 46, 3. <https://doi.org/10.31472/tpe.3.2024.4>.

Поржезінський, Ю. (2019). Використання REDOX-к фільтрів і фосфонатів у підготовці води для теплових мереж і водогрійних котлів. *Перспективи майбутнього та реалії сьогодення в технологіях водопідготовки: матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції*, м. Київ, 14—15 листопада. Київ: НУХТ.

Поржезінський, Ю. Г. (2020). Нові технологічні рішення у підготовці води для водогрійних котлів і теплових мереж. *Наукові праці НУХТ*, 26(1), 91—97.

Сербов, М. Г., Згадова, Н. С. (2021). Інноваційний потенціал прісноводних ресурсів України: стан, регіональні особливості та перспективи розвитку. *Український журнал прикладної економіки*, 6(3), 116—122. <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2021-3-15>.

Фільтруючий матеріал AFMS. Взято з: <https://www.drydenaqua.com/afm/afm>.

Delpa, I., Jung, A.-V., Baures, E., Clement, M., Thomas, O. (2009). Impacts of climate change on surface water quality in relation to drinking water production. *Environment International*, 35, 8, 1225—1233. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2009.07.001>.

Gomelya, M., Hrabitchenko, V., Trokhymenko, A., & Shablii, T. (2016). Research into ion exchange softening of highly mineralized waters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4, 10(82), 4. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.75338>.

Kovalenko, T. P., Lys, S. S., Serdiuk, V. O., Galyanchuk, I. R., Lashkovska, N. M. (2019). Аналіз ефективності роботи модернізованої водопідготовчої установки котельні підприємства. *Scientific Bulletin of UNFU*, 29(6), 87—91. <https://doi.org/10.15421/40290618>.

Obodovych, O., Sydorenko, V., Tselen, B., Rezakova, T. (2023). Method of reducing water hardness salts and heat and mass exchange equipment for its implementation. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 45(2), 87—94. <https://doi.org/https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.10>.

Ospanova, D., Nussupbekov, B., Kutum, B., Oshanov, Y. (2023). Research of process water of a thermal power plant. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2, 6(122), 53—61. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.276486>.

Pivokonsky, M., Novotna, K., Petricek, R., Cermakova, L., Prokopova, M., & Naceradska, J. (2023). The impact of algal organic matter on water treatment plant operation and water quality: A comprehensive study. *Journal of Water Process Engineering*, 104660. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104660>.

Shaheen, R., & Cséfalvay, E. (2023). Investigation of coagulation and microfiltration for Danube water as the first step of make-up water production. *Chemical Papers*, 77(9), 5531—5539. <https://doi.org/10.1007/s11696-023-02883-4>.

УДК 664.144:664.849

IMPROVEMENT OF THE MANUFACTURING METHOD OF A HIGH DEGREE OF READINESS SEMI-FINISHED POLYCOMPONENT PRODUCT

A. Zahorulko, A. Zagorulko

State Biotechnological University

Key words:

*Multicomponent natural semi-finished product
Paste fractional powder
Model design of functional equipment
Adaptation to 3-D printing technology*

Article history:

Received 07.01.2025
Received in revised form 21.01.2025
Accepted 11.02.2025

Corresponding author:

A. Zahorulko

E-mail:

zagorulko.andrey.nikolaevich@gmail.com

Citation: Загорулько А. М., Загорулько О. Є. (2025). Удосконалення способу виробництва полікомпонентного напівфабрикату високого ступеня готовності. *Наукові праці НУХТ*, 31(1), 197—207.
DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-1-17

ABSTRACT

The object of the research was a method of production of a multi-component semi-finished product of a high degree of readiness based on apple, Jerusalem artichoke, red beet and sea buckthorn with a high content of physiologically functional ingredients, which was implemented on a model design of functional equipment.

A feature of the improved method was the implementation of preliminary heat treatment with hot steam of the selected crop: apple — 1.0—2.0 min, Jerusalem artichoke — 3—6 min, and red beet — 6—12 min, respectively.

Grinding of raw materials was carried out on a double grinding machine (apple, Jerusalem artichoke and red beet — $0.2—0.5 \cdot 10^{-3}$ m, and sea buckthorn — 0.5—1 mm). The combined production of polycomponent semi-finished products of a high degree of readiness (pastes/fractional powder) was implemented on a model design of functional equipment.

The boiling process in a rotary-film evaporator was carried out at a temperature of 55 °C for 65 seconds until the content of dry substances was 25%. Drying of the boiled polycomponent mass was carried out in a single-drum cylindrical IR dryer at a temperature of 50 °C to a final moisture content of 3—6% and fractional grinding (0.3—0.6 mm).

The rheological properties of the paste-like multicomponent semi-finished product were determined by the change in dynamic viscosity for composition 2, which was 485 Pa·s, and in the control sample of applesauce, this indicator was 50 Pa·s. When boiling in a rotary-film evaporator at a temperature of 55 °C up to a content of 30% of dry substances, there was 3.2 times (600 Pa·s) increase in the strength of dynamic viscosity, and in the control (apple paste) this indicator was 178 Pa·s with a dry matter content of 25%.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-1-17

УДОСКОНАЛЕННЯ СПОСОБУ ВИРОБНИЦТВА ПОЛІКОМПОНЕНТНОГО НАПІВФАБРИКАТУ ВИСОКОГО СТУПЕНЯ ГОТОВНОСТІ

А. М. Загорулько, О. Є. Загорулько

Державний біотехнологічний університет

Об'єктом дослідження є удосконалений спосіб виробництва полікомпонентного напівфабрикату високого ступеня готовності на основі яблука, топінамбура, червоного буряка та обліпихи з високим вмістом фізіологічно функціональних інгредієнтів, що реалізовувався на модельній конструкції функціонального устаткування.

Особливістю удосконаленої способу є реалізація попередньої теплової обробки гострою парою обраної сировини: яблуко — 1,0...2,0 хв, топінамбур — 3...6 хв, червоний буряк — 6...12 хв. Протирання сировини реалізовувалося на здвоєній протиральній машині (яблуко, топінамбур і червоний буряк — $0,2...0,5 \cdot 10^{-3}$ м, а обліпиха — 0,5...1 мм). Комбіноване отримання полікомпонентних напівфабрикатів високого ступеня готовності (пасти/фракційний порошок) реалізовувалося на модельній конструкції функціонального устаткування.

Процес уварювання в роторно-плівковому випарнику здійснювався за температури 55 °С протягом 65 с до вмісту сухих речовин 25%. Сушіння увареної полікомпонентної маси проводилося в однобарабанній вальцовій ІЧ-сушарці за температури 50 °С до кінцевого вологовмісту — 3...6% та фракційного подрібнення (0,3...0,6 мм).

Визначено реологічні властивості пастоподібного полікомпонентного напівфабрикату за зміною динамічної в'язкості для композиції 2, що становить 485 Па·с, у контрольному зразку яблучного пюре — 50 Па·с. При уварюванні в роторно-плівковому випарнику за температури 55 °С до вмісту 30% сухих речовин спостерігається зростання міцності динамічної в'язкості в 3,2 раза (600 Па·с), а у контролі (яблучній пасті) цей показник становить 178 Па·с при вмісту сухих речовин 25%.

Ключові слова: полікомпонентний природний напівфабрикат, паста /фракційний порошок, модельне конструювання функціонального устаткування, адаптація під технологію 3-D друку.

Постановка проблеми. Рациональне харчування є невід'ємною складовою формування у споживчих кооперацій міцного імунітету та стійкості до викликів сьогодення (екологічних, хронічних, набутих тощо) та потребує використання відповідно якісних підходів від «лану до столу» (Charis та ін., 2021). Зміни умов життєдіяльності формують у споживачів стандарти споживання якісної продукції щоденного раціону, також збільшується попит на природні вироби фізіологічно функціонального призначення, мінімізацію синтетичних інгредієнтів та отримання продукції за сучасними технологіями. Використання сучасних виробничих технологій дає змогу використовувати ресурсоощадні підходи до якісного виробниц-

тва функціональних виробів природного походження. Для якісної реалізації сучасних виробничих потреб виникає потреба в удосконаленні традиційних способів, спрямованих на інтенсифікацію апаратурно-технологічної складової, зокрема шляхом використання полікомпонентних напівфабрикатів високого ступеня готовності для отримання функціональних виробів (Munekata та ін., 2021). Сучасні виробничі технології забезпечують отримання функціональних виробів без прив'язування до традиційних баз виробничих комплексів (переробні та харчові підприємства, готельно-ресторанні комплекси) (Piyush, Kumar, & Kumar, 2020). Впровадження інноваційних інженерно-технологічних рішень, спрямованих на вдосконалення способу виробництва полікомпонентного напівфабрикату високого ступеня готовності для отримання функціонального харчування, є актуальним завданням харчової промисловості європейських країн, оскільки забезпечить попит людей, особливо в екстремальних умовах, підвищить конкурентоспроможність виробничо-технологічного циклу на європейському ринку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У (König, & Renner, 2019) розроблено стратегію розвитку функціонального здорового харчування за умов адаптації споживачів до різноманіття кольорової гами виробу в умовах візуального привабливання. Це стало можливим за рахунок використання раціональних технологічних процесів, що дали змогу максимально зберегти початкові властивості рослинної сировини при виробництві функціональних виробів. Проте поза увагою залишаються питання доцільності використання власної сировинної бази для виробництва виробів на їх основі або ж отримання напівфабрикатів високого ступеня готовності. У праці (Rodríguez та ін., 2021) визначено формування потреб споживачів для формування щоденного раціону харчування. Але нерозкритим залишається питання забезпечення шляхів визначення та апробаційно-практичного дослідження полікомпонентного складу композицій не лише в рецептурах окремих виробів, а й в умовах формування полікомпонентних напівфабрикатів високого ступеня готовності. Це пояснюється необхідністю проведення масштабних комплексних досліджень з урахуванням фізико-хімічних, реологічних та органолептичних властивостей, їх зміни при апаратурно-технологічній обробці та виробничому циклу, що доволі складно реалізувати. Одним із найбільш простих шляхів виробництва функціональних виробів є впровадження сучасних тенденцій у сфері вдосконалення апаратурно-технологічних способів, у тому числі для виробництва рослинних полікомпонентних напівфабрикатів високого ступеня готовності. Вони можуть виступати одночасно в ролі виробів, готових до безпосереднього споживання, природних наповнювачів до рецептур різноманітних продуктів для підвищення харчової цінності та мінімізації синтетичної складової.

Використання власних ресурсних потужностей країни для виробництва функціональних полікомпонентних напівфабрикатів високого ступеня готовності з прогнозованими структурними й органолептичними властивостями є оптимальним в умовах підтримки агропромислового сектору країн (Hubbermann, 2016; Kasiyanchuk, 2013; Telezhenko, & Bezusov, 2004). Проте виникає необхідність впровадження різноманітних способів удосконалення технологічно-апаратурних рішень для забезпечення ресурсоощадної переробки рослинної сировини у функціональні напівфабрикати з можливістю подальшого використання в сучасних техноло-

гічних підходах, а отже, потребує апробаційних досліджень. Так, у праці (Mykhalov, Zahorulko, Zagorulko, Liashenko, & Dudnyk, 2021) наведено одне із рішень технологічної реалізації способу виробництва багатокомпонентної плодовоовочевої пасти на основі яблука, калини, чорноплідної горобини, гарбуза та буряку. При отриманні полікомпонентних напівфабрикатів на основі термолабільної сировини виникає необхідність у забезпеченні однорідної пореподібної маси для проходження подальших основних тепломасообмінних операцій з концентрування та сушіння (Zahorulko та ін., 2022). У праці (De Laurentiis, Corrado, & Sala, 2011) наведені дослідження стосовно вивчення технологічного циклу від переробки до виробництва харчових виробів з фізіологічно функціональними властивостями. Проте поза увагою залишаються питання, пов'язані з рівнем науково-технічного прогресу, можливості використання сучасних технологій і наявності власної сировинної бази. Особливу увагу при виробництві функціональних полікомпонентних напівфабрикатів високого ступеня готовності слід звертати на початкові фізіологічні властивості сировини, рівень ресурсоефективності апаратурно-технологічної складової та якість отриманої продукції (Yudina, & Nazarenko, 2016). Так, у праці (Alvarez, & Canet, 2013) наведені дослідні дані реологічних властивостей дитячих рослинних пюре в температурному діапазоні від 5 °C до 65 °C у широкому діапазоні швидкості зсуву (5...200 с⁻¹). Проте поза увагою залишається доцільність подальшого досушування пастоподібного концентрату одразу після уварювання для формування розширення функціональних властивостей напівфабрикатів високого ступеня готовності. Це пов'язано з імовірною відсутністю апаратурних засобів для реалізації процесу сушіння під час апробаційних досліджень. Аналіз сучасних літературних досліджень дав змогу сформулювати можливі шляхи удосконалення способу виробництва полікомпонентного напівфабрикату високого ступеня готовності з високим вмістом фізіологічно функціональних інгредієнтів. Проте потребують апробаційного визначення питання, пов'язані з використанням оптимальних щадних режимних параметрів для зберігання термолабільних властивостей рослинної сировини в умовах щадної тепломасообмінної обробки. Пошуку шляхів забезпечення комбінованого апаратурного оформлення для виробництва полікомпонентних напівфабрикатів високого ступеня готовності (пасти/фракційні порошки). Доцільним є проведення експериментально-практичних досліджень для забезпечення виробництва полікомпонентних напівфабрикатів високого ступеня готовності, що, у свою чергу, дасть змогу розширити асортимент конкурентоспроможних природних напівфабрикатів широкого спектра використання. Удосконалення способу виробництва полікомпонентних напівфабрикатів високого ступеня готовності дасть змогу забезпечити споживачів, у тому числі тих, що перебувають в екстремальних умовах (військовослужбовці, медики, волонтери, служби швидкого реагування), функціональними виробами швидкого споживання.

Метою дослідження є удосконалення способу виробництва полікомпонентного напівфабрикату високого ступеня готовності для подальшого використання при виробництві функціонального харчування.

Матеріали і методи. Для досліджень використовували власну ресурсну сировинну базу на основі: яблука (сорт «Антонівка»), топінамбуру (сорт «Львівський») червоного буряка (сорт «Циліндра») та обліпихи (сорт «Ботанічна»). Вся дослідно-апробаційна сировина зібрана у прифронтовій Харківській області і

проходженням подальшої апаратурно-технологічної обробки за умов врахування функціонально фізіологічного складу. Для проведення апробації запропоновано рецептурне співвідношення дослідних трьох композицій (табл. 1) на 100 г готової пюреподібної маси, яка буде проходити подальшу тепломасообмінну обробку уварюванням та сушінням.

Таблиця 1. Рецептурне співвідношення апробаційного пюреподібного полікомпонентного напівфабрикату

Рецептурно-компонентний склад, %	Композиція		
	1	2	3
Яблуко	30	35	45
Топінамбур	20	25	35
Червоний буряк	25	30	15
Обліпіха	25	10	5
Контроль	100	100	100

Спосіб виробництва полікомпонентних напівфабрикатів високого ступеня готовності (пасти/фракційні порошки) реалізовувався за рахунок попередньо змодельованої модельної конструкції функціонального устаткування (Cherevko, Mikhaylov, Zahorulko, Zagorulko, & Gordienko, 2021). Дослідження повторювались в 5-кратній повторюваності з відносною похибкою не більше 3% за традиційними методиками з обробки експериментально-практичних даних.

Викладення основних результатів дослідження. Початковим етапом переробки рослинної сировини (рис. 1) є класичні операції, спрямовані на інспектування, миття (для обліпіхи — обполіскування), попереднє подрібнення (5...10 мм) залежно від типу сировини для якісного проведення технологічних операцій з попередньої теплової обробки (бланшування, витримування тощо).

Попередня тепла обробка реалізовувалася в універсальному багатофункціональному апараті (Zagorulko та ін., 2018). Обробку гострою парою проходило: яблуко (1,0...2,0 хв), топінамбур (3...6 хв) та червоний буряк (6...12 хв). Після попередньої теплової обробки сировина проходила стадію протирання (без попереднього очищення від шкірки) на здвоєній протиральній машині з вихідним розміром часток $0,2...0,5 \cdot 10^{-3}$ м та 0,5...1 мм — для обліпіхи.

Інженерні рішення під час проєктування модельної конструкції функціонального устаткування для комбінованого отримання полікомпонентних напівфабрикатів високого ступеня готовності (пасти/фракційні порошки) дають змогу на монтажній платформі встановлювати здвоєні протиральні машини. При цьому протерта маса надходить від протиральних машин до ємності-змішувача, де реалізується стадія однорядного змішування пюреподібних мас у пюреподібну полікомпонентну масу.

Дослідна маса відповідно до рецептурне співвідношення композицій пюреподібного полікомпонентного напівфабрикату подається на подальшу технологічну обробку до модельної конструкції функціонального устаткування для комбінованого отримання полікомпонентних напівфабрикатів високого ступеня готовності. Уварювання реалізується в роторно-плівковому випарнику за температури 55 °С

протягом 65 с та досягнення вмісту сухих речовин в увареній масі — 25%. Уварена маса через технологічний патрубок поступає до фасувально-стерилізаційного механізму для подальшого зберігання пастоподібного пореподібного напівфабрикату високого ступеня готовності у світлонепроникній поліетиленовій тарі з використанням відповідно до подальших технологічних потреб.

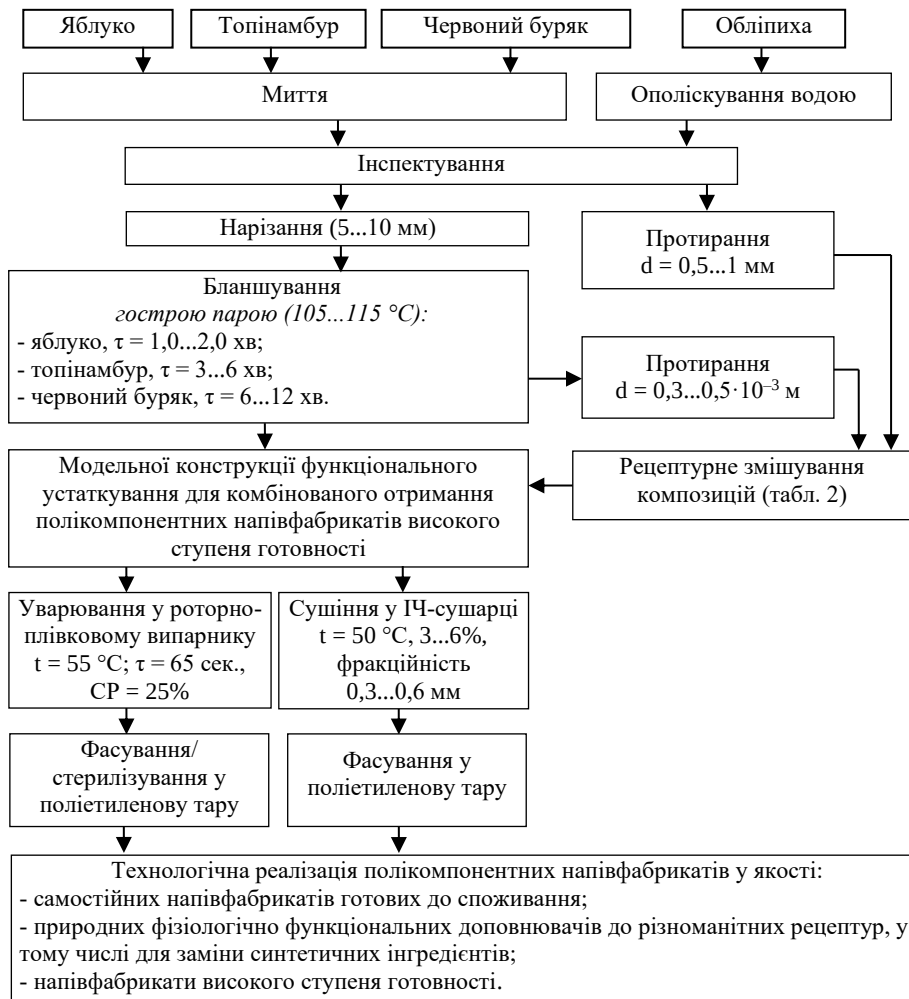


Рис. 1. Спосіб виробництва полікомпонентних напівфабрикатів високого ступеня готовності (паста/фракційні порошки), отриманих за умов використання модельної конструкції функціонального устаткування

Конструктивна реалізація роторно-плівкового випарника дає змогу реалізовувати процес досушування увареної полікомпонентної маси в однобарабній вальцовій ІЧ-сушарці за температури 50 °C (рис. 2). Висушена сировина характеризується кінцевим вологовмістом 3...6% та за допомогою механізму порошокподрібнення зі зрізаючими ножами отримує необхідну фракційність у межах

0,3...0,6 мм. Після висушування фракційний порошкоподібний напівфабрикат високого ступеня готовності зберігається у світлонепроникній поліетиленовій тарі для подальшого використання.

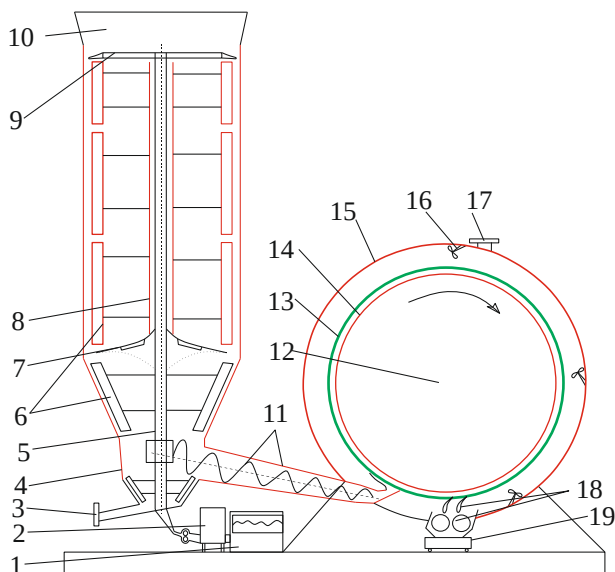


Рис. 2. Схема модельної конструкції функціонального устаткування для комбінованого отримання полікомпонентних напівфабрикатів високого ступеня готовності

(пасти/порошок): 1 — здвоєна протиральна машина; 2 — ємність-змішувач; 3 — патрубок відведення увареного напівфабрикату; 4 — теплоізований корпус роторно-плівкового апарата; 5 — пустотілий вал веретено; 6 — лопать, що зрізає, з відбивальною поверхнею із додатковим обігріванням (лопаті чорного кольору, не мають обігрівальної додаткової поверхні); 7 — відбивальна поверхня з елементами Пельтьє; 8 — додатковий корпус пустотілого валу веретено, що обігрівається; 9 — розподільний диск; 10 — сепаруюче відділення; 11 — нагнітаючий шнек; 12 — однобарабанна вальцюва ІЧ-сушарка; 13 — рифлений барабан; 14 — внутрішня поверхня, що нагрівається; 15 — теплоізована поверхня (кожух), що нагрівається; 16 — автономні вентилятор; 17 — патрубок відведення повітря; 18 — механізм порошкоподібнення зі зрізаючими ножами; 19 — накопичувальна ємність

Полікомпонентний напівфабрикат високого ступеня готовності (пасти/фракційні порошки) відповідно до технологічних потреб після фасування в поліетиленову тару може бути використаний як основний інгредієнт.

Обігрів теплоізованих робочих поверхонь роторно-плівкового випарника (4) та однобарабанної вальцювої сушарки (11), поверхонь, що нагріваються (9 та 13) здійснюється плівкоподібним резистивним електронагрівачем випромінювального типу (ПпЕНВт (Загорулько, & Загорулько, 2021)).

Робота функціонального устаткування для комбінованого отримання полікомпонентних напівфабрикатів високого ступеня готовності полягає у надходження рослинної сировини до здвоєної протиальної машини (1). Після протирання пореподібна сировина надходить до ємності-змішувача (2), де відбувається приготування полікомпонентної пореподібної маси відповідно до попередньо обраного

співвідношення компонентного складу інгредієнтів та за умов дотримання технологічних параметрів.

Пустотілий вал веретено (5) виконує роль транспортуючого трубопроводу полікомпонентної пюреподібної маси до розподільного диску (9), який реалізує плівкоутворення з подальшим уварюванням у робочій камері роторно-плівкового випарника за температури 55 °С. Для інтенсифікації процесу уварювання зовнішня поверхня валу веретено (5) має додатковий корпус, що обігрівается (9), забезпечують додаткове нагрівання пюреподібної маси перед надходженням на розподільний диск (9). По внутрішнім стінкам випарника плівкоподібна пюреподібна маса переміщається лопатями (6) за рахунок зрізання шару. Конструкцією лопаті, що зрізає, передбачено відбивальну поверхню з додатковим обігріванням (лопаті чорного кольору, не мають обігрівальної додаткової поверхні). Парова складова під час уварювання потрапляє до сепаруючого відділення (10) з подальшим охолодженням.

Конструктивно роторно-плівковий апарат має нижнє відділення, яке відокремлене від основної робочої зони відбивальною поверхнею з елементами Пельтьє (7). У нижній частині продовжується подальший рух увареної пюреподібної маси частковим відведенням через технічний патрубок (3). Вміст сухих речовин в увареній масі складає 25%, що забезпечує одночасне використання готового пастоподібного напівфабрикату в технології 3-D друку харчових виробів як основної платформи майбутньої продукції, а також є оптимальною для подальшого досушування в умовах нанесення на рифлену поверхню робочого барабана вальцьової сушарки.

Крім того, в нижній частині забезпечується часткове потрапляння увареної маси в нагнітаючий шнек (11) з теплоізолюваним кожухом, що нагрівається. Шнек (11) реалізує нагнітання увареної маси до робочої зони однобарабанної вальцьової ІЧ-сушарки (12), забезпечуючи однорідне нанесення увареної маси на рифлений барабан (13).

Вальцьова сушарка (12) має внутрішню поверхню (14), що нагрівається, та теплоізолювану поверхню (кожух), що нагрівається (15), а процес сушіння реалізується за температури 50 °С. Для конвективного руху повітряного середовища у внутрішньому середовищі сушарки (12) розташовані автономні вентилятори (16, у кількості 3 шт.). Низьковольтна напруга живлення в межах 3...6 Вт надходить від елементів Пельтьє, розташованих на відбивальній поверхні (7). Повітря з робочої камери сушарки відводиться до навколишнього середовища за допомогою патрубка (17). Висушена сировина з кінцевим вологовмістом на рівні 3...6% за допомогою механізму порошкоподрібнення зі зрізаючими ножами отримує необхідну фракційність (0,3...0,6 мм), що є оптимальною для матриці при 3-D друку харчових виробів.

Класичною практикою при виробництві полікомпонентних напівфабрикатів з прогнозованими структурними властивостями є визначення реологічних властивостей природних рослинних інгредієнтів у композиціях з урахуванням рецептурного співвідношення. Характер структури полікомпонентного пастоподібного напівфабрикату з визначенням залежності динамічної в'язкості від швидкості зсуву представлено на рис. 3 (контролем виступала — яблучна паста, структурні властивості наведені для композиції 2, відповідно до рецептури (табл. 1)).

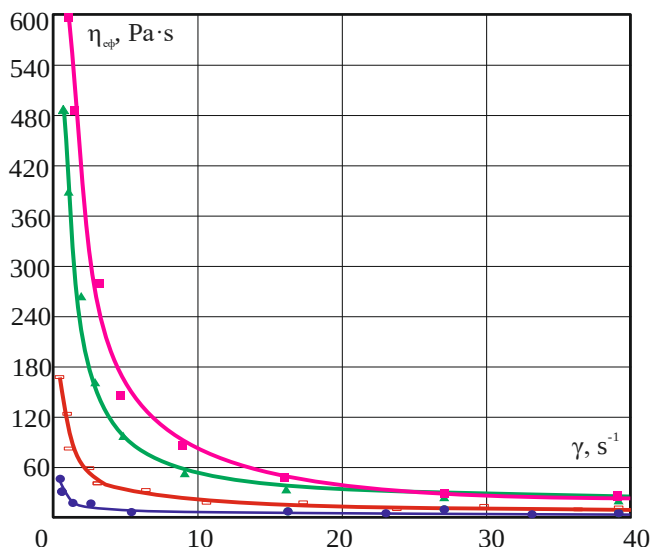


Рис. 3. Візуалізація реологічної поведінки полікомпонентної композиції 2 за кімнатної температури $t = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$: ● – контроль (яблучне пюре — 10% сухих речовин; □ — контроль (яблучна паста — 25% сухих речовин); купаж Б: ▲ — 25% сухих речовин; ■ — 30% сухих речовин

Рецептурна композиція 2 характеризується показником міцності реологічної структури на рівні 485 Па·с, тоді як у контролі цей показник становить 50 Па·с (яблучне пюре). При уварюванні в роторно-плівковому випарнику за температури $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ до вмісту 30% СР призводить до зростання показника міцності фактично в 3,2 раза (600 Па·с), при цьому в контролі (яблучна паста з вмістом СР — 25%, цей показник становить — 178 Па·с. Отримані дані підтверджують формування в полікомпонентному пастоподібному напівфабрикаті можливості отримання прогнозованих структурних властивостей з урахуванням рецептурного співвідношення. Крім того, високі показники динамічної в'язкості дають змогу здійснювати процес сушіння пастоподібного напівфабрикаті шляхом його нанесення на рифлену робочу поверхню барабана, яка обертається, без можливого відшарування нанесеного шару під час висушування. У свою чергу, високий показник динамічної в'язкості дає змогу використовувати полікомпонентний пастоподібний напівфабрикат високого ступеня готовності як основну сировинну платформу під час реалізації технології 3-D друку харчових функціональних виробів на рисовому (вафельному) папері. Використання такого типу паперу в технології 3-D друку зумовлене відсутністю в нього смаку, а висока динамічна в'язкість полікомпонентного пастоподібного напівфабрикату запобігає можливим змінам геометрії друкованої форми виробу та розшарування, що є основною вимогою при друку харчовими принтерами.

Висновки

Удосконалено спосіб виробництва полікомпонентного напівфабрикату високого ступеня готовності на основі яблука, топінамбура, обліпіхи та червоного бу-

ряка. Комбіноване отримання полікомпонентних напівфабрикатів пасти або порошок проведено на розробленій модельній конструкції функціонального устаткування. Конструкція дає змогу реалізувати процес уварювання у вертикальному випарнику за температури 55 °C протягом 65 с до вмісту сухих речовин 25%. У разі необхідності уварена маса відразу подається на сушіння у вальцову ІЧ-сушарку за температури 50 °C до кінцевого вологовмісту (3...6%) та фракційного подрібнення (0,3...0,6 мм). Обігрів теплоізолюваних робочих поверхонь випарника та вальцової сушарки здійснюється плівкоподібним резистивним електронагрівачем випромінювального типу. Низьковольтна напруга живлення в межах 3...6 Вт для автономної роботи витяжних вентиляторів надходить від елементів Пельтьє, розташованих на відбивальній поверхні.

Динамічна в'язкість пастоподібного полікомпонентного напівфабрикату (яблуко — 35, топінамбур — 25, обліпіха — 10, червоний буряк — 30) становить 485 Па·с, для контролю — 50 Па·с (яблучне пюре). Встановлено, що при уварюванні у випарнику за температури 55 °C до вмісту 30% СР забезпечується зростання показника міцності в 3,2 раза (600 Па·с), тоді як у контролі (яблучна паста з вмістом СР 25%) цей показник становить — 178 Па·с. Подальші дослідження передбачають практичну реалізацію 3-D друку функціональних виробів на основі полікомпонентних напівфабрикатів високого ступеня готовності на принтері «Decoplotter».

Подяка

Дослідження виконане в рамках держбюджетної теми проєкту молодих вчених України 1-24-25 БО «Розробка апаратурно-технологічних рішень виробництва багаторецьових полікомпонентних органічних напівфабрикатів і продуктів харчування в умовах військових дій та повоєнного відновлення країни» за підтримки Міністерства освіти і науки України.

Література

- Cherevko, O., Mikhaylov, V., Zahorulko, A., Zagorulko, A., Gordienko, I. (2021). Development of a thermal-radiation single-drum roll dryer for concentrated food stuff. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(11(109)), 25—32. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.224990>.
- König, L. M., Renner, B. (2019). Boosting healthy food choices by meal colour variety: results from two experiments and a just-in-time Ecological Momentary Intervention. *BMC Public Health*, 19, 975. <https://bmcpublihealth.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12889-019-7306-z>.
- Kumar, P. R., Kumar, R. (2020). 3D printing of food materials: A state of art review and future applications. *Materials Today: Proceedings*, 33(3), 1463—1467. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785320307318>.
- Rodríguez, L. G. R., Gasga, V. M. Z., Pescuma, M., Van Nieuwenhove, C., Mozzi, F., Burgos, J. A. S. (2021). Fruits and fruit by-products as sources of bioactive compounds. Benefits and trends of lactic acid fermentation in the development of novel fruit-based functional beverages. *Food Research International*, 140. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33648172>.
- Charis, M., Galanakis, Rizou, M., Turki, M. S. Aldawoud, Ucak, I., Rowan, N. J. (2021). Innovations and technology disruptions in the food sector within the COVID-19 pandemic and post-lockdown era. *Trends in Food Science & Technology*, 110, 193—200. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36567851>.
- Hubbermann, E. M. (2016). 8 — Coloring of Low-Moisture and Gelatinized Food Products, Editor(s): Reinhold Carle, Ralf M. Schweiggert, In Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition, Handbook on Natural Pigments in Food and Beverages. *Woodhead Publishing*, 179—196. https://www.researchgate.net/publication/303258885_8_Coloring_of_Low-Moisture_and_Gelatinized_Food_Products.

Moisture and Gelatinized Food Products.

Zahorulko, A., Zagorulko, A., Kasabova, K., Liashenko, B., Postadzhiev, A., & Sashnova, M. (2022). Improving a tempering machine for confectionery masses. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(116), 6—11. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254873>.

Mykhailov, V., Zahorulko, A., Zagorulko, A., Liashenko, B., Dudnyk, S. (2021). Method for producing fruit paste using innovative equipment. *Acta Innovations*, 39, 15—21. https://www.actainnovations.com/index.php/pub/article/view/39_2.

Valeria De Laurentiis, Sara Corrado, Serenella Sala (2011). Quantifying household waste of fresh fruit and vegetables in the EU. *Waste Management*, 77, 238—251. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29655924>

Paulo, E. S. Pérez-Álvarez, M. J. Á., Pateiro, M., Viuda-Matos, M., Fernández-López, J., Lorenzo, J. M. (2021). Satiety from healthier and functional foods. *Trends in Food Science & Technology*, 113, 397—410. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924224421003472>.

Alvarez, D., Canet, W. (2013). Time-independent and time-dependent rheological characterization of vegetable-based infant purees. *Journal of Food Engineering*, 114(4), 449—464. https://www.academia.edu/118769813/Time_independent_and_time_dependent_rheological_characterization_of_vegetable_based_infant_purees.

Zagorulko, A., Zahorulko, A., Kasabova, K., Chervonyi, V., Omelchenko, O., Sabadash, S., Zahorko, N., & Peniov, O. (2018). Universal multifunctional device for heat and mass exchange processes during organic raw material processing. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(1(96)), 47—54. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.148443>.

Kasiyanchuk, V. D. (2013). Sukhyi produkt topinambura — efektyvnyi napivfabrykat dlia vyrobnytstva produktsii likuvalno-profilaktychnoho pryznachennia. *Halytskyi likarskyi visnyk*, 21(3), 103—105. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/glv_2014_21_3_41.

Telezhenko, L. N., Bezusov, A. T. (2004). *Biologicheskii aktivnye veshchestva fruktov i ovoshchey i ih sohranenie pri pererabotke*. Odessa: «Optimum».

Yudina, T., Nazarenko, I. (2016). Technological parameters and modes of getting mashed zucchini with specified functional and technological properties. *Pratsi TDATU*, 1(16), 142—149. Available at: http://nauka.tsatu.edu.ua/print-journals-tdatu/16-1/16_1/21.pdf.

SCIENTIFIC APPROACHES TO THE SELECTION OF NEW GRAPE VARIETIES OF TRANSCARPATIA FOR THE PREPARATION OF SPARKLING WINES

V. Sydorenko, I. Babych, A. Kuts

National University of Food Technologies

Key words:

Sparkling wine
Transcarpathia
Terroir
Grapes
Chersegi Fuseresh
Quality indicators

Article history:

Received 02.01.2025
Received in revised form
14.01.2025
Accepted 30.01.2025

Corresponding author:

V. Sydorenko
E-mail:
klemence@ukr.net

Citation: Сидоренко В. О.,
Бабич І. М., Куц А. М.
(2025). Наукові підходи до
вибору нових сортів вино-
граду Закарпаття для при-
готування ігристих вин.
Наукові праці НУХТ,
30(6), 208—215.
DOI: 10.24263/2225-
2924-2024-30-6-18

ABSTRACT

The development of market relations and foreign economic activity dictates strict competitive conditions for Ukrainian wine-growing enterprises, which can be fulfilled through the progressive innovative development of economic entities. The current state of grape-growing enterprises is characterized by a reduction in the area of grape plantations, a decline in wine production, low competitiveness of domestic producers on the world market, and a complex system of quality control of products produced by the state.

Ukrainian sparkling wine producers face many problems. One of the most painful is the problem of raw materials. The sectoral program for the development of viticulture and winemaking of Ukraine for the period until 2025 states that a contradiction has arisen between the need for wine production in raw materials and the possibilities of the raw material base, which is manifested, in particular, in the insufficient number of plantings of grape varieties for the production of sparkling wines (Chardonnay, Pinot group).

The use of the new Chersegi Fuseresh grape variety for the production of the first sparkling wines in Transcarpathia was examined. The Chersegi variety is an exclusive grape for Ukraine, which grows well in the micro-terroirs of the Transcarpathian region and gives a good harvest and result in wine. And research in the direction of studying the sensory characteristics of the domestic producer of sparkling wines Chateau Chizay is a promising direction of research in view of the popularization of authentic Ukrainian wines.

It was established that in terms of quality indicators, grape varieties must meet the requirements for grapes from which sparkling wines will be produced, namely, grape berries must slowly accumulate sugar and lose acids, have a pronounced varietal aroma, and a light fresh taste. The feasibility of using the grape variety Chersegi Fuseresh will allow increasing the production of domestic sparkling wines in Ukraine.

The use of descriptive sensory evaluation allowed to reveal the sensory characteristics of the studied samples made from the Chersegi Fuseresh grape variety.

DOI: 10.24263/2225-2924-2024-30-6-18

НАУКОВІ ПІДХОДИ ДО ВИБОРУ НОВИХ СОРТІВ ВИНОГРАДУ ЗАКАРПАТТЯ ДЛЯ ПРИГОТУВАННЯ ІГРИСТИХ ВИН

В. О. Сидоренко, І. М. Бабич, А. М. Куц

Національний університет харчових технологій

Розвиток ринкових відносин і зовнішньоекономічної діяльності диктує українським виноградно-виноробним підприємствам жорсткі конкурентні умови, які можуть бути виконані шляхом прогресивного інноваційного розвитку господарюючих суб'єктів. Сучасний стан виноградно-виноробних підприємств характеризується скороченням площ виноградних насаджень, спадом виноробного виробництва, низькою конкурентоспроможністю вітчизняних виробників на світовому ринку і складною системою контролю якості продукції, що випускається з боку держави.

Сьогодні українські виробники ігристих вин стикаються з багатьма проблемами. Одна із найбільшочілих — сировинна проблема. Галузева програма розвитку виноградарства та виноробства України на період до 2025 р. констатує, що виникла неузгодженість між потребою виноробного виробництва в сировині і можливостями сировинної бази, що проявляється, зокрема, в недостатній кількості насаджень сортів винограду для виготовлення ігристих вин (Шардоне, групи Піно).

Вивчення органолептичних особливостей вітчизняного виробника ігристих вин Черсегі Фюсереш є перспективним напрямком досліджень з огляду на популяризацію автентичних українських вин. Сорт *Chersegi* — ексклюзивний для України виноград, який добре росте на мікротеруарах Закарпатського регіону, дає гарний врожай і результат у вині.

Встановлено, що за якісними показниками сорти винограду повинні відповідати вимогам, що висуваються до винограду, з якого будуть виробляти ігристі вина. Ягоди винограду повинні повільно накопичувати цукор і втрачати кислоти, мати яскраво виражений сортовий аромат, легкий свіжий смак. Доцільність використання нового сорту винограду Черсегі Фюсереш, дасть змогу збільшити в Україні виробництво вітчизняних ігристих вин.

Завдяки застосуванню дескрипторної органолептичної оцінки визначено сенсорну характеристику досліджуваних зразків, виготовлених з сорту винограду Черсегі Фюсереш, також з'ясовано, що ґрунтово-кліматичні умови Закарпатського регіону сприяють посиленню сортових особливостей досліджуваного винограду.

Ключові слова: ігристе вино, Закарпаття, теруар, виноград, Черсегі Фюсереш, показники якості.

Постановка проблеми. Однією з основних проблем виноробної галузі є те, що імпорт поступово витісняє вітчизняних виробників з ринку. Вітчизняні споживачі часто надають перевагу винній продукції іноземного походження, оскільки довіряють якості вина країн, які мають багаторічну історію і традиції виноробства,

хоча Україна також має 300-річну історію виноградного виробництва. У вирішенні цієї проблеми може допомогти держава.

Одним із перспективних напрямів розвитку ринку є винний туризм, який пов'язаний з ознайомленням з історією, технологією та культурою споживання алкогольних напоїв у Закарпатському регіоні та дегустацією вин безпосередньо у виробника. Дослідження з визначення впливу умов культивування винограду у мікрзоні Закарпатського регіону с. Мідяниця на якість ігристих вин із винограду сорту Черсегі Фюсереш є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найпоширенішим продуктом виноробної промисловості є ігристе вино, яке користується великим попитом у широких верств населення і вважається елементом здорового та успішного життя. У той же час результати маркетингових досліджень свідчать, що споживачі переважно віддають перевагу білим ігристим винам та вимогливо ставляться до їхніх органолептичних характеристик, особливо до ігристих і пінистих властивостей.

Світовий ринок шампанських та ігристих вин невинно розвивається. Протягом останнього десятиріччя виробництво цих напоїв у світі зросло в цілому на 40%. Станом на 2023 р. в Україні випуск ігристих і шампанських вин сягнув 26,93 тис. дал, що рівноцінно 39,91 млн пляшок. Характерною особливістю стало інтенсивне підвищення попиту на продукцію вітчизняного виробника і, як результат, зростання виробництва на 21,1% порівняно з 2022 р. (Buxaderas, Riu-Aumatell, & López-Tamames, 2022; Izquierdo-Llopart, Anaïs, Carretero, & Javier Saurina, 2020).

Вина поділяються на ігристі і тихі. Ігристе вино — це вино, насичене вуглекислим газом, що робить його шипучим, при цьому вуглекислий газ утворюється в результаті природного бродіння. Неправильно називати ігристе вино шампанським. Шампанське — це різновид ігристого вина, яке може вироблятися виключно у французькій провінції Шампань.

За останнє десятиліття науково-практична діяльність багатьох науковців (Прида, 2000; Stevenson, 2008; Martínez-Lapuente, Pérez-Magariño, & Ortega-Heras, 2013; Sáenz Gamasa et. al., 2009; Suriano, 2015; Gonzalez, Martínez-Rodríguez, & Carrasco, 2003; Corsinovi, Gaeta, & Corsi, 2013) спрямована лише на дослідження впливу окремих технологічних факторів на піноутворення виноматеріалів і вин (Прида, 2000; Catarino, Alves, & Mira, 2014; Martínez-Lapuente, Pérez-Magariño, & Ortega-Heras, 2013; Sáenz Gamasa et. al., 2009; Stevenson, 2009; Suriano, 2015; Velikova, 2015).

Для того щоб зробити тихе вино, потрібне одне бродіння, щоб виготовити більшість ігристих вин, потрібно перебродити вино ще раз. Фактично, ігристі можна назвати двічі вибродженими винами. Найбільше ігристі вина люблять за те, що бульбашки додають особливу тактильну перевагу — пухирці CO₂ лоскочуть і посколюють слизову, коли людина робить ковток. І якщо первинне бродіння у виробництві всіх ігристих відбувається однаково, залежно від кольору винограду й бажаного результату, то саме вторинна ферментація визначає рівень якості ігристого (Dobrei et al., 2010; Bazquez, & Quevedo, 2005).

Найчастіше застосовують два методи: традиційний і акратофорний. Найціннішим вважається традиційний метод, так роблять шампанське, франчакорту та креман. Простішим методом є акратофорний чи метод Шарма, за яким виготовляють просеко, ламбруско та інші ігристі вина. Незалежно від методу виготовлення,

ігристі вина бувають білими, рожевими та навіть червоними і можуть вміщувати різну кількість цукру (Ivit, Neslihan, & Kemp, 2018; Culbert et al., 2017).

Шампанське (від фр. *Champagne* — шампань) — ігристе вино, виготовлене з винограду, який росте в певному районі в провінції Шампань, що знаходиться в ста милях на схід від Парижу. Все шампанське в цьому районі виготовляється з використанням особливого процесу, який полягає в ферментації всередині пляшки, після чого вино стає ігристим.

В Україні є декілька виробників вина, які випускають ігристі вина. Високоякісні ігристі вина виготовляють в Україні: виноробня «Колоніст» Івана Пlachкова, виноробня «Шато Чизай», Guliev winegroup (Французький бульвар), компанія «Shabo», 46 паралель, Бейкуш, «Винарня Ковача» та ін.

Більшість українських виробників ігристих вин виробляють вина за допомогою методу Шарма. В Україні сегмент виробництва ігристих вин на Закарпатті був не заповнений до недавніх часів. Закладаючи виноградники Шато Чизай у 2006 р., посадили невідомий тоді в Україні сорт угорського походження Черсегі Фюсереш, для якого підходять умови Карпатського макротеруару. Сьогодні, окрім сухого вина з цього сорту винограду, в колекції ТОВ «Chateau Chizay» є два ігристі вина Carpathian Sekt Cherségi у стилях бріот і екстра драй. Експерти і поціновувачі вина відзначають ці вина за виразну свіжість і характерну приємну пікантність (Сидоренко, Бутузов, & Бабич, 2024).

Існує низка проблем, які перешкоджають динамічному розвитку галузі. Вирішення цих проблем вимагає підтримки з боку держави, зокрема, встановлення нульової відсоткової ставки акцизного збору на ігристі, сухі та інші види вина, технологія виробництва, яких не передбачає використання етилового спирту, а також підтримка виноробів у просуванні вітчизняних вин за кордоном, що сприятиме освоєнню нових ринків (Сидоренко, Бутузов, & Бабич, 2024).

Мета статті: дослідження та аналіз органолептичних і фізико-хімічних показників ігристих вин Закарпаття з нового сорту винограду Черсегі Фюсереш (Csereszegi fűszeres), на які впливають сума активних температур місцевості, теруар, температурні режими визрівання та збирання винограду, схеми переробки.

Матеріали і методи. Матеріалами дослідження були сорт винограду Черсегі Фюсереш, виноматеріали та ігристі вина з вищезазначеного сорту ТОВ «Шато Чизай» Закарпатського регіону України. Особлива увага приділялася дослідженням, що зосереджувалися на збереженні органолептичних показників сировини в готових ігристих винах.

Викладення основних результатів дослідження. Якість ігристих вин залежить багато в чому від якості основної сировини для їхнього виробництва — винограду. Якість винограду та одержуваних з нього виноматеріалів залежить від багатьох чинників: сорту, теруару вирощування, агротехнічних прийомів оброблення, термінів збирання врожаю, способів переробки винограду, якості сусле, дріжджів тощо.

Вважається, що вирішальним фактором, який має фундаментальне значення у формуванні якості готової продукції, є сорт винограду. Сорт винограду може виявити себе найбільшою мірою і забезпечити одержання високоякісної продукції тільки у визначених природних умовах і в разі застосування агротехнічних при-

йомів, найбільшою мірою відповідних його агробіологічним особливостям і теруару вирощування. Існує думка, що використання ознак сорту, особливостей ґрунтово-кліматичних умов вирощування і застосовуванню агрокомплексом і є визначальним у якості вина в більшому ступені, ніж технологія. Безумовно, одним з основних шляхів забезпечення заводів ігристих вин виноматеріалами є створення власних сировинних баз. Виноробня «Шато Чизай» створила власні сировинні бази. Усі виноградники районовані, мають карти ґрунтів, рельєфу і термічних ресурсів, забезпечені паспортом. Саме в цьому документі сконцентровано життєво важливу інформацію про ґрунти і рельєф певного виноградного сектора, його мікроклімат, сорт і кондиції винограду, схеми посадки, обсяги регульованої врожайності тощо. Ця інформація надає можливість врахувати індивідуальні особливості кожного виноградного куща, кожного грона. Тільки так досвідчений виноградар може створити ідеальні технічні умови для вирощування цієї культури.

Першим етапом досліджень був аналіз літературних джерел, у яких визначалися характеристики Закарпатського регіону як виноробного краю та особливості ґрунтово-кліматичних умов культивування винограду Черсегі Фюсереш і формуванню органолептичних особливостей ігристих вин. Ароматичні речовини в ігристих винах з'являються на різних етапах: сорт винограду (сортівий аромат), бродіння суслу (фоновий аромат), вторинне бродіння в акратофорах (вторинні аромати).

Наступним етапом була характеристика органолептичних особливостей ігристих вин ТОВ «Шато Чизай» за дескрипторами з метою визначення особливостей аромату та їх смаку. Ігристі вина *Carpathian Sekt Chersegi Extra Dry* та *Carpathian Sekt Chersegi*, отримані з виноматеріалу винограду сорту Черсегі Фюсереш, мають світло-солом'яне забарвлення із зеленуватим відтінком, чистий, плодовий, фруктовий-квітковий букет з відтінками акації та мінералів, повний, елегантний, свіжий, ніжний, м'який, складний і гармонійний смак з тонами витримки та квітів і фруктів, з приємною кислотністю. Під час наливання в келих у всіх зразках вин спостерігається стійка та щільна піна у вигляді рухомих «острівців» на поверхні вина, що супроводжується уповільненим і тривалим виділенням бульбашок діоксиду вуглецю малих розмірів.

Застосування дескрипторної органолептичної оцінки дало змогу розкрити сенсорну характеристику кожного зразка. Результати аналізу представлені на рис. 1, 2, 3.

З даних профілограм видно, що більш ароматичними характеристиками відмічається зразок білого ігристого вина *Carpathian Sekt Chersegi Extra Dry* з м'яким, соковитим і свіжим смаком, в якому найкраще відчувались ноти троянди, цитрусу, квітів, соковитих фруктів та освіжаюча кислотність. В ароматі відчувались соковиті зелені та кісточкові фрукти, цвітіння плодових дерев та акації.

Отже, ґрунтово-кліматичні умови Закарпатського регіону сприяють посиленню сортових особливостей винограду сорту Черсегі Фюсереш. Раса дріжджів ICV D379 здатна посилювати та збагачувати ароматичний потенціал ігристих вин.

Оцінка придатності теруару Закарпатської області для вирощування винограду Черсегі Фюсереш підтвердила, що Закарпатська область придатна для вирощування винограду Черсегі Фюсереш, оскільки має сприятливий клімат, ґрунти та рельєф для вирощування цього сорту.



Рис. 1. Профілограма сенсорного оцінювання білого ігристого вина Carpathian Sekt Chersegi Extra Dry



Рис. 2. Профілограма сенсорного оцінювання білого ігристого вина Carpathian Sekt Chersegi



Рис. 3. Профілограма сенсорного оцінювання білого виноматеріалу для ігристих вин з винограду Черсегі Фюсереш

Для отримання високоякісного винограду Черсегі Фюсереш необхідно дотримуватися таких агротехнічних заходів:

- підбір відповідних сортів винограду;
- внесення необхідних поживних речовин;
- обприскування виноградної лози від шкідників і хвороб;
- збирання врожаю в оптимальні терміни.

Дотримання цих заходів дасть змогу отримати високоякісний виноград Черсегі Фюсереш, який можна використовувати для виробництва ігристих вин з унікальними органолептичними властивостями.

Характеристика теруару села Мідяниця, Іршавського району, Закарпатської області наведена у табл. 1.

Таблиця 1. Характеристика теруару

Ґрунти	бурі гірсько-лісові, лучно-буроземні
Схил	6°—7°
Середньо річна температура, °C	3180
Середньо річна кількість опадів, мм	956

Мікрозона має крутизну схилу ділянки 6°—7°, що дає змогу отримувати виноград Черсегі Фюсереш з більшим вмістом цукру порівняно з іншими ділянками, а також виноматеріал з потрібним вмістом титрованих кислот.

Вищий вміст середньорічних температур і менший вміст середньорічних опадів буде сприяти цукронакопиченню. Кислотність з'являється через прохолодні ночі, адже на Закарпатті в гірських ділянках не має різкої зміни температури, тому вона є оптимальною для вирощування винограду для ігристих вин.

Висновки

Дослідження показали, що біле ігристе вино Carpathian Sekt Cherségi Extra Dry, вироблене на Закарпатті компанією ТОВ «Шато Чизай», отримало найвищий бал за яскравість аромату, кольору і повноту смаку.

Аналіз органолептичних характеристик вин Закарпатського регіону показав, що ігристі вина, виготовлені в цьому регіоні, мають специфічні органолептичні характеристики, які відрізняють їх від вин інших регіонів.

При вторинному бродінні виноматеріалу з винограду Черсегі Фюсереш, культивованого на Закарпатті, відбувається посилення його дескрипторів. Цей сорт винограду має високі ароматичні характеристики, які зберігаються навіть після вторинного бродіння. Ґрунтово-кліматичні умови села Мідяниця, Іршавського району, Закарпатського регіону сприяють посиленню сортових особливостей винограду Черсегі Фюсереш.

Соціально-економічна ефективність полягає в отриманні високоякісних вітчизняних ігристих вин із зазначеного сорту винограду, що дає змогу запропонувати ринку продукцію, яка не має аналогів в Україні і світі.

Література

Прида, І. А. (2000). *Совершенствование производства игристых вин*. Кишенев: SOLO-EIDUKAITIS.

Сидоренко, В. О., Бутузов, Ф. А., Бабич, І. М. (2024). *Локальний сорт винограду Закарпаття*. Збірник матеріалів IV Міжнародної науково-практичної конференції «Innovative research and perspectives of the development of science and technology». Stockholm, 372—373.

- Dobrei, A. et al. (2010). Changes in the chromatic properties of red wines from *Vitis vinifera* L. cv. Merlot and Pinot Noir during the course of aging in bottle. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 8(2), 20—24.
- Bazquez Quevedo, R. J. (2005). Wine Color: sensory evaluation and selection of color cards: Thesis Submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of Master of science in Viticulture and Enology. University of California, 70.
- Buxaderas, S., Riu-Aumatell, M., López-Tamames, E. (2022). Managing the quality of sparkling wines. *Managing wine quality*. Woodhead Publishing, 797—844.
- Catarino, A., Alves, S., Mira, H. (2014). Influence of technological operations in the dissolved oxygen content of wines. *Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 390—394.
- Corsinovi, P., Gaeta, D., Corsi, A. (2013). *Consumer preferences of rosé wine: an analyses trugh the Best-Worst method*. 7th AWBR International Conference, 3.
- Culbert et al. (2017). Influence of production method on the chemical composition, foaming properties, and quality of Australian carbonated and sparkling white wines. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65, 1378—1386.
- Gonzalez, Martínez-Rodríguez, Carrascosa. (2003). Yeast autolytic mutants potentially useful for sparkling wine production. *International journal of food microbiology*, 13—15. DOI: 10.1016/s0168-1605(02)00389-6.
- Jackson, R. S. (2017). *Wine Tasting. A professional handbook, third edition*. Academic press.
- Jackson, R. S. (2014). *Wine Science: Principles and Applications*, 4th ed. Academic Press.
- Ivit, Neslihan, N., Kemp, B. (2018). The impact of non-Saccharomyces yeast on traditional method sparkling wine. *Fermentation*, 4, 73.
- Izquierdo-Llopart, A., Carretero, A., Javier S. (2020). Organic acid profiling by liquid chromatography for the characterization of base vines and sparkling wines. *Food Analytical Methods*, 13, 1852—1866.
- Kemp, B., Alexandre, H., Robillard, B., Marchal, R. (2015). Effect of Production Phase on Bottle-Fermented Sparkling Wine Quality. *Journal of agriculture and food chemistry*, 18—20.
- Kemp et al. (2019). Chemical compounds and mechanisms involved in the formation and stabilization of foam in sparkling wines. *Critical reviews in food science and nutrition*, 59, 2072—2094.
- Martínez-Lapuente, L., Pérez-Magariño, S., Ortega-Heras, M. (2013). Multivariate analysis for the differentiation of sparkling wines elaborated from autochthonous Spanish grape varieties, Volatile compounds, amino acids and biogenic amines. *European Food Research and Technology*, 20. DOI: 10.1007/s00217-013-1934-9.
- Martínez-Lapuente, L. et al. (2013). Sparkling wines produced from alternative varieties: Sensory attributes and evolution of phenolics during winemaking and aging. *American journal of enology and viticulture*, 64, 39—49.
- Saenz, G. et al. (2009). Measurement of the colour of white and rosé wines in visual tasting conditions. *European Food Research and Technology*, 229(2), 263—276.
- Stevenson T. (2009). *The new Sothebys wine encyclopedia*. London: Elsevier.
- Suriano, S., Basile, T., Tarricone, L., Gennaro, D., Tamborra, P.(2015). Effects of skin maceration time on the phenolic and sensory characteristics of Bombino Nero rosé wines. *Italian Journal of Agronomy*, 10, 10—12.
- Velikova, N., Charters, S., Bouzdine-Chameeva, T., Fountain, J. (2015). Pink: a cross-cultural examination of the perceived image of rosé wine. *International Journal of Wine Business Research*, 27, 15.

УДК 66.093.48

OXYGEN AND ARGON IMPACT ON ADSORPTION AND CATALYTIC PROCESSES OCCURRING DURING PURIFICATION OF SORTIVKA BY ACTIVE CARBON AND NATURAL ADSORBENTS

A. Yakimenko, L. Melnyk, O. Bessarab

National University of Food Technologies

Key words:

Sortivka
Active carbon
Catalytic processes
Oxygen
Argon
Palygorskit
Hydromica

Article history:

Received 03.01.2025
Received in revised form
20.01.2025
Accepted 04.02.2025

Corresponding author:

A. Yakimenko

E-mail:

jakimenko.andrey@gmail.com

Citation: Якименко А. В., Мельник Л. М., Бессараб О. С. (2025). Вплив кисню та аргону на адсорбційно-каталітичні процеси, що відбуваються при очищенні сортівків активним вугіллям і природними адсорбентами. *Наукові праці НУХТ*, 31(1), 216—225. DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-1-11

ABSTRACT

In modern alcoholic beverage production obtained sortivka (40% alcohol solutions) are subjected to adsorption purification by active carbon (AC). Active carbon — grain system involves sorption and catalytic transformations. At the same time oxygen comes from air, is dissolved in sortivka and adsorbed on the developed surface of AC.

It is very important to search for cheaper and more efficient adsorbents based on natural dispersed minerals. These are palygorskite and hydromica. To study the effect of oxygen on adsorption and catalytic processes occurring during purification of sortivka, argon or air was dynamically passed through carbon-sortivka, palygorskite-sortivka and hydromica-sortivka systems. At certain time intervals, liquid phase was separated from carbon, palygorskite and hydromica and then analyzed chemically for aldehyde content.

As the result of research it was found that synthetic nitrogen-doped carbon (SCN) was the most active in formation of aldehydes. During first 15 minutes of interaction between BAC-A (birch-derived active carbon) or KAC-2 (active carbon derived from fruits pits and nut shells) with sortivka, the aldehyde content in it decreased. It is not advisable to have interaction between sortivka and BAC-A or KAC-2 for more than 30 minutes.

For palygorskite and hydromica first 15 minutes were the most effective for purification of sortivka, with palygorskite sorbing aldehydes better than hydromica. After 30 min in the presence of oxygen aldehyde content in the initial and purified samples of sortivka became almost the same.

During bubbling through argon systems, it was found that BAC-A exhibited the highest sorption capacity for aldehydes, KAC-2 exhibited insignificant capacity while SCN practically did not adsorb aldehydes from sortivka.

Adsorption capacity of palygorskite and hydromica for purification of sortivka from aldehydes in the absence of oxygen increased significantly, reducing initial content by more than two times in 15 minutes of interaction.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-1-11

ВПЛИВ КИСНЮ ТА АРГОНУ НА АДСОРБЦІЙНО-КАТАЛІТИЧНІ ПРОЦЕСИ, ЩО ВІДБУВАЮТЬСЯ ПРИ ОЧИЩЕННІ СОРТІВОК АКТИВНИМ ВУГІЛЛЯМ І ПРИРОДНИМИ АДСОРБЕНТАМИ

А. В. Якименко, Л. М. Мельник, О. С. Бессараб

Національний університет харчових технологій

У сучасному лікєро-горілочному виробництві отримані сортівки піддають адсорбційному очищенню активним вугіллям (АВ). У системі «активне вугілля — сортівка» відбуваються процеси сорбції та каталітичних перетворень. При цьому кисень надходить з повітря, він розчинений у сортівці та адсорбований на поверхні АВ.

Дуже важливим є пошук більш дешевих і ефективних адсорбентів на основі природних дисперсних мінералів. Такими є палигорськіт і гідрослюда. Для дослідження впливу кисню на адсорбційно-каталітичні процеси, що відбуваються при очищенні сортівок, через вугільно-сортівочні, палигорськіто-сортівочні і гідрослюда-сортівочні системи динамічним способом пропускали аргон або повітря. Через певні проміжки часу рідку фазу відділяли від вугілля, палигорськіту і гідрослюди й аналізували хімічним способом на вміст альдегідів.

У результаті досліджень встановлено, що синтетичне азотовмісне активне вугілля (СКН) виявляє найбільшу активність в утворенні альдегідів. За перші 15 хв взаємодії БАВ-А і КАВ-2 із сортівкою відбувається зменшення в ній вмісту альдегідів. Збільшення часу контакту сортівки з БАВ-А і КАВ-2 більше, ніж на 30 хв, є недоцільним. Для палигорськіту і гідрослюди перші 15 хв є найбільш ефективними для очищення сортівки, причому палигорськіт сорбує альдегіди краще, ніж гідрослюда. Через 30 хв у присутності кисню вміст альдегідів у початковій і очищеній сортівці стає майже однаковим.

При барботуванні через системи аргону встановлено, що найбільшу сорбційну спроможність щодо альдегідів виявляє БАВ-А, незначну — КАВ-2, СКН практично не адсорбує альдегідів із сортівки.

Адсорбційна спроможність палигорськіту і гідрослюди щодо очищення сортівок від альдегідів за відсутності кисню значно зростає, зменшуючи початковий вміст більш, ніж удвічі за 15 хв взаємодії.

Ключові слова: сортівка, активне вугілля, каталітичні процеси, кисень, аргон, палигорськіт, гідрослюда.

Постановка проблеми. Виробництво етилового спирту та лікєро-горілочаних виробів посідає вагоме місце в економіці країни, тому дослідження, пов'язані з покращенням якісних показників спирту і лікєро-горілочаних виробів, здешевлення цих виробів, є надзвичайно актуальними.

У сучасному лікєро-горілочному виробництві отримані сортівки, в основному, піддають адсорбційному очищенню активним вугіллям (Шиян, Сосницький, Шев-

ченко, & Кириленко, 2022). Недоліком активного вугілля, як промислового адсорбента, є його горючість і дороговизна. Дуже важливим є пошук більш дешевих ефективних адсорбентів на основі природних дисперсних мінералів.

На сьогодні існує понад 100 родовищ природних дисперсних мінералів різних генетичних типів сумарним запасом понад 100 млн тонн. Черкаське родовище є одним із найбільших не тільки на території України, а й у всьому світі. Його унікальність обумовлена не тільки величезними запасами (18 млн тонн), але й зосередженням в одному місці чотирьох дисперсних мінералів, розміщених природою пошарово горизонтально або під невеликим нахилом. Мінерали першого шару (палигорськіт, гідрослюда, монтморилоніт) особливо важливі для хімічної і харчової промисловостей (Лукіяник та ін., 2001; Ковальов, & Гречко, 2000; Подгорський та ін., 2000; Безруков та ін., 2005; Стеценко, Мірошніков, Манк & Подобій, 2008).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Науковці багатьох країн приділяють належну увагу дослідженню процесів адсорбційного очищення водно-спиртових розчинів від небажаних домішок, підвищуючи при цьому якість і безпечність лікєро-горілочної продукції. Вони активно підтримують пошук і розробку ефективних та дешевих способів очищення, які знижуватимуть рівень метанолу, вищих спиртів та інших шкідливих домішок в алкогольних напоях, у тому числі альдегідів, що негативно впливають на якість спиртних напоїв чи можуть навіть мати потенційно канцерогенну дію для людини (як, наприклад, оцтовий альдегід) (Balcerek, Pielech-Przybylska, Patelski, Dziekońska-Kubczak, & Jusel, 2017).

Слід відмітити, що в багатьох випадках для очищення водно-спиртових розчинів науковці прагнуть використовувати активне вугілля, яке отримують з відходів виробництва (Balcerek, Pielech-Przybylska, Patelski, Dziekońska-Kubczak, & Jusel, 2017; Kuzmin та ін., 2017; Thakur, Kumar, & Zhang, 2023; Ríos-Hernández та ін., 2023; Wu Ziyang та ін., 2024). При цьому вони визнають, що в цілому недоліком активного вугілля є те, що обробка лікєро-горілочаних напоїв цим адсорбентом усуває як шкідливі домішки, так і сполуки, які є бажаними з точки зору смаку та аромату напоїв, що може бути особливо важливим для виробництва таких лікєро-горілочаних напоїв, як віскі, горілка чи текіла (Balcerek, Pielech-Przybylska, Strąk, Patelski, & Dziekońska-Kubczak, 2016; Ríos-Hernández та ін., 2023). Тому частина досліджень присвячується аналізу ефективності різних модифікацій активного вугілля чи його композицій з іншими адсорбентами (Shendrik, Levandovskiy, Kuts, Prybylskiy, & Grabovska, 2019; Левандовський, Шендрік, Куц, & Стукальська, 2021; Двірко, & Бойко, 2024). Крім того, чимало іноземних науковців прагнуть досліджувати саме адсорбенти, які легко можуть бути знайдені саме у їх місцевості, наприклад, активне вугілля з відходів мескитової деревини в Мексиці (Ríos-Hernández та ін., 2023) чи активне вугілля з відходів зернових від виробництва лікєру байдзю у Китаї, модифіковане пірофосфорною кислотою (Wu Ziyang та ін., 2024).

Так, наприклад, науковці з Польщі провели дослідження впливу обробки активним вугіллем та двома іншими адсорбентами (розробленими на основі діоксиду кремнію та композиції активного вугілля й діоксиду кремнію) на хімічний склад та органолептику сільськогосподарського дистиляту на основі ячмінного солоду. Їх дослідження показали, що найбільше зниження концентрації летких сполук (альдегідів, спиртів, складних ефірів) досягається за умови застосування до зразків 1 г активного вугілля (SpiritFerm) на 100 мл дистиляту з вмістом етанолу 50%

об./об. протягом 1 год, а збільшення дози адсорбенту понад 1 г не призводить до суттєвого покращення. При цьому активне вугілля показало найнижчу адсорбцію щодо ацетальдегіду і метанолу. Водночас польські дослідники прийшли до висновку, що «цікавою альтернативою» активному вугіллю є адсорбент, виготовлений з активного вугілля і діоксиду кремнію (Spiricol). Згідно з їхніми висновками, обробка цим адсорбентом утворює дистилат з найменшими концентраціями ацетальдегіду та ізовалеральдегіду, що забезпечує найбільше покращення його органолептики (Balcerek, Pielech-Przybylska, Patelski, Dziekońska-Kubczak, & Jusel, 2017).

Вітчизняна наукова спільнота для очищення водно-спиртових розчинів більш активно досліджує процеси використання таких природних адсорбентів, як палигорський і гідрослюда (Mank, & Melnyk, 2004; Мельник, Манк, & Третинник, 2004), клиноптилоліт і шунгіт (Marynchenko, Marynchenko, & Hyvel, 2017; Oliinyk, Tara-siuk, Samchenko, Kutz, & Dulka, 2021), значні поклади яких є в Україні.

Як іноземні, так і вітчизняні вчені у своїх працях демонструють, що результати адсорбційних процесів залежать від багатьох змінних факторів, у тому числі характеристик і модифікацій самого адсорбента, розчину та застосовних методів обробки. Зростаючий запит суспільства на якісну та безпечну продукцію спонукають наукову спільноту не зупинятися на вже досягнутому та продовжувати досліджувати інші можливі варіанти та підходи до очищення водно-спиртових розчинів від небажаних домішок.

Мета дослідження: встановлення впливу кисню та аргону на адсорбційно-каталітичні процеси, що відбуваються при очищенні сортівок активним вугіллем і природними адсорбентами.

Матеріали і методи. Матеріалами дослідження були: сортівка (40% об.), активне вугілля БАВ-А, КАВ-2 фракції 2,0÷3,0 мм, СКН — 1,5÷2,0 мм, палигорський і гідрослюда фракції 2,0÷3,0 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).

Застосування палигорського та гідрослюда для очищення водно-спиртових розчинів від домішок дозволено МОЗ України (№3/8-А-10862).

Для встановлення фракційності адсорбентів використовували сита із різним діаметром отворів, що представляли собою комплект із п'яти сит. Адсорбенти засипали на верхнє сито, що закривалося кришкою, сильно струшували та отримували розсів адсорбентів на різні фракції. Кожну фракцію зберігали окремо в скляній посудині, закритій притертою пробкою.

Перед використанням розсіяні мінерали зважували на терезах і піддавали висушуванню.

Висушували адсорбенти в електрошафі СЕШ-1 при температурі 180 °С протягом 4—5 годин. Висушені бюкси з наважками адсорбентів витримували в ексикаторі протягом 30 хв, а потім заповнювали ними адсорбери.

Для визначення вмісту альдегідів застосовували колориметричний 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 фотоелектроколориметрі ФЕК-60 в кюветах з довжиною грані 20 мм при зеленому світлофільтрі з довжиною світлової хвилі λ — 536 нм. Забарвленість досліджуваного розчину не повинна бути інтенсивнішою забарвленості типового розчину.

Для дослідження адсорбційного очищення сортівки адсорбентами було спроектовано і виготовлено дослідну установку, схема якої наведена на рис. 1.

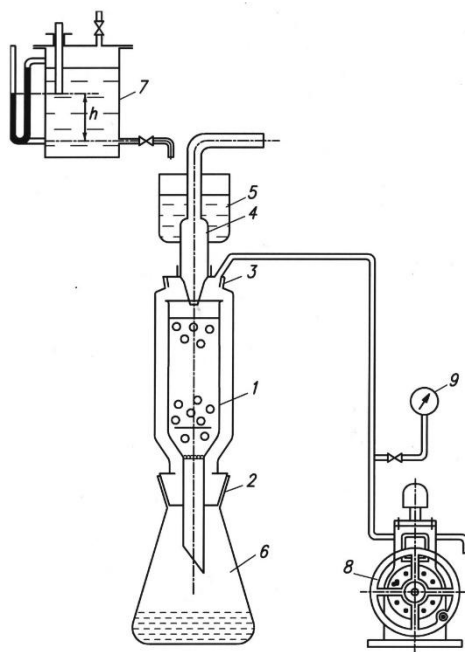


Рис. 1. Схема дослідної установки для адсорбційного очищення водно-спиртових розчинів: 1 — адсорбер; 2, 3 — шліф; 4 — шліф-кран; 5 — мішень живлення; 6 — збірник очищеного розчину; 7 — напірна ємність живлення; 8 — вакуум-насос; 9 — вакуумметр

Принцип роботи установки: попередньо фракціоновані, зважені, висушені при $t=180$ °С протягом 5 год й охолоджені адсорбенти засипали в колонку 1, приєднану до вакуум-насоса 8. Адсорбцію повітря із шару адсорбенту здійснювали для уникнення перебігу каталітичних процесів на поверхні дисперсних мінералів. Розчин сортівки з напірної ємності 7 через шліф-кран 4 надходив у колонку з адсорбентом 1 і накопичувався у мірній ємності для очищеного розчину 6.

Викладення основних результатів дослідження. В результаті проведених досліджень щодо кінетики зміни вмісту альдегідів у складі сортівок при її контакті з

різним вугіллям, палигорськітом і гідрослюдою та при контакті систем із повітрям (киснем) та в інертному середовищі (аргон) отримано результати, які представлені на рис. 2 (а, б).

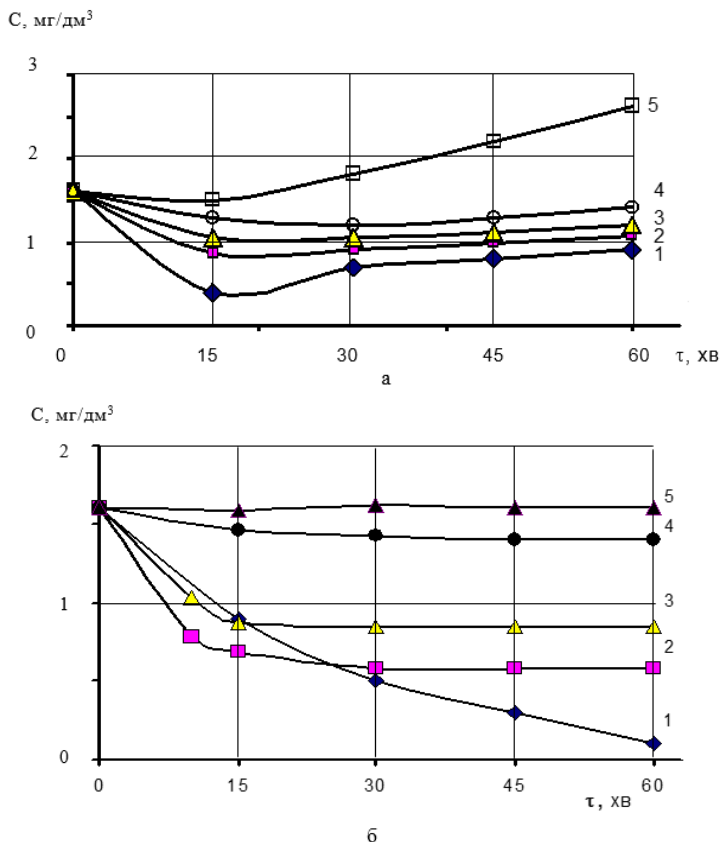


Рис. 2. Кінетика зміни вмісту альдегідів у сортивках при її очищенні різними адсорбентами: а — адсорбція альдегідів при контакті з повітрям; б — в атмосфері аргону; 1 — БАВ-А; 2 — палигорськіт; 3 — гідрослюда; 4 — КАВ-2; 5 — СКН

Порівняння кінетичних кривих для різних типів активного вугілля показує, що синтетичне азотовмісне активне вугілля (СКН), (крива 5) виявляє найбільшу активність в утворенні альдегідів.

З рис. 2 (а) видно, що за перші 15 хв БАВ-А (крива 1) ефективно адсорбує альдегіди із сортивки. Подальше збільшення часу взаємодії сортивки з вугіллям у присутності кисню показує зростання кількості альдегідів. Збільшення часу контакту сортивки з БАВ-А і КАВ-2 (крива 4) більше, ніж на 30 хв є недоцільним.

Аналізуючи криві 2 і 3, які відповідають адсорбційній спроможності палигорськіту і гідрослюди, видно, що перші 15 хв є найбільш ефективними для очищення сортивки, причому палигорськіт є більш ефективним сорбентом, ніж гідрослюда. Подальший контакт сорбентів і сортивки в присутності кисню сприяє перебігу каталітичних процесів і через 30 хв вміст альдегідів у початковій і очищеній сортивках стає майже однаковим.

На рис. 2 (б) наведені дані по кінетиці зміни вмісту альдегідів у сортівці при її контакті з БАВ-А, КАВ-2, СКН, палигорськітом, гідрослюдою, але при барботуванні через системи аргону, коли можливість взаємодії з окисником (киснем) зведена до мінімуму.

З цих даних випливає, що найбільшу сорбційну спроможність щодо альдегідів виявляє БАВ-А (крива 1). Так, протягом однієї години вміст альдегідів у сортівці зменшується приблизно на порядок.

За той же час зменшення вмісту альдегідів у сортівці при її контакті з іншими вуглецями відбувається в незначній мірі (КАВ-2) або залишається практично незмінним (СКН).

Це не означає, що на згаданих вище вуглецях сорбція альдегідів не відбувається. Ймовірно, на вугіллі з підвищеною каталітичною активністю (КАВ-2, СКН), навіть при дуже незначних кількостях кисню, превалюють окислювальні процеси (Левандовський, Шендрік, Куц, & Стукальська, 2021).

Адсорбційна спроможність палигорськіту і гідрослюди щодо очищення сортівки за відсутності кисню значно зростає. Так, вміст альдегідів за перші 15 хв у палигорськіту зменшується з 1,6 до 0,7 мг/дм³, гідрослюді — з 1,6 до 0,8 мг/дм³. Подальша тривалість процесу очищення за відсутності кисню не змінює вмісту альдегідів в очищеній сортівці.

Адсорбційна спроможність адсорбенту значною мірою залежить від поруватої структури і загального об'єму пор, які можна визначити за допомогою газового аналізатора. Такі дослідження були проведені, отримані результати представлені на рис. 3 (а, б).

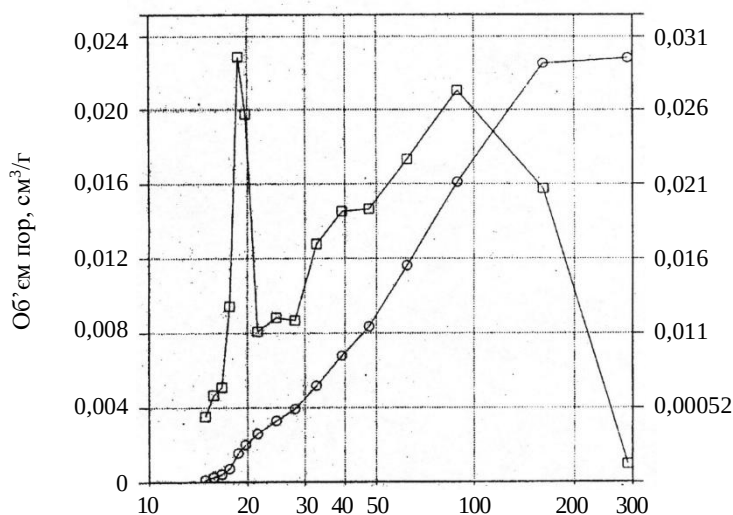


Рис. 3 (а). Гістограма розподілу пор палигорськіту: ○ — інтегральна крива розподілу об'єму пор; □ — диференційна крива розподілу пор за розмірами

Видно, що палигорськіт має пори, радіуси яких лежать в межах від 15 до 300 Å. Найбільша кількість мезопор (від 15 до 40 Å), мають місце пори, радіус яких лежить у межах 50—300 Å. На гістограмі (рис. 3 (а)) показано розподіл пор не тільки

за лінійними розмірами, а й по об'ємній поверхні: об'єм мікропор — $0,006 \text{ см}^3/\text{г}$, об'єм мезопор досягає $0,014 \text{ см}^3/\text{г}$, про що свідчить крива розподілу об'ємів пор (крива $\circ$). Отримані значення використані в розрахунках для визначення витрат палигорськіту на адсорбційне очищення сортівки від домішок.

Видно, що радіуси пор у палигорськіті знаходяться в межах від 15 до 300 Å з максимумами при 20 та ~ 90 Å. Отже, найбільша кількість пор зосереджена навколо цих розмірів. Вузьке розподілення пор навколо 20 Å пов'язане з існуванням мікропор, що утворюються в палигорськіті при зародженні структури алюмосилікатних шарів. Вони співрозмірні з товщиною окремого силікатного шару (~ 10 Å).

Широке розподілення мезопор, що концентруються навколо розмірів 90 Å, пов'язане з існуванням щілин між окремими накопиченнями алюмосилікатних шарів. Можна вважати, що це пори між окремими дисперсними частками палигорськіту.

Існування такого розподілу пор у мінералі зумовлює його адсорбційні властивості, особливо вибірковість адсорбції. В мікропорах ~ 20 Å будуть адсорбуватися співрозмірні органічні молекули. Тобто можна припустити, що цей мінерал буде вибірково адсорбувати вищі спирти та альдегіди і не адсорбувати молекул етилового спирту.

Як уже було відмічено, ефективним сорбентом для адсорбційного очищення сортівки, крім палигорськіту, є гідроліда. Дослідження її властивостей, механізму процесу адсорбції представляє теоретичний і практичний інтерес.

Здатність гідроліди адсорбувати різні домішки можна пояснити наявністю пор, радіуси яких лежать у межах 15—90 Å, що підтверджується рис. 3 (б), одержаним за допомогою газового аналізатора. На гістограмі показано, що гідроліда має найбільше пор радіусом 20 Å. Кількість мезопор радіусом від 22 до 40 Å та від 50 до 90 Å значно менша. З рис. 3 (б) можна бачити, що об'єм мезопор змінюється від $0,004$ до $0,016 \text{ см}^3/\text{г}$ (крива $\circ$).

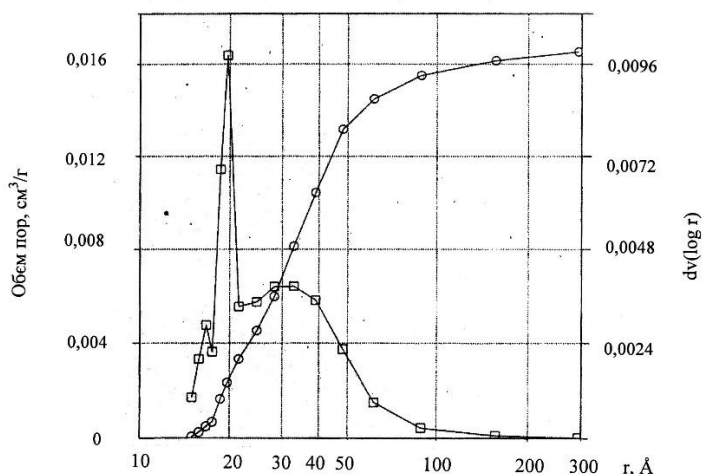


Рис. 3 (б). Гістограма розподілу пор гідроліди: $\circ$ — інтегральна крива розподілу об'єму пор; $\square$ — диференційна крива розподілу пор за розмірами

Маючи дані про розміри пор гідроліди, легко пояснити адсорбційну здатність цього мінералу щодо альдегідів, які адсорбуються із сортівки.

Враховуючи вище викладене, можна зробити висновок, що реалізація державної програми охорони навколишнього середовища, забезпечення екологічної безпеки і підвищення ефективності багатьох галузей народного господарства потребують насичення споживчого ринку необхідним асортиментом ефективних і дешевих адсорбентів, якими є палигорський, гідрослюда та інші природні дисперсні мінерали українських родовищ.

Висновки

1. При порівнянні адсорбційних властивостей палигорського і гідрослюда з активним вугіллем БАВ-А, КАВ-2, СКН з'ясувалося, що СКН непридатний для очищення сортівки.
2. Очищення сортівки від альдегідів в присутності кисню БАВ-А, КАВ-2, палигорським і гідрослюдою доцільно проводити протягом не більше 30 хвилин.
3. При барботуванні через системи аргону, коли можливість взаємодії з окисником (киснем) зведена до мінімуму, найбільшу адсорбційну спроможність щодо альдегідів виявляє БАВ-А. Так, протягом однієї години БАВ-А зменшує вміст альдегідів у сортівці приблизно на порядок.
4. Адсорбція альдегідів із сортівки палигорським і гідрослюдою є вищою за адсорбцію активним вугіллем КАВ-2 і наближається до адсорбційних властивостей БАВ-А, що надає можливість для створення комбінованих сорбентів.
5. Палигорський є більш ефективним сорбентом, ніж гідрослюда при очищенні сортівки від альдегідів.
6. Отримані результати про розміри пор палигорського і гідрослюда дають змогу прогнозувати адсорбцію інших небажаних домішок із водно-спиртових розчинів.

Література

- Двірко, А., Бойко, П. (2024). Новітні технології у виробництві горілок. *S World Journal*, 1 (24—01), 11—17. Взято з: <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2024-24-00-006>.
- Ковальов, М. М., Гречко, Н. Я. (2000). Вплив технологічних обробок мінералами та фізико-хімічні властивості купажів і шампанського. *Харчова промисловість*, 45, 83—86.
- Левандовський, Л., Шендрік, Т., Куц, А., Стукальська, Н. (2021). Особливості застосування активного вугілля у лікєро-горілчаному виробництві. *Наукові праці НУХТ*, 27(1), 188—198. Взято з: <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2021-27-1-20>.
- Лукіяник, О. П., Купчик, М. П., Манк, В. В., Рева, Л. П., Сімахіна, Г. О., Марцін, І. І. (2001). Використання природних сорбентів для декальцинації очищеного соку. *Цукор України*, 1—2, 28—30.
- Мельник, Л. Н., Манк, В. В., Третинник, В. Ю. (2004). Экологические аспекты использования природных адсорбентов в спиртовой промышленности. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*, 5, 64—67.
- Подгорський, В., Гавриленко, М., Ковальов, М., Сумневич, В., Домарецький, В., Гречко, Н. (2000). Оптимізація процесу культивування дріжджів за наявності дисперсних мінералів. *Харчова і переробна промисловість*, 1, 29—30.
- Стеценко Н., Мірошніков О., Манк В., Подобій О. (2008). Перспективи використання природних адсорбентів України в технологіях харчових продуктів. *Věda a technologie: krok do budoucnosti — 2008: IV mezinárodní vědecko — praktická konference: materiálně. Praha: Publishing House «Education and Science» s.r.o. 2008*, 87—89. Взято з: <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/86b57479-2beb-45d1-aa55-12ea6d6fea52/content>.

Шиян, П., Сосницький, В., Шевченко, О., Кириленко, Р. (2022). *Алкогольні напої — досвід поколінь (технологія, обладнання, рецептури)*: монографія. Київ: Інтерсервіс. Взято з: <https://dspace.nuft.edu.ua/items/5e3bd150-7e86-4d5b-8dc7-74deee5e4b9d>.

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

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

Balcerek, M., Pielech-Przybylska, K., Patelski, P., Dziekońska-Kubczak, U., & Jusel, T. (2017). Treatment with activated carbon and other adsorbents as an effective method for the removal of volatile compounds in agricultural distillates. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 34(5), 714—727. Взято з: <https://doi.org/10.1080/19440049.2017.1284347>.

Balcerek, M., Pielech-Przybylska, K., Strąg, E., Patelski, P., Dziekońska-Kubczak, U. (2016). Comparison of fermentation results and quality of the agricultural distillates obtained by application of commercial amylolytic preparations and cereal malts. *Eur Food Res Technol*, 242:321—335. Взято з: <https://doi.org/10.1007/s00217-015-2542-7>.

Kuzmin, O., Tamarkina, J., Shendrik, T., Zubkova, V., Koval, O., Roman T. (2017). Production of active coal from pyrolyzed wood wastes by alkaline activation of KOH. *Ukrainian Food Journal*, 6(3), 443—458. Взято з: <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2017-6-3-5>.

Mank, V. V., Melnyk, L. M. (2004). Using palygorskite for purifying the aqueous-alkoholic solutions. *XVII Conference on Clay Mineralogy and Petrology*, 13—17.09.04, Prague.

Marynchenko, L., Marynchenko, V., & Hyvel, M. (2017). Research of mineral adsorbents application for water-alcohol solutions purification in technology of alcoholic beverages. *EUREKA: Physics and Engineering*, 4, 3—10. Взято з: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2017.00397>.

Marynchenko, L., Marynchenko, V., & Hyvel, M. (2017). Exploring the possibility of purification of water-alcohol solutions of different concentrations containing aldehydes and esters by mineral adsorbents. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(11)(88), 10—15. Взято з: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108750>.

Oliinyk, S., Tarasiuk, L., Samchenko, I., Kutz, A., Dulka, O. (2021). Purification of water-alcohol mixtures by means of modified natural materials. *Food science and technology*, 15(1), 63—72. Взято з: <https://doi.org/10.15673/fst.v15i1.1973>.

Rios-Hernández, P., Gómez Navarro, C., Warren-Vega, W., González Gutiérrez, L., Zárate-Guzmán, A., and Romero-Cano, L. (2022). Comprehension of the adsorption mechanism in the selective color removal of Extra-aged Tequila to produce Cristalino Tequila using tailored carbon materials. *Food Chemistry Advances*, 2, 100174. Взято з: <https://doi.org/10.1016/j.focha.2022.100174>.

Shendrik, T., Levandovskyi, L., Kuts, A., Prybylskyi, V., Grabovska, O. (2019). Main directions of application of active carbons in alcoholic beverage production. *Ukrainian Journal of Food Science*, 7(1), 100—113. Взято з: <https://doi.org/10.24263/2310-1008-2019-7-1-12>.

Thakur, A., Kumar, A., and Zhang, R. (2023). *Activated Carbon Progress and Applications*, ed. C. Verma and M. A. Quraishi, The Royal Society of Chemistry, ch. 8, 152—178.

Wu Ziyang, Lv Silei, Xiao Peng, Cheng Huan, Li Hehe, Jihong Wu, Jinyuan Sun, Ye Xingqian, Wei Dong, Sun Baoguo. (2024). Preparation, Characterization, and Adsorption Capacity of Pyrophosphoric Acid Modified Activated Carbon from Baijiu Spent Grains for Risk Factor Mitigation. *Food Chemistry Advances*, 5, 100753. Взято з: <https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100753>.

Wu Ziyang, Lv Silei, Xiao Peng, Salentijn Gert, Cheng Huan, Li Hehe, Sun Jinyuan, Ye Xingqian, Sun Baoguo. (2024). Comprehensive analysis of risk factors (methanol, acetaldehyde and higher alcohols) in alcoholic beverages and their reduction strategies: GC-MS analysis and modified activated carbon adsorption and characterization. *Food Chemistry*, 460, 140461. Взято з: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140461>.

ДО ВІДОМА АВТОРІВ

Шановні колеги!

Редакційна колегія журналу «Наукові праці Національного університету харчових технологій» запрошує вас до публікації наукових праць (<http://sw.nuft.edu.ua>).

До друку приймаються рукописи, які раніше не були опубліковані в друкованих та електронних виданнях. Автор, який подає матеріали до друку, зберігає за собою всі авторські права та надає відповідному виданню право першої публікації, дозволяючи розповсюджувати матеріал із зазначенням авторства й джерела первинної публікації, а також погоджується на розміщення її електронної версії на сайті Національної бібліотеки ім. В. І. Вернадського та у відкритому доступі в електронній мережі університету. Автор надає право редакційній колегії на рецензування та відхилення поданих для опублікування матеріалів. В одному номері може бути видана лише одна стаття автора (як власна, так і в співавторстві).

На електронну адресу журналу (prnuht@ukr.net) необхідно надіслати такі документи:

- файл статті;
- рецензію доктора наук певної галузі (за тематичною спрямованістю статті). Якщо один із авторів статті є доктором наук, то рецензія не обов'язкова;
- заяву з підписами автора(-ів) про те, що надіслана стаття раніше не друкувалася і не подана до будь-яких інших видань.

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

Статті подаються у вигляді вичитаних роздруківок на папері формату A4 (поля з усіх сторін по 2 см, Time New Roman, кегль 14, інтервал 1,5) та електронної версії (редактор Microsoft Word). У тексті статті не повинно бути порожніх рядків. Між словами допускається лише один пробіл. Усі сторінки тексту мають бути пронумеровані.

Обсяг дослідницької статті має бути не менше 10 сторінок (без урахування анотацій та списку використаних джерел). У дослідницькій статті має бути проаналізовано не менше 15 джерел. Обсяг оглядової статті має бути не менше 25 сторінок (без урахування анотацій та списку використаних джерел). В оглядовій статті повинно бути проаналізовано не менше 40 джерел.

ПОСЛІДОВНІСТЬ СТРУКТУРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СТАТТІ

1. Індекс УДК.
2. Назва статті (англійською та українською мовами).
3. Ініціали та прізвища авторів англійською та українською мовами.
4. Анотація англійською та українською мовами (не менше 1800 символів з пробілами). Анотація має бути максимально інформативною, це окремий текстовий документ, у якому лаконічно викладені результати дослідження. У тексті анотації не варто використовувати загальні фрази, вказувати несуттєві деталі й загальновідомі положення. Також слід уникати прямих повторів будь-яких фрагментів статті.

5. Ключові слова (5—6 слів/ключових словосполучень англійською та українською мовами).
6. Структура текстової частини:
 - постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з важливими практичними завданнями;
 - аналіз останніх досліджень і публікацій, на які спирається автор;
 - формулювання мети статті;
 - викладення основних результатів дослідження;
 - висновки і перспективи подальших наукових досліджень.
7. Після тексту статті в алфавітному порядку наводиться список літературних джерел.

Бібліографічні описи оформляються згідно з міжнародним стилем APA. Бібліографічний опис подається мовою видання. Не допускається посилання на неопубліковані матеріали. У переліку джерел мають переважати посилання на наукові праці останніх років. Наприкінці кожної публікації наводиться ідентифікатор DOI у форматі <https://doi.org/.....>, якщо він є, або посилання на публікацію. Також слід обмежити посилання на власні публікації, оскільки це знижує наукову цінність статті та індекс цитування автора. Не можна посилатись на національні стандарти, технічні умови, підручники, конспекти лекцій, лабораторні практикуми та іншу ненаукову літературу. Посилання на патенти слід робити в тексті статті, вказавши лише номер та назву патенту.

У статті мають бути проаналізовані напрацювання вчених з усього світу. На основі аналізу сучасних статей з англомовних журналів має бути доведена актуальність теми у світі, визначені питання, які потребують вирішення, сформульована мета дослідження.

9. Таблиці (у Word або Excel) можна подавати як у тексті, так і в окремих файлах (на окремих сторінках). Кожна таблиця повинна мати тематичний заголовок, набраний напівжирним шрифтом, і порядковий номер (без знака №), якщо таблиць кілька. Слово

«Таблиця» і номер друкуються курсивом, заголовок — напівжирним шрифтом. Таблиці повинні мати книжковий формат і вільно вміщатися у висоту і ширину журнальної сторінки.

10. Ілюстрації (креслення, рисунки, схеми, діаграми) мають бути розміщені в тексті. **Обов'язковою вимогою** є надсилання оригінальних файлів рисунків, створених у програмах-редакторах Corel Draw X6, Origin. Всі елементи рисунка (типи, товщина і колір ліній, шрифт текстів тощо) мають вільно редагуватися у наявному програмному забезпеченні. Рисунки в растрових форматах (bmp, gif, jpeg, tif) або у форматі pdf не приймаються до розгляду, оскільки не можуть вільно редагуватися. **Вимоги до оформлення рисунків:** вісь координат — 0,2 мм, без сітки, сам рисунок (наприклад, крива) — 0,35 мм, текст в рисунку — Times New Roman 9,5, ширина рисунка — до 13 см. Всі рисунки мають бути чорно-білими. Підписи до рисунків набираються безпосередньо під рисунками прямим напівжирним шрифтом.

Фотографії мають бути чіткими та контрастними (формати TIF, JPG з роздільною здатністю 300 dpi), розмірами 6×9. Фотографії друкуються в разі крайньої потреби, якщо наведена на них інформація має значну наукову цінність. Авторам краще завантажити фотографії у хмарний сервіс і в списку літератури дати на них посилання.

11. Математичні формули повинні бути роздруковані з правильним виділенням верхніх і нижніх індексів. Нумерація формул здійснюється арабськими цифрами у круглих дужках біля правого поля сторінки. Індеси від скорочених українських слів друкуються прямим шрифтом малими літерами. В індексах, що складаються з двох скорочених слів, після першого скороченого слова ставиться крапка, після другого — крапка не ставиться. Цифри в індексах також друкуються прямим шрифтом. Індеси, позначені латинськими літерами, друкуються курсивом. У формулах літери латинського алфавіту набираються курсивом, грецького й українського — прямим шрифтом.

Хімічні формули набираються прямим шрифтом. Математичні символи, що входять до складу хімічних формул, — курсивом.

Формули вставляються безпосередньо в текст. Прості формули набираються з клавіатури, а складні — за допомогою редактора формул Microsoft Equation 3.0 object або Math Type 5.6. Інші версії редакторів формул є неприйнятними. Символи вставляються тільки через таблицю символів. Скорочення позначень одиниць фізичних величин мають відповідати Міжнародній системі одиниць (SI).

12. Відомості про авторів статті повинні бути наведені за єдиним зразком у вказаному порядку: прізвище (прописними літерами), ім'я та ім'я по батькові (повністю); наукове звання; посада чи професія, місце роботи; телефон, E-mail.

13. Дата надходження статті до редакції (після тексту надрукованого матеріалу).

Використання автоматичного перекладу наукового тексту (статті, анотації, ключових слів) **не допускається**. Переклад має бути належної якості.

Відсутність будь-якого з пунктів переліку, зазначеного вище, рецензії, невідповідність вимогам до оформлення, наявність орфографічних, граматичних, стилістичних помилок, автоматичний переклад елементів матеріалу є підставою для **відмови** в прийнятті статті до друку.

Автор несе відповідальність за додержання вимог чинного законодавства при підготовці матеріалів, у тому числі норм авторського права і достовірність наведених фактичних даних (цитат, посилань, імен, назв тощо).

Адреса редакції:

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

Контактні телефони: міський — (044) 287-92-95, внутрішній — 92-95.

E-mail: npnuht@ukr.net

SUBMISSION GUIDELINES

Dear colleagues,

The editorial board of the Journal "Scientific works of the National University of Food Technologies" invites you to the publication of your manuscripts (<http://sw.nuft.edu.ua>).

Only the manuscripts that have not previously been published in print and electronic media are accepted. The author who submits materials for publication reserves the copyright and provides the right of first publication to the Journal, allows to distribute the manuscript indicating the authorship and the primary source of publication and agrees to placing the electronic version of the manuscript on the website of the V. I. Vernadsky National Library of Ukraine, publicly available electronic network of the University. The author gives the right to the editorial board to review and reject the material submitted for publication. The author can publish one manuscript (of his/her single authorship or co-authored) per every issue of the Journal.

The following documents are necessary to be sent to the e-mail address of the journal (npuht@ukr.net):

- Electronic version of the manuscript;
- A review of the manuscript by a doctorate of the corresponding branch of science. If one of the authors is a doctorate him/herself, then a review is not necessary;
- A statement signed by the author(s) that the manuscript has not been published and is not submitted for publication.

REQUIREMENTS FOR MANUSCRIPTS

The electronic version should be submitted in a Microsoft Word document (margins of 2 cm, Time New Roman, type size 14, spacing 1.5). There should be no blank lines in the manuscript. No extra spaces are allowed between the words. All pages of the manuscript should be numbered.

The number of pages of the research article should be at least 10 (excluding abstracts and references). At least 15 references should be analyzed in the research paper. The length of the review article should be at least 25 pages (excluding abstracts and references). At least 40 references should be analyzed in the review article.

The use of automatic translation for any part of your text (manuscript, abstract, keywords) is not allowed. Translation must be of good quality.

The editors reserve the right to edit the manuscript scientifically and literary.

SEQUENCE OF STRUCTURAL ELEMENTS OF THE MANUSCRIPT

1. UDC index.
2. The title of the manuscript (in English, Ukrainian).
3. Full names of the authors in English, Ukrainian (not more than four authors).
4. An abstract in English, Ukrainian (not less than 1800 characters with spaces). The abstract should be highly informative, it is a separate text document in which the results of the research must be summarized. General phrases, insignificant details and well-known provisions shouldn't be written in the abstract. Direct repetitions of any parts of the article should be also avoided.
5. A list of keywords (5—6 words or key phrases in English, Ukrainian).
6. The structure of the text:
 - Problem definition and its relationship with important practical tasks;
 - Analysis of recent studies and publications related to subject matter of the manuscript;
 - Problem statement (statement of purpose of the manuscript);
 - Presentation of the main material;
 - Conclusions and recommendations for further research.
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 B, room 412, 01601 Kyiv, Ukraine
E-mail: npnuht@ukr.net