

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО



DMYTRO MOTORNYI TAVRIA STATE
AGROTECHNOLOGICAL UNIVERSITY



НАУКОВИЙ ВІСНИК Таврійського державного агротехнологічного університету *Технічні науки*

SCIENTIFIC BULLETIN OF TAVRIA STATE AGROTECHNOLOGICAL UNIVERSITY *Technical sciences*

*Виходить 2 рази на рік
Видається з 2011 р.*

**Випуск 16, том 1
Issue 16, volume 1**

WEB: <https://oj.tsatu.edu.ua>

DOI: 10.32782/2220-8674-2026-16-1



Видавничий дім
«Гельветика»
2026



УДК [631.3+621.3+004+663/664]

Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання. / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. – Запоріжжя: ТДАТУ, 2026. Вип. 16, т. 1. 368 с.

ISSN 2220-8674

Представлені результати наукових досліджень вчених у галузях галузевого машинобудування, енергетики, електротехніки, електромеханіки, харчових технологій, комп'ютерних наук та інформаційних технологій.

Видання призначене для наукових працівників, викладачів, інженерно-технічного персоналу і здобувачів вищої освіти, які спеціалізуються у відповідних або суміжних галузях науки та напрямках виробництва.

Реферативні бази: Crossref, Google Scholar, «Україна наукова», НБУ ім. В. І. Вернадського

Головний редактор

Надикто Володимир Трохимович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри експлуатації та технічного сервісу машин, Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, Україна

Editor in chief

Nadykto Volodymyr, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Operation and Technical Service of Machines, Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University, Ukraine

Заступники головного редактора

Кувачов Володимир Петрович, доктор технічних наук, професор, декан механіко-технологічного факультету, Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, Україна

Deputy editors in chief

Kuvachov Volodymyr, Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of the Faculty of Mechanics and Technology, Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University, Ukraine

Редакційна колегія

Артюмов Микола Прокопович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри агроінженерії, Державний біотехнологічний університет, Україна

Братішко Вячеслав Вячеславович, доктор технічних наук, професор, декан механіко-технологічного факультету, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна

Данченко Олена Олександрівна, доктор сільськогосподарських наук, професор, професор кафедри харчових технологій та готельно-ресторанної справи, Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, Україна

Дідора Віктор Григорович, доктор сільськогосподарських наук, професор, професор кафедри технологій рослинництва, Поліський національний університет, Україна

Дробітько Антоніна Вікторівна, доктор сільськогосподарських наук, професор, проректор з наукової роботи, Миколаївський національний аграрний університет, Україна

Іванова Ірина Євгенівна, кандидат сільськогосподарських наук, доцент, декан факультету агротехнологій та екології, Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, Україна

Кучменко Олена Борисівна, доктор біологічних наук, професор, завідувач кафедри біології, професор, Ніжинський державний університет імені Миколи Гоголя, Україна

Кюрчев Володимир Миколайович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри експлуатації та технічного сервісу машин, Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, Україна

Мойсієнко Віра Василівна, доктор сільськогосподарських наук, професор, професор кафедри технологій у рослинництві, Поліський національний університет, Україна

Прісс Олеся Петрівна, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри харчових технологій та готельно-ресторанної справи, Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, Україна

Сердюк Марина Єгорівна, доктор технічних наук, професор, професор кафедри стандартизації та сертифікації сільськогосподарської продукції, Національний університет біоресурсів та природокористування України, Україна

Скляр Олександр Григорович, кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедрою «Експлуатація та технічний сервіс машин», Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, Україна

Editorial Board

Artyomov Mykola, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Agro-Engineering, State Biotechnological University, Ukraine

Bratishko Vyacheslav, Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of the Faculty of Mechanics and Technology, National University of Life Resources and Environmental Management of Ukraine, Ukraine

Danchenko Olena Olexandrivna, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Professor of Food Technology and Hotel and Restaurant Business Department, Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University, Ukraine

Didora Viktor Grygorovych, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Professor of the Department of Plant Production Technologies, Polissia National University, Ukraine

Drobitko Antonina, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Vice-Rector for Research, Mykolaiv National Agrarian University, Ukraine

Ivanova Iryna, Candidate of Agricultural Sciences, Associate professor, Dean of the Faculty of Agricultural Technologies and Ecology, Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University, Ukraine

Kuchmenko Olena Borysivna, Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of the Department of Biology, Nizhyn Mykola Gogol State University, Ukraine

Kyurchev Volodymyr Mykolayovych, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor in the Department of Machine Operation and Technical Service, Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University, Ukraine

Moisiienko Vira Vasylivna, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Professor of the Department of Plant Production Technologies, Polissia National University, Ukraine

Priss Olesia, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Food Technology and Hotel and Restaurant Business Department, Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University, Ukraine

Serdyuk Marina, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of the Department of Standardization and Certification of Agricultural Products, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Ukraine

Skliar Oleksandr, Candidate of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Machine Operation and Technical Service, Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University, Ukraine



Бастаубаєва Шолпан (Bastaubaeva Sholpan Orazovna), кандидат сільськогосподарських наук, академік Національної академії аграрних наук Республіки Казахстан, професор, голова правління, Казахський науково-дослідний інститут сільського господарства та рослинництва, Казахстан
Белоєв Христо Іванов (Beloev Hristo Ivanov), доктор технічних наук, професор, професор кафедри сільськогосподарських машин, Русенський Університет «Ангел Канчев», Болгарія
Чил Абдулла (Abdullah Çil), доктор філософії, дослідник, Науково-дослідний інститут біологічного контролю, Туреччина
Фіндура Павол, доктор філософії, професор, професор кафедри механізації сільськогосподарського та лісгосподарського виробництва, проректор з комунікацій та практики, Словацький університет сільського господарства в Нітрі, Словачія
Ольт Юрі, доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерії біосистем, Естонський університет природничих наук, Естонія
Озкан Хакан (Hakan Özkan), доктор філософії, професор, професор кафедри польових культур, Університет Чукурови, Туреччина
Паскуцці Сімонє (Pascuzzi Simone), доктор філософії, професор, доцент кафедри агроекологічних та територіальних наук, Університет Bari Aldo Moro, Італія

Bastaubaeva Sholpan Orazovna, Candidate of Agricultural Sciences, Academician of the National Academy of Agrarian Sciences of the Republic of Kazakhstan, Professor, Chairman of the Board, Kazakh Scientific Research Institute of Agriculture and Crop Production, Kazakhstan
Beloev Hristo Ivanov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Agricultural Machinery, "Angel Kanchev" University of Ruse, Bulgaria
Abdullah Çil, Doctor of Philosophy (PhD), Researcher, Biological Control Research Institute, Turkey
Findura Pavol, Doctor of Philosophy (PhD), Professor, Professor of the Department of Mechanization of Agricultural and Forestry Production, Vice-Rector for Communication and Practice, Slovak University of Agriculture in Nitra, Slovakia
Olt Jüri, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Biosystems Engineering, Estonian University of Life Sciences, Estonia
Hakan Özkan, Doctor of Philosophy (PhD), Professor, Professor of Field Crops Department, University of Çukurova, Turkey
Pascuzzi Simone, Doctor of Philosophy (PhD), Professor, Associate Professor of the Department of Agroecological and Territorial Sciences, University of Bari Aldo Moro, Italy

**НАУКОВИЙ ВІСНИК
Таврійського державного
агротехнологічного університету**

Випуск 16, том 1

Засновник

Таврійський державний агротехнологічний
університет імені Дмитра Моторного

Заснований у 2011 році

Рішення Національної ради України з питань
телебачення і радіомовлення № 2623 від 04.12.2025 року.

Ідентифікатор медіа: R 40-06698

Суб'єкт у сфері онлайн-медіа – Таврійський державний
агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного
(просп. Богдана Хмельницького, буд. 18, м. Мелітополь,

Запорізька обл., 72312, office@tsatu.edu.ua,
тел. (099) 614-83-02)

Виходить 2 рази на рік

Рекомендовано до публікації вченою радою
Таврійського державного агротехнологічного
університету імені Дмитра Моторного

Протокол № 9 від 28.04.2026 р.

«Науковий вісник ТДАТУ» включено до **Категорії Б**
Переліку наукових фахових видань України (технічні науки)
на підставі Наказів МОН України від 17 березня 2020 року
№ 409 (Додаток № 1); від 2 липня 2020 року № 886 (Додаток
№ 4); від 24 вересня 2020 року № 1188 (Додаток № 5).

Адреса редакції

Юридична: 72312, Запорізька обл.

м. Мелітополь, пр. Б. Хмельницького, 18

Фактична: 69600, Запорізька обл. м. Запоріжжя,
вул. Жуковського, 66

<https://oj.tsatu.edu.ua>,

DOI: 10.32782/2220-8674-202026-16-1

**SCIENTIFIC BULLETIN OF TAVRIA STATE
AGROTECHNOLOGICAL UNIVERSITY**

Issue 16, volume 1

Founder

Dmytro Motornyi Tavria State
Agrotechnological University

Founded in 2011

Decision of the National Council of Ukraine
on Television and Radio Broadcasting No. 2623 of 04.12.2025.

Media ID: R 40-06698

Media entity: Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological
University (ave. B. Khmelnytskyi, 18, Melitopol,
Zaporizhzhia region, 72312, office@tsatu.edu.ua,
tel. (099) 614-83-02)

Published 2 times a year

Recommended for publication by the Academic
Board of Dmytro Motornyi Tavria State
Agrotechnological University
Record No. 9 dated April 28, 2026

Scientific bulletin of TSATU is included in the List of scientific
professional editions of Ukraine (technical sciences), **category
B** (on the basis of the Orders of the MES of Ukraine dated
March 17, 2020 No. 409 (Appendix No. 1); dated July 2, 2020
No. 886 (Appendix No. 4); dated September 24, 2020 No. 1188
(Appendix No. 5).

Address of the Editorial office

Legal adress: 72312, Zaporizhzhia region

Melitopol, 18, B. Khmelnytskyi Ave.

Actual address: 69600, Zaporizhzhia region Zaporizhzhia, 66,
Zhukovskiy Str.

<https://oj.tsatu.edu.ua>,

DOI: 10.32782/2220-8674-202026-16-1



ЗМІСТ

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

І. М. Білоус. Визначення фізико-механічних параметрів зерна пшениці для чисельного моделювання процесу його руйнування.....	10
Р. С. Бровко, А. М. Пугач. Оптимізація конструкції шнекового пресу шляхом чергування зон стиску і перемішування маси в шнековому тракті.....	17
Г. В. Дейниченко, Д. В. Дмитревський, Д. О. Гончар, В. В. Лавренюк. Аналіз закономірностей ультрафільтрації при освітленні соків та визначення напрямів експериментальних досліджень.....	24
Д. П. Журавель, В. В. Дідур, Я. В. Білоконь. Математичне моделювання процесу механічного вилучення олії з насіння ріпичи.....	32
М. Л. Заєць, П. К. Погребніченко. Розробка та експериментальна оцінка ефективності застосування контролера диференційованого внесення добрив в системі точного землеробства.....	48
М. Б. Клендій, А. П. Драган. Оптимізація конструктивних та технологічних параметрів борони з гвинтовими робочими органами.....	62
О. С. Ковязін, А. І. Панченко, І. О. Чижиков, О. О. Дереза, С. В. Дереза. Порівняльна оцінка геотермальної вентиляції та теплового насоса ґрунт-вода для енергозабезпечення тваринницьких приміщень.....	70
Т. О. Кутковецька. Обґрунтування параметрів роботи вібраційного ґрунтообробного знаряддя для обробітку ґрунту.....	79
О. Є. Мацулевич, Ю. В. Лазарчук-Воробйова. Математична модель неперервної інтерполяції спіралеподібної ДПК за допомогою спеціальної функції.....	85
Р. В. Миронов, Л. Л. Веспер. Маркетингове обґрунтування інтегрованого методу термо-аеродинамічної рециркуляції для вискоєфективних печей з виробництва піци.....	93
В. Т. Надикто, І. О. Жокін. Дослідження поворотності трактора у складі тримашинного посівного агрегату.....	99
О. А. Новохат, Ю. А. Злоба. Ультразвукова інтенсифікація процесу сушіння каротиновмісної сировини: аналітичний огляд.....	106
І. Ю. Повар, Б. В. Болтянський. Аналіз процесу центрифугування річинової олії в конічній центрифугі.....	115
С. В. Сиротюк, О. Г. Скляр, В. В. Пташник, В. В. Климчук, Г. Валовські. Чотирирівнева архітектура інтернету речей для вітроенергетичних систем: моніторинг, оптимізація та інтеграція з мережею.....	123
О. V. Fomin, O. V. Burlutskyi, V. M. Prokhorov, I. M. Hannoshyna, S. M. Shelest. Mathematical model for a comprehensive assessment of the economic impact of operating innovative vehicles across their life cycle.....	138



- С. О. Шарапов, А. Р. Вербицький, С. О. Євтушенко, С. О. Хованський, О. С. Ковязін.** Експериментальний стенд для дослідження теплоелектрогенеруючих агрегатів на базі рідинно-парових струминних апаратів.....149
- О. О. Шокарев, І. В. Колокольчикова, М. М. Данченко, О. М. Шокарев.** Критерій ефективності обчисувально-різального модуля зернозбирального комбайну.....161
- В. N. Younis.** Comparative analysis of failure criteria for anisotropic layered composites: from brittle onset to progressive damage in aerospace structural elements.....168

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

- О. В. Бойко, А. С. Комін.** Оцінка і вибір моделі-чемпіона у задачах адаптації моделей прогнозування рівня споживання електроенергії у Smart Grid.....176
- С. В. Гайдукевич, Н. П. Семенова.** Підвищення ефективності та надійності електродвигуна на основі інтелектуальної системи діагностики та адаптивного керування.....184
- В. В. Гузенко, С. В. Галько, С. В. Чаусов, М. С. Сорокін, Ю. М. Хандола.** Реалізація системи контролю температури двигуна в електроприводі змінного струму.....195
- S. A. Kazbekova.** Theoretical issues and design of laser systems (LS).....201
- С. В. Кравцов, Р. В. Жесан, О. П. Голик, В. О. Зубенко.** Застосування енергоефективних будівель із системами керування у розподіленій електрогенерації майбутнього.....211
- О. О. Мірошник, В. Г. Пазій, О. А. Савченко, Д. Г. Миргород, Т. І. Галько.** Дослідження ефективності застосування мікропроцесорного пристрою РС83-В1 компанії «РЗА СИСТЕМЗ» для моніторингу аварійних режимів мереж 6–10 кВ.....218
- Н. О. Перетяка.** Сучасні підходи до активізації навчальної діяльності студентів технічних навчальних закладів.....228
- М. Ю. Савченко, О. В. Радчук, С. С. Шевченко.** Енергоефективна автоматизація харчових цехів: розрахунок потужності безперебійного живлення на основі відновлювальних джерел енергії.....235
- О. М. Сайко.** Підвищення стійкості енергосистеми за рахунок децентралізації.....243

КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ

- А. І. Безверхий, І. А. Скрипник, О. О. Жуков.** Інтеграція квантових обчислень в експертні системи з нечіткою логікою.....250
- А. С. Янко, М. С. Мизюра.** Модель персоналізації навчального процесу через інтеграцію LLM у вебзастосунок із динамічною генерацією пояснень.....255

ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

- І. М. Белова, Л. М. Кюрчева, В. М. Гіджеліцький, М. В. Кирилів.** Удосконалення технології пшеничного хліба шляхом використання фітозбагачувачів у вигляді овочевих мас.....264



О. В. Василюшина, І. Г. Власенко. Методи контролю безпечності м'яса та способи його збереження.....	271
Iu. Goriainova, O. Simakova, O. Bodnaruk, V. Volkova, K. Pohoriletskyi. Qualimetric assessment of the quality of short dough cookies with the addition of chokeberry and reduced fat content.....	277
С. Л. Колесніченко. Прикладне програмне забезпечення для підприємств ресторанного господарства.....	284
К. В. Костецька, С. М. Ковтун-Водяницька, О. В. Коломісць. Технологічні параметри хліба пшеничного за використання продуктів перероблення гірчиці.....	290
О. І. Мамай, В. А. Луцькова, Т. О. Яковенко, К. В. Зубкова, О. В. Стоянова. Удосконалення технології коньячних виноматеріалів.....	297
К. С. Рубан, Н. А. Сова, І. П. Холобцева, А. В. Токар. Розроблення та оцінка якості концентрату супу-пюре швидкого приготування.....	305
Т. П. Синенко, О. Ю. Кошель, А. В. Супрун, К. В. Омельчук, Д. М. Завгородній. Розробка та комплексна оцінка якості пудингу на основі молочної сироватки з додаванням рослинної сировини.....	312
С. В. Смірнов, О. П. Прісс. Мікробіологічна стабільність пряникових виробів з начинкою під час зберігання.....	321
В. О. Сукманов, А. А. Поліщук, М. О. Ільченко, Б. С. Шаферівський, О. Г. Фесенко. Пролонгація термінів зберігання рибних продуктів та фаршу скумбрії (<i>Scomber scombrus</i>) додаванням екстракту картопляної шкірки.....	327
В. О. Троєкурова, В. С. Калина, М. В. Денисенко. Дослідження режимів і параметрів систем для зберігання зерна ячменю в охолодженому стані: вплив на органолептичні та фізичні показники якості.....	343
В. А. Черняков, О. Ю. Мельник. Оцінка снекової продукції з використанням борошна червоної сочевиці.....	351
С. Л. Юрченко, М. Б. Колеснікова, Т. В. Черемська. Розроблення технології безглютенових млинчиків та впровадження ризик-орієнтованого підходу до забезпечення їх безпечності.....	359



CONTENTS

SECTORAL MACHINE BUILDING

I. Bilous. Determination of physical and mechanical parameters of wheat grain for numerical simulation of its destruction process.....	10
R. Brovko, A. Puhach. Optimization of the screw press design by alternating compression and mixing zones in the screw channel.....	17
G. Deynichenko, D. Dmytrevskiy, D. Honchar, V. Lavreniuk. Analysis of ultrafiltration patterns during juice illumination and determination of directions for experimental research.....	24
D. Zhuravel, V. Didur, Ya. Bilokin. Mathematical modeling of the process of mechanical extraction of oil from castor seeds.....	32
M. Zayets, P. Pohrebnychenko. Evaluation of the effectiveness of a sprayer with a dosage rate controller at variable operating speed.....	48
M. Klendiy, A. Drahan. Optimization of structural and technological parameters of a harrow with screw working bodies.....	62
O. Koviazin, A. Panchenko, I. Chyzhykov, O. Dereza, S. Dereza. Comparative evaluation of geothermal ventilation and a ground-to-water heat pump for energy supply in livestock buildings.....	70
T. Kutkovetska. Justification of the working parameters of a vibratory land cultivation tool for soil cultivation.....	79
O. Matsulevych, Yu. Lazarchuk-Vorobiova. A mathematical model of continuous interpolation of a spiral-shaped DPC using a special function.....	85
R. Myronov, L. Vesper. Market-based justification of an integrated thermo-aerodynamic recirculation method for high-efficiency pizza ovens.....	93
V. Nadykto, I. Zhokin. Study of tractor turnability in a three-machine seeding unit.....	99
O. Novokhat, Yu. Zloba. Ultrasound-assisted intensification of drying of carotene-containing raw materials: an analytical review.....	106
I. Povar, B. Boltianskyi. Analysis of the centrifugation process of retino oil in a conical centrifuge.....	115
S. Syrotyuk, O. Skliar, V. Ptashnyk, V. Klymchuk, G. Walowski. Four-level internet of things architecture for wind energy systems: monitoring, optimization, and grid integration.....	123
O. Fomin, O. Burlutskyi, V. Prokhorov, I. Hannoshyna, S. Shelest. Mathematical model for a comprehensive assessment of the economic impact of operating innovative vehicles across their life cycle.....	138
S. Sharapov, A. Verbytskyi, S. Yevtushenko, S. Khovanskyy, O. Koviazin. Experimental stand for researching heat-&-electricity generating aggregates based on liquid-vapor jet devices.....	149
O. Shokarev, I. Kolokolchikova, M. Danchenko, O. Shokarev. Efficiency criterion of the stripper-cutting module of a grain combine harvester.....	161



B. Younis. Comparative analysis of failure criteria for anisotropic layered composites: from brittle onset to progressive damage in aerospace structural elements.....	168

POWER ENGINEERING (BY SPECIALIZATION)

O. Boiko, A. Komin. Evaluation and champion model selection in the adaptation of electricity consumption forecasting models for Smart Grid.....	176
S. Haidukevych, N. Semenova. Increasing the efficiency and reliability of the electric motor based on an intelligent diagnostic system and adaptive control.....	184
V. Huzenko, S. Halko, S. Chausov, M. Sorokin, Yu. Khandola. Implementation of engine temperature control system in ac electric drive.....	195
S. Kazbekova. Theoretical issues and design of laser systems (LS).....	201
S. Kravtsov, R. Zhesan, O. Holyk, V. Zubenko. Application of energy-efficient buildings with control systems in the distributed power generation of the future.....	211
O. Miroshnyk, V. Pazyi, O. Savchenko, D. Myrgorod, T. Halko. Research on the efficiency of using the microprocessor device PC83-B1 of the “RPA Systems” company for monitoring emergency modes of 6–10 kV grids.....	218
N. Peretiaka. Modern approaches to enhancing the learning activity of students in technical educational institutions.....	228
M. Savchenko, O. Radchuk, S. Shevchenko. Energy-efficient automation of food factories: calculation of uninterruptible power supply capacity based on renewable energy sources.....	235
O. Saiko. Enhancing power system resilience through decentralization.....	243

COMPUTER SCIENCES

A. Bezverkhyi, I. Skrypnyk, O. Zhukov. Integrating quantum computing into fuzzy logic expert systems.....	250
A. Yanko, M. Myziura. Model of educational process personalization via LLM integration into a web application with dynamic explanation generation.....	255

FOOD TECHNOLOGIES

I. Belova, L. Kiurcheva, V. Hidzhelitskyi, M. Kyryliv. Improving the technology of wheat bread by using phytofortifiers in the form of vegetable masses.....	264
O. Vasylyshyna, I. Vlasenko. Chemical methods of meat safety control and methods of its preservation.....	271
Iu. Goriainova, O. Simakova, O. Bodnaruk, V. Volkova, K. Pohoriletskyi. Qualimetric assessment of the quality of short dough cookies with the addition of chokeberry and reduced fat content.....	277
S. Kolesnichenko. Application software for restaurant enterprises.....	284
K. Kostetska, S. Kovtun-Vodyanytska, O. Kolomiets. Technological parameters of wheat bread using mustard processing products.....	290



O. Mamai, V. Lutskova, T. Yakovenko, K. Zubkova, O. Stoianova. Improvement of cognac wine materials technology.....	297
K. Ruban, N. Sova, I. Kholobtseva, A. Tokar. Development and quality evaluation of an instant cream soup concentrate.....	305
T. Synenko, O. Koshel, A. Suprun, K. Omelchuk, D. Zavgorodnii. Development and comprehensive quality assessment of a whey-based pudding with added plant-based ingredients.....	312
S. Smirnov, O. Priss. Microbiological stability of gingerbread products with filling during storage.....	321
V. Sukmanov, A. Polishchuk, M. Ilchenko, B. Shaferivskyi, O. Fesenko. Prolongation of shelf life of fish products and mackerel (<i>Scomber scombrus</i>) mixed by adding potato peel extract.....	327
V. Troiekurova, V. Kalyna, M. Denysenko. Research on modes and parameters of systems for storage of barley grain in a cooled state: impact on organoleptic and physical quality indicators.....	343
V. Cherniakov, O. Melnyk. Evaluation of snack products using red lentil flour.....	351
S. Iurchenko, M. Kolesnikova, T. Cheremskaya. Development of gluten-free pancake technology and implementation of a risk-based approach to ensuring their safety.....	359



ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-1>

УДК 633.11:631.3:004.94

І. М. Білоус, д-р філософії

ORCID: 0000-0001-9635-6631

Дніпровський державний аграрно-економічний університет

e-mail: bilous.i.m@dsau.dp.ua

ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗЕРНА ПШЕНИЦІ ДЛЯ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЙОГО РУЙНУВАННЯ

Анотація. У статті розглянуто метод визначення фізико-механічних параметрів зерна пшениці сорту «Патрас» для коректного налаштування DEM-моделі. На основі вимірювання геометричних параметрів 150 зернин у середовищі Simcenter STAR-CCM+ методом агрегації сфер побудовано модель дискретних елементів. Проведено повнофакторний чисельний експеримент зі змінними факторами: коефіцієнтом Пуассона (ν), модулем Юнга (E_p) та граничною напругою розтягу і зсуву (W_p). За результатами оброблення даних у Wolfram Cloud отримано рівняння регресії для трьох просторових положень зернини. Лабораторні випробування на власному стенді з тензометричним датчиком підтвердили достовірність результатів моделювання. Встановлено уточнені параметри моделі: $E_p = 21,2$ МПа, $\nu = 0,50$, $W_p = 2,2$ МПа.

Ключові слова: зерно пшениці, метод дискретних елементів, моделювання, зусилля руйнування, фізико-механічні властивості.

Постановка проблеми. Сучасне машинобудування в агропромисловому секторі дедалі активніше спирається на методологію проєктування на основі моделей (Model-Based Systems Engineering – MBSE), ключовою ідеєю якої є створення та відпрацювання цифрових прототипів техніки до початку їх фізичного виготовлення [1]. Застосування такого підходу дозволяє суттєво зменшити матеріальні витрати та скоротити строки розробки обладнання, однак ефективність моделювання безпосередньо залежить від точності вихідних даних, що закладаються у цифрову модель. Особливо це стосується процесів руйнування зернових матеріалів – зокрема пшениці – під час подрібнення концентрованих кормів, де адекватність чисельного моделювання визначається коректністю фізико-механічних параметрів, заданих у моделі зернини. Пшениця є однією з провідних культур у кормовиробництві, проте верифіковані параметри DEM-моделі для конкретних сортів залишаються недостатньо вивченими.

Аналіз останніх досліджень. Механічні властивості зернівок пшениці формуються під впливом комплексу факторів: анатомічної будови (ендосперм, алеїроновий шар, оболонки), вологості зерна, умов вирощування та сортових особливостей. Дослідженнями [2] встановлено, що структура клітин та текстура матеріалу оболонки суттєво визначають характер деформації та руйнування зернівки при стискальному навантаженні.

Метод дискретних елементів (DEM) знайшов широке застосування для прогнозування пошкоджень зерна у промислових системах переробки та оптимізації параметрів обладнання [3]. Він дозволяє кількісно оцінити поведінку сипкого матеріалу, зокрема розподіл контактних сил і процеси дисипації енергії, що складно визначити традиційними експериментальними методами [4].

Точність DEM-симуляцій суттєво залежить від якості геометричної моделі зернини та від коректного задання фізико-механічних параметрів матеріалу [5]. Найпоширенішим способом відтворення складної форми зерна є метод агрегації сфер [6; 7], що вже успішно застосовувався для гороху [8], рису [9], сої [10]. Для пшениці такі дослідження є фрагментарними, а визначення параметрів моделі для конкретних сортів зі зіставленням із реальними випробуваннями є актуальним науковим завданням, вирішення якого забезпечить надійну основу для подальшого вдосконалення подрібнювального обладнання.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою дослідження є встановлення адекватних фізико-механічних параметрів DEM-моделі зерна пшениці сорту «Патрас» у програмному середовищі Simcenter STAR-CCM+ шляхом порівняння зусиль руйнування, отриманих у чисельному та лабораторному експериментах.

Основна частина. Спочатку було виміряно геометричні параметри 150 зернин пшениці сорту «Патрас». Вимірювання довжини (L), ширини (W) та товщини (H) виконувались індикаторним товщиноміром ТР 25–100 з точністю 0,01 мм. За результатами статистичної обробки встановлено: середня довжина зернини $L = 6,7$ мм, середня ширина $W = 3,19$ мм, середня товщина $H = 2,89$ мм. Форма зернини є компактно-овальною зі сферичністю близько 0,57.

На підставі виконаних вимірювань і огляду досліджень у середовищі Simcenter STAR-CCM+ методом агрегації сфер побудовано тривимірну DEM-модель зернини пшениці (рис. 1). Для опису контактних взаємодій між частинками і сталним пуансоном застосовано модель Герца–Міндліна. Параметри моделі розподілено на дві категорії: параметри властивостей матеріалу (щільність, коефіцієнт Пуассона, модуль Юнга, гранична напружка розтягу та зсуву) та параметри взаємодії (коефіцієнти відновлення, статичного тертя і тертя кочення). Їх початкові та фіксовані значення наведено в табл. 1.

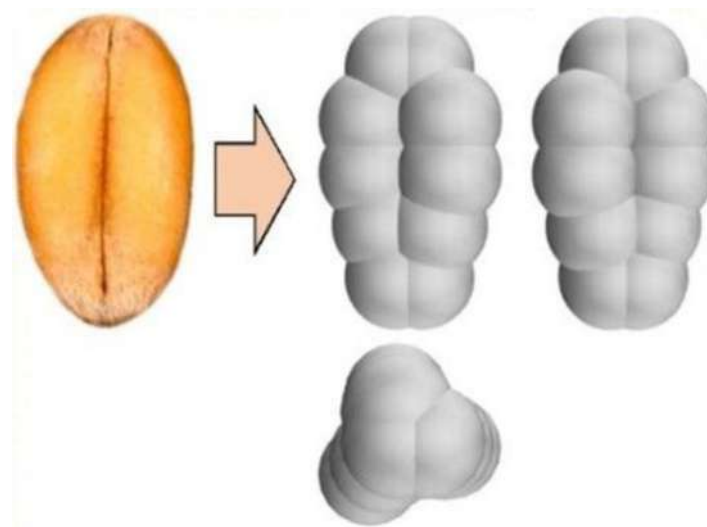


Рис. 1. Модель зернини пшениці

Зусилля руйнування досліджували у трьох положеннях зернини відносно осі навантаження: вертикальному – сила F_z спрямована по довжині L ; бічному – сила F_y спрямована по ширині W ; горизонтальному – сила F_x спрямована по товщині H . Такий підхід дає змогу врахувати анізотропію механічних характеристик зернини та їх зміну залежно від напрямку прикладання навантаження.

Чисельні дослідження в Simcenter STAR-CCM+ проводились відповідно до повного факторного плану. Варійованими параметрами обрано коефіцієнт Пуассона (ν), модуль Юнга (E_p) та граничну напружку розтягу і зсуву (Wp), що варіювалися на трьох рівнях (табл. 2).



Таблиця 1

Параметри симуляції DEM

Матеріали	Параметри	Значення
Пшениця	Коефіцієнт Пуассона	0,3...0,5
	Модуль Юнга, МПа	10...40
	Щільність частинок, кг/м ³	1320 [10]
	Коефіцієнт відновлення після зіткнення	0,37 [11]
	Коефіцієнт статичного тертя	0,2 [11]
	Гранична напруга розтягу, МПа	1...3
	Гранична напруга зсуву, МПа	1...3
Стінка (сталь)	Коефіцієнт Пуассона	0,3 [12]
	Модуль зсуву, Па	$7,9 \times 10^{10}$ [13]
	Щільність, кг/м ³	7800 [12]
Пшениця та стінка (сталь)	Коефіцієнт відновлення після зіткнення	0,4 [10]
	Коефіцієнт статичного тертя	0,554 [13]
	Коефіцієнт тертя кочення	0,05 [14]

Таблиця 2

Рівні та інтервали варіювання факторів

Показник	Коефіцієнт Пуассона ν	Модуль Юнга E_p , МПа	Напруга розтягу та зсуву W_p , МПа
Нижній рівень (-1)	0,3	10	1
Основний рівень (0)	0,4	25	2
Верхній рівень (+1)	0,5	40	3
Інтервал варіювання	0,1	15	1

Отримані в результаті чисельного експерименту дані оброблено в хмарному середовищі Wolfram Cloud, що дозволило побудувати рівняння регресії залежності зусилля руйнування зерна пшениці від досліджуваних факторів. Після перевірки на адекватність і відсіювання статистично незначущих членів за t-критерієм Стюдента рівняння у натуральних змінних набули вигляду:

– при вертикальному положенні зернини:

$$Fz = 16,356 - 4,374E_p + 0,1034E_p^2 + 158,61W_p - 17,623W_p^2 + 64,273\nu - 89,41W_p\nu; \quad (1)$$

– при положенні зернини на бічній поверхні:

$$Fy = 63,567 - 6,291E_p + 0,1526E_p^2 + 115,17W_p + 150,48\nu - 145,33W_p\nu; \quad (2)$$

– при горизонтальному положенні зернини:

$$Fx = 99,887 - 7,199E_p + 0,1746E_p^2 + 56,554W_p + 17,08W_p^2 + 219,19\nu - 109,60W_p\nu. \quad (3)$$

Графічну інтерпретацію отриманих залежностей наведено на рис. 2.

Аналіз рівнянь (1)–(3) засвідчує, що зусилля руйнування монотонно зростає зі збільшенням модуля Юнга E_p , що узгоджується з положеннями механіки пружних матеріалів: жорсткіший матеріал чинить вищий опір деформації й потребує більшого навантаження для досягнення критичного стану. Гранична напруга розтягу і зсуву W_p є найвпливовішим параметром у всіх трьох орієнтаціях зернини, тоді як коефіцієнт Пуассона ν має найменший вплив – цей результат свідчить про переважаючу роль міцнісних характеристик матеріалу над характеристиками поперечних деформацій у процесі руйнування компактної зернини. Найвище значення зусилля характерне для горизонтального положення, де більша площа контакту пуассона із зерниною забезпечує більш рівномірний розподіл навантаження.

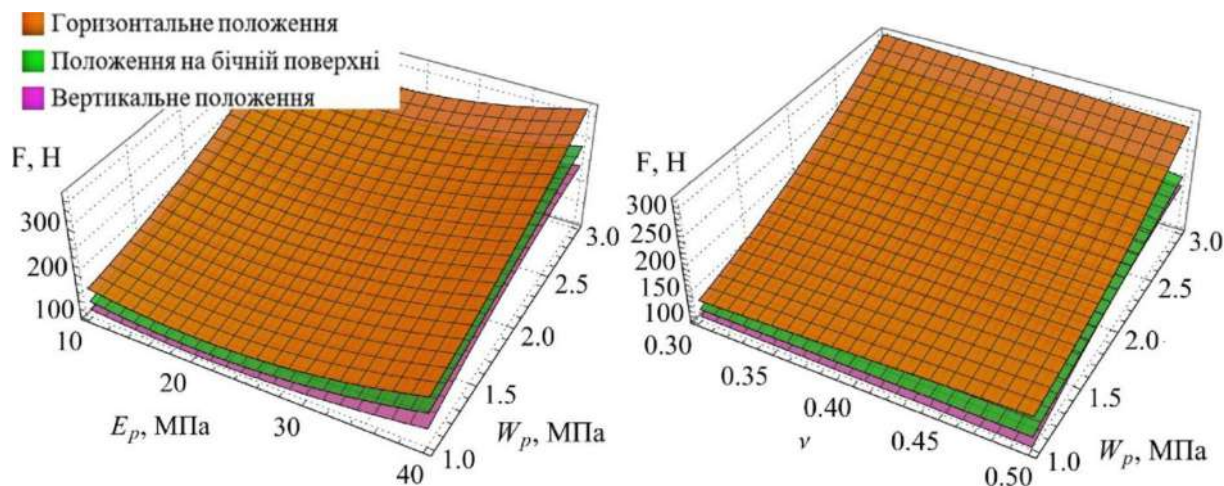


Рис. 2. Залежність сили руйнування зерна пшениці при стиску від коефіцієнта Пуассона (ν), модуля Юнга (E_p) та напруги розтягу та зсуву (W_p) при її різному положенні

Другим етапом досліджень стало отримання експериментальних значень зусилля руйнування на лабораторному стенді (рис. 3). Стенд складається зі станини 1, встановлених на ній лінійних напрямних 4, опорної 2 та рухомої 3 кареток. Рухома каретка 3 переміщується у вертикальній площині за допомогою електродвигуна постійного струму 5, що з'єднаний з кареткою передачею гвинт-гайка. Нижнє положення рухомої каретки обмежується кінцевим вимикачем 8. Повзунковий потенціометр 9 відстежує положення каретки; тензометричний датчик 10 фіксує силу на нижньому пуансоні 12 з призматичною контактною поверхнею. Сигнали з датчика надходять через аналого-цифровий перетворювач HX711 на плату Arduino Uno ATmega 328P-PU, а звідти через USB-інтерфейс – до ПЕОМ 6 з програмним середовищем «Arduino-1.8.9-windows». Швидкість переміщення каретки – 0,0025 м/с, діаметр пуансонів – 10 мм. [16]

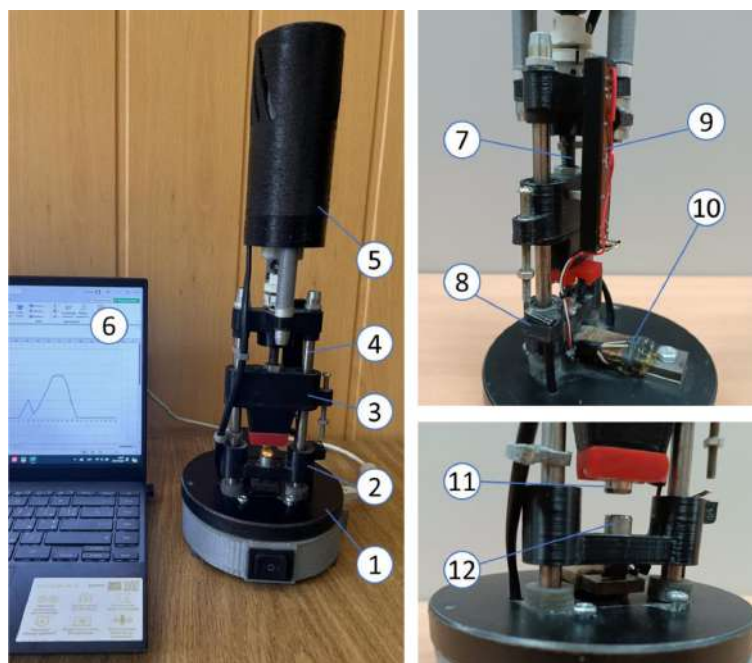


Рис. 3. Лабораторний стенд для дослідження процесу стиску зерна

1 – станина; 2 – опорна каретка; 3 – рухома каретка; 4 – напрямна; 5 – електродвигун постійного струму; 6 – ПЕОМ; 7 – гвинт приводу; 8 – кінцевий вимикач; 9 – тензометричний датчик; 11 – верхній пуансон; 12 – нижній пуансон

Для лабораторних досліджень випадковим чином сформовано три групи по 50 зернин пшениці сорту «Патрас». Вологість зерна на момент випробувань склала 11,31 %, що відповідає нормам для кормового зерна (не вище 14 % згідно з ДСТУ) і забезпечує стабільні механічні властивості матеріалу без пластифікуючого впливу надмірної вологості. При зазначеній вологості зерна одержано такі значення зусилля руйнування при різних просторових положеннях зернини:

- у вертикальному положенні F_z – від 43,29 Н до 293,46 Н, середнє значення 147,73 Н;
- на бічній поверхні F_y – від 70,01 Н до 251,29 Н, середнє значення 155,09 Н;
- у горизонтальному положенні F_x – від 141,50 Н до 393,81 Н, середнє значення 267,33 Н.

Характерною ознакою пшениці у порівнянні з кукурудзою є суттєво менший розкид значень зусилля руйнування в межах однієї просторової орієнтації, що свідчить про більш однорідну внутрішню структуру зернини. Також підтверджено, що горизонтальна орієнтація забезпечує найвищу несучу здатність зернини, тоді як вертикальна – найнижчу.

На завершальному етапі у програмному середовищі MS Excel виконано зіставлення зусиль руйнування, отриманих у чисельному та лабораторному експериментах. Підбираючи значення модуля Юнга, коефіцієнта Пуассона та граничної напруги за допомогою рівнянь регресії (1)–(3), визначено такі параметри фізико-механічних властивостей зерна пшениці сорту «Патрас», при яких модельні зусилля руйнування найкраще узгоджуються з експериментальними даними: модуль Юнга $E_p = 21,2 \pm 3,1$ МПа; коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,50 \pm 0,03$; гранична напруга розтягу та зсуву $W_p = 2,2 \pm 0,1$ МПа.

Висновки. За результатами проведених досліджень встановлено:

- базуючись на вимірюваннях геометрії 150 зернин пшениці сорту «Патрас» ($L = 6,70$ мм, $W = 3,19$ мм, $H = 2,89$ мм) та огляді сучасних публікацій, у середовищі Simcenter STAR-CCM+ методом агрегації сфер побудовано DEM-модель зернини.
- за результатами повнофакторного чисельного експерименту отримано рівняння регресії (1)–(3), що описують залежність зусилля руйнування від коефіцієнта Пуассона (ν), модуля Юнга (E_p) та граничної напруги розтягу і зсуву (W_p). Встановлено, що найбільший вплив на зусилля руйнування чинить гранична напруга розтягу та зсуву, найменший – коефіцієнт Пуассона;
- проведено лабораторний експеримент з визначення зусилля руйнування зерна пшениці у трьох положеннях при вологості 11,31 %; за результатами зіставлення з чисельними даними визначено фізико-механічні параметри DEM-моделі: $E_p = 21,2 \pm 3,1$ МПа; $\nu = 0,50 \pm 0,03$; $W_p = 2,2 \pm 0,1$ МПа.

Одержані параметри можуть бути використані для уточнення вхідних даних при моделюванні процесів подрібнення пшениці в дискових та інших типах подрібнювачів, що забезпечить підвищення достовірності результатів чисельних досліджень.

Список використаних джерел

1. Shevchenko N. An Introduction to Model-Based Systems Engineering (MBSE). 2020. DOI: <https://doi.org/10.58012/d464-qf49>
2. Kubík Ľ., Božíková M., Kažířová V. Mechanical properties of wheat grains at compression. *Acta Technologica Agriculturae*. 2021. Vol. 24, no. 4. P. 202–208. DOI: <https://doi.org/10.2478/ata-2021-0033>
3. Validation of a DEM Model for predicting grain damage in an industrial-scale handling system / Z. Chen et al. *Smart Agricultural Technology*. 2023. Vol. 5. P. 100274. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100274>
4. Алієв Е. Б. Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва: Підручник. Київ : Аграрна наука, 2023. 340 с. URL: <https://doi.org/10.31073/978-966-540-584-9>
5. Determination and interpretation of parameters of double-bud sugarcane model based on discrete elements / J. Zhong et al. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022. Vol. 203. 107428. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107428>

6. Liu Z., Ma H., Zhao Y. Comparative study of discrete element modeling of tablets using multi-spheres, multi-super-ellipsoids, and polyhedrons. *Powder Technology*. 2021. Vol. 390. P. 34–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.05.065>
7. A study on the validity of the multi-sphere Discrete Element Method / H. Kruggel-Emden et al. *Powder Technology*. 2008. Vol. 188, no. 2. P. 153–165. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.04.037>
8. Influence of grain shape and intergranular friction on material behavior in uniaxial compression: Experimental and DEM modeling / J. Wiącek et al. *Powder Technology*. 2012. Vol. 217. P. 435–442. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.10.060>
9. Markauskas D., Kačianauskas R. Investigation of rice grain flow by multi-sphere particle model with rolling resistance. *Granular Matter*. 2010. Vol. 13, no. 2. P. 143–148. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10035-010-0196-5>
10. Material and interaction properties of selected grains and oilseeds for modeling discrete particles / J. M. Boac et al. *Transactions of the ASABE*. 2010. Vol. 53, no. 4. P. 1201–1216. URL: <https://doi.org/10.13031/2013.32577>
11. Discrete element modelling of bulk behaviour of wheat (*Triticum aestivum* L.) cv. ‘Pionier’ during compressive loading / I. Ramaj et al. *Biosystems Engineering*. 2024. Vol. 242. P. 123–139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.04.005>
12. AISI 1026 Carbon Steel (UNS G10260). *AzoM*. URL: https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6583&utm_ (date of access: 20.11.2025).
13. Wang X., Wu W., Jia H. Calibration of discrete element parameters for simulating wheat crushing. *Food Science & Nutrition*. 2023. Vol. 11, no. 12. P. 7751–7764. DOI: <https://doi.org/10.1002/fsn3.3693>
14. Bassey J. B., Odesola I. F., Olawuyi J. A. A Comparative technique for performance evaluation of hammer mill and disk mill in yam flour processing. *World Journal of Engineering*. 2022. Vol. 10, no. 3. P. 613–625.
15. Дудін В. Ю., Білоус І. М. Дослідження процесу руйнування зерна кукурудзи з використанням цифрових моделей. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2024. Т. 10, № 41. С. 123–130. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.123-130](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.123-130)

Дата першого надходження статті до видання: 19.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



I. Bilous

Dnipro State Agrarian and Economic University

DETERMINATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL PARAMETERS OF WHEAT GRAIN FOR NUMERICAL SIMULATION OF ITS DESTRUCTION PROCESS

Summary

The study addresses the problem of determining verified physical and mechanical parameters for the discrete element method (DEM) model of wheat grain, which is essential for reliable numerical simulation of grain destruction processes in feed grinding equipment. The research object is wheat grain of the ‘Patras’ variety. Geometric parameters – length (L), width (W), and thickness (H) – were measured for 150 grains using an indicator thickness gauge with an accuracy of 0.01 mm. Statistical processing yielded mean values of $L = 6.70$ mm, $W = 3.19$ mm, and $H = 2.89$ mm, with a sphericity of approximately 0.57. Based on these measurements, a three-dimensional DEM model of the grain was constructed in Simcenter STAR-CCM+ using the multi-sphere aggregation method. Contact interactions between particles and the steel punch were described using the Hertz–Mindlin contact model.

A full factorial numerical experiment was conducted with three variable factors: Poisson’s ratio (ν), Young’s modulus (E_p), and tensile and shear bond strength (W_p), each varied at three levels. Destruction forces were evaluated in three spatial orientations of the grain relative to the loading axis: vertical (F_z along length L), lateral (F_y along width W), and horizontal (F_x along thickness H). The experimental data were processed in Wolfram Cloud, yielding regression equations for each orientation. Analysis of the equations showed that tensile and shear bond strength W_p



has the greatest influence on destruction force across all orientations, while Poisson's ratio ν has the least effect. The highest destruction force was recorded in the horizontal orientation due to the larger contact area between the punch and the grain.

Laboratory experiments were performed on a custom-built test bench equipped with a strain gauge load cell, an HX711 analog-to-digital converter, and an Arduino Uno microcontroller. Three groups of 50 grains each were tested at a moisture content of 11.31 %. Mean experimental destruction forces were: $F_z = 147.73$ N, $F_y = 155.09$ N, and $F_x = 267.33$ N. Comparison of numerical and experimental results using regression equations allowed calibration of the DEM model parameters. The following physical and mechanical properties of 'Patras' wheat grain were established: Young's modulus $E_p = 21.2 \pm 3.1$ MPa, Poisson's ratio $\nu = 0.50 \pm 0.03$, and tensile and shear bond strength $W_p = 2.2 \pm 0.1$ MPa. The obtained parameters can be applied in numerical simulations of wheat grinding processes in disc mills and other types of grinding equipment.

Keywords: wheat grain, discrete element method, modeling, destruction force, physical and mechanical properties.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-2>

УДК 621.926:66.095.7

Р. С. Бровко, аспірант
А. М. Пугач, канд. техн. наук,
д-р наук з держ. упр., професор
Дніпровський державний аграрно-економічний університет
e-mail: ruslan.brovko@ukr.net

ORCID: 0009-0008-3792-8511
ORCID: 0000-0002-5586-424X

ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ ШНЕКОВОГО ПРЕСУ ШЛЯХОМ ЧЕРГУВАННЯ ЗОН СТИСКУ І ПЕРЕМІШУВАННЯ МАСИ В ШНЕКОВОМУ ТРАКТІ

Анотація. У статті розглянуто питання оптимізації конструкції шнекового пресу шляхом чергування зон стиску та перемішування маси у шнековому тракті. Проведено аналіз існуючих конструкцій та встановлено вплив геометричних параметрів шнека на ефективність процесу пресування. Обґрунтовано доцільність функціонального зонування тракту, що забезпечує стабілізацію технологічного процесу, покращення перемішування сировини та рівномірний розподіл навантаження. Розроблено і запропоновано конструкцію шнекового пресу та шнекового тракту, яка включає 14-секційний вал із чотирма модифікованими дросельними втулками з зубчастим профілем. Впровадження цього рішення забезпечує ефективне перемішування та ущільнення матеріалу, рівномірний розподіл навантаження, підвищує продуктивність і стабільність роботи обладнання, знижує енергоспоживання та підвищує зносостійкість робочих органів. Встановлено, що застосування запропонованої конструкції дозволяє збільшити строк служби деталей у 1,5–2 рази, знизити енергоспоживання до 10 % та підвищити вихід олії на 5 %.

Ключові слова: олійний прес, шнековий тракт, модифікована конструкція, дросельні кільця, ефективність пресування, зносостійкість деталей.

Постановка проблеми. Сучасний розвиток агропромислового комплексу та суміжних галузей переробної промисловості супроводжується постійним зростанням вимог до ефективності технологічного обладнання, зокрема машин для ущільнення, транспортування та переробки сипких і вологих матеріалів. Одним із ключових видів такого обладнання є шнекові преси, які широко застосовуються у виробництві кормів, олії, паливних брикетів, а також у процесах утилізації відходів рослинного та тваринного походження. Висока універсальність, відносна простота конструкції та можливість безперервної роботи забезпечують їм важливе місце серед технологічних засобів механізації.

Разом із тим, традиційні конструкції шнекових пресів не завжди забезпечують оптимальні умови для ефективного ущільнення та переробки матеріалу. Основними недоліками існуючих рішень є нерівномірність розподілу тиску вздовж шнекового тракту, недостатня інтенсивність перемішування маси, локальні перевантаження робочих органів, а також підвищені енергетичні витрати. Це призводить до зниження якості кінцевого продукту, збільшення втрат поживних або цінних компонентів і зростання експлуатаційних витрат.

Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності роботи шнекових пресів є вдосконалення геометрії та функціональної організації шнекового тракту. Зокрема, значний інтерес становить підхід, що передбачає чергування зон стиску і перемішування матеріалу. Така конструктивна схема дозволяє поєднати процеси ущільнення і активного перемішування,

що сприяє більш рівномірному розподілу навантаження, покращенню структурно-механічних властивостей оброблюваної маси та інтенсифікації технологічного процесу в цілому.

Черговість зон стиску і перемішування забезпечує поступове наростання тиску, що запобігає різким перепадам навантаження і зменшує ймовірність забивання шнека. У зонах перемішування відбувається руйнування агломератів, вирівнювання вологості та температури матеріалу, а також підвищення його пластичності, що позитивно впливає на подальший процес ущільнення. Водночас зони стиску створюють необхідні умови для досягнення заданих параметрів щільності та форми кінцевого продукту.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення енергоефективності та продуктивності шнекових пресів при одночасному забезпеченні високої якості обробки матеріалу. Оптимізація конструкції шляхом раціонального поєднання зон різного функціонального призначення дозволяє зменшити питомі енергетичні витрати, підвищити надійність роботи обладнання та розширити діапазон технологічних можливостей машин.

Крім того, сучасні умови господарювання вимагають створення універсальних машин, здатних ефективно працювати з різними видами сировини, що характеризуються широким спектром фізико-механічних властивостей. У цьому контексті оптимізація шнекового тракту набуває особливого значення, оскільки саме він визначає характер взаємодії робочого органа з матеріалом і суттєво впливає на кінцеві показники процесу.

Таким чином, дослідження, спрямовані на обґрунтування та реалізацію принципу чергування зон стиску і перемішування в конструкції шнекового преса, є важливими як з наукової, так і з практичної точки зору. Вони дозволяють розширити уявлення про закономірності руху та деформації матеріалу в шнековому тракті, а також створити передумови для розробки більш досконалих і ефективних технічних рішень.

Аналіз останніх досліджень. Ряд авторів зазначає, що модернізація конструкції шнекових пресів здійснюється шляхом застосування багатоступеневого стиску, зміни кроку витків шнека, використання змінних профілів шнекових елементів та введення додаткових змішувальних зон. Такі конструктивні рішення дозволяють підвищити ступінь вилучення олії та зменшити кількість залишкової олії у макусі [1, 2]. У роботі [3] досліджували процес механічного пресування олійної сировини, встановлено, що ефективність вилучення олії значною мірою залежить від конструкції шнекового тракту, швидкості обертання шнека, величини зазорів та характеру зміни тиску вздовж робочої камери. Дослідження показують, що чергування ділянок високого тиску (зон стиску) та зон розвантаження або перемішування сприяє кращому руйнуванню клітинної структури матеріалу та інтенсифікації виділення олії. Окремі дослідження [4] присвячені вдосконаленню технологічних особливостей шнекових пресів шляхом введення додаткових конструктивних елементів, зокрема охолоджувальних систем, змішувальних секцій, а також регульованих елементів для зміни технологічних параметрів процесу. Це дозволяє забезпечити оптимальні температурні режими пресування, запобігти перегріву продукту та підвищити якість отриманої олії.

У сучасних роботах розглядаються питання автоматизації роботи шнекових пресів та адаптації їх конструкції до різних видів олійної сировини, що дозволяє забезпечити стабільність технологічного процесу та підвищити його енергоефективність [5, 6].

Окремий напрям досліджень пов'язаний із математичним моделюванням процесу пресування, що дозволяє визначити раціональні параметри конструкції шнека та режими роботи обладнання. За результатами таких досліджень встановлено, що оптимізація конструктивних параметрів преса дає змогу підвищити продуктивність обладнання та покращити техніко-економічні показники процесу [7].

Незважаючи на значну кількість досліджень, питання оптимізації конструкції шнекового пресу шляхом раціонального чергування зон стиску та перемішування маси в шнековому

тракті потребує подальшого вивчення, зокрема щодо визначення оптимальної геометрії таких зон та їх впливу на інтенсифікацію процесу пресування.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою роботи є оптимізація конструкції шнекового пресу за рахунок розробки нового дизайну дросельних кілець та заміни існуючих в зонах підвищеного стиску, що в свою чергу впливає на покращення перемішування маси для підвищення ефективності процесу пресування, інтенсифікації масообміну та покращення якісних показників роботи оброблюваної сировини (насіння соняшника), збільшення зносостійкості деталей, зниження енергоспоживання.

Для досягнення поставленої мети сформульовано наступні задачі:

- проаналізувати існуючі конструкції шнекових пресів та їх технологічні особливості;
- дослідити вплив геометричних параметрів шнека на процес транспортування та ущільнення маси;
- обґрунтувати доцільність чергування зон стиску та перемішування у шнековому тракті;
- розробити удосконалену конструкцію шнекового пресу, тракту;
- оцінити вплив запропонованих конструктивних змін на ефективність роботи обладнання;
- визначити оптимальні технологічні параметри роботи шнекового пресу.

Основна частина. Загальний зовнішній вигляд пресу Krupp EP20 представлено на рисунку 1.

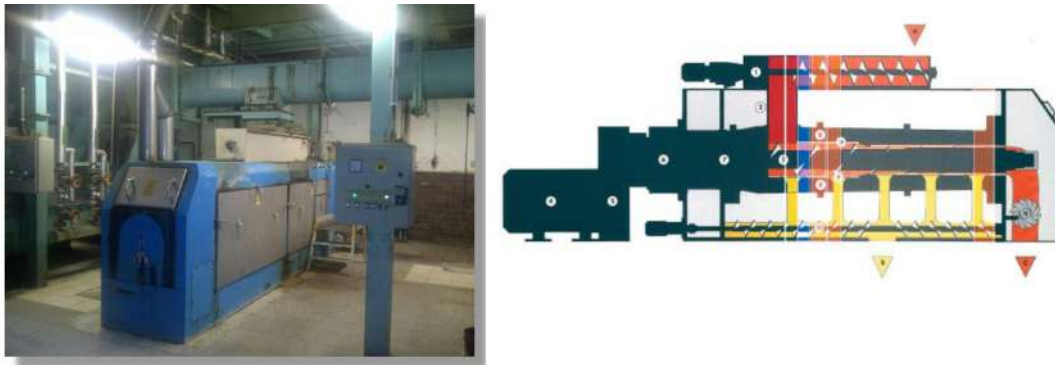


Рис. 1. Прес Krupp EP20 – загальний вигляд

Технічні характеристики пресу Krupp EP20 [8] представлено в таблиці 1.

Існуюча збірка працює задовільно, але виникає високий тиск в місцях де зменшується діаметр камери (на рисунку 2 це зазначено: дросельне кільце та перехідна втулка) – точки високого зносу, також «тугі» дросельні втулки викликають високе енергоспоживання.

Дуже велике стиснення негативно відображається на продуктивності пресу.

Нами запропоновано і здійснено конструктивні зміни пресу Krupp EP20 шляхом заміни розроблених дросельних кілець, які представлено на рис. 3, 4.

Шнековий тракт змонтований на валу з 14 секцій, до складу якого входять чотири модифіковані дросельні втулки з профілем поверхні зубчастої форми. Така конструктивна форма забезпечує позитивний технологічний ефект від впровадження запропонованого рішення.

На шнековому тракті представлено:

- декілька зон зниження стиснення для мінімізації енергоспоживання;
- зони скидання тиску та перемішування для максимізації продуктивності;
- найкращі показники олійності та дефекту помелу (важливий фактор для секції екстракції).

Для виготовлення дросельних кілець з новим дизайном використовували сталь Gold Star. Вона є спеціалізованим зносостійким сплавом, що використовують для виготовлення робочих деталей олійних пресів, зокрема дросельних (конусних) кілець. Цей матеріал розроблений для

Таблиця 1

Технічні характеристики пресу Krupp EP20

Технічні характеристики	Технічні характеристики
Напруга живлення: 400 В, 50 Гц	Ширина отворів зєєра (за напрямком руху маси):
Маса близько 17 000 кг	0,72–0,57–0,57–0,37–0,37–0,57–0,37–0,28–0,28–0,28–0,17
Маса в робочому стані ~ 19 000 кг	Приводна потужність 4 кВт
Приводна потужність 500 кВт	Частота обертання двигуна 1/хв
Частота обертання двигуна 1500 1/хв	Частота обертання приводу при 50 Гц: 64 1/хв
Частота обертання приводу 64 1/хв	Набивний шнек (опція)
Номер редуктора: 242559/112, 242559/114, 242559/113	Приводна потужність 5,5 кВт
Передавальне число 20	Частота обертання двигуна 1/хв
Витрата масла редуктора близько 60 л	Частота обертання приводу при 50 Гц: 83 1/хв
Клиновий ремінь 12 шт. ХРСх4500 мм	Дробарка жмиху (опція)
Шків клинового ремня – Ø	Приводна потужність ____ кВт
(з боку редуктора) $D = 630$ мм	Частота обертання двигуна 1/хв
Шків клинового ремня – Ø	Шнек відбору масла
(з боку двигуна) $D = 540$ мм	Приводна потужність 0,75 кВт
Витрата холодної води ~ 1,5 м ³ /год	Частота обертання двигуна 1380 1/хв
Дозувальний шнек (опція)	Частота обертання двигуна 62 1/хв

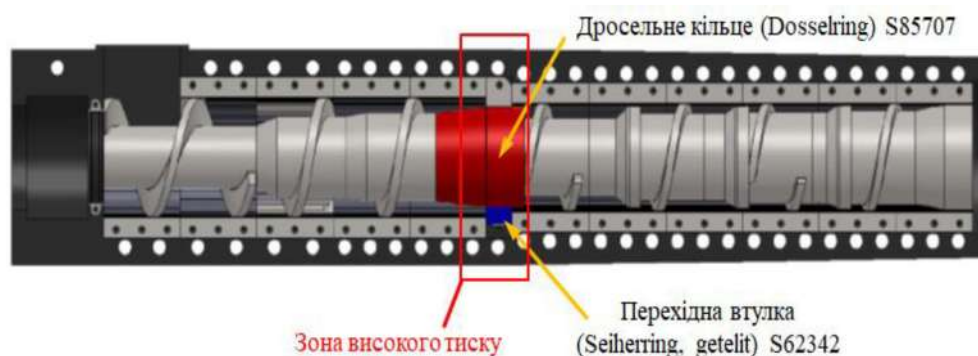


Рис. 2. Шнековий тракт: існуюча збірка



Рис. 3. Зовнішній вигляд модифікованих дросельних кілець

роботи в умовах екстремального абразивного зносу та високого тиску, що виникають під час віджиму олійних культур.

Основні характеристики сталі Gold Star:

– висока твердість: після термічної обробки робоча поверхня досягає показників 58–62 HRC – це забезпечує тривалий термін експлуатації в порівнянні зі стандартними інструментальними сталями;

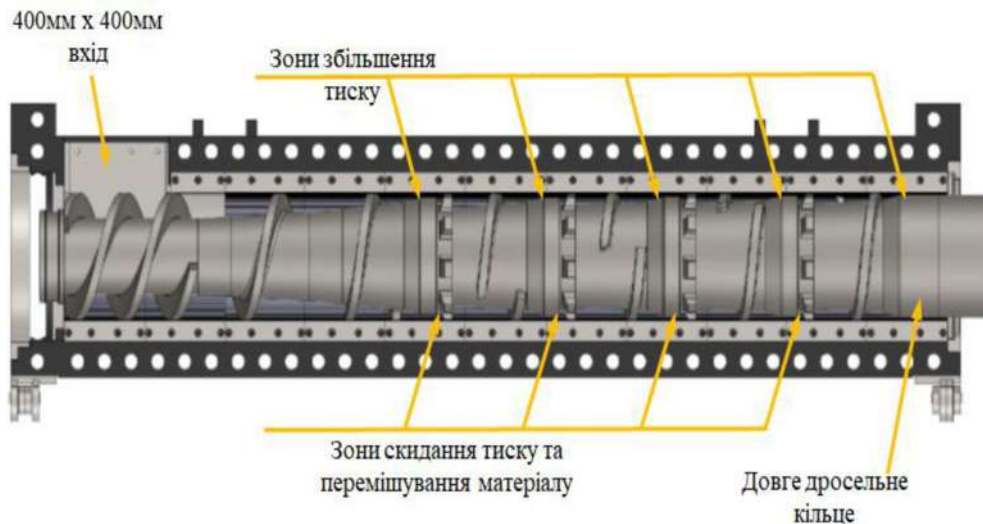


Рис. 4. Модель шнекового тракту з удосконаленою конструкцією

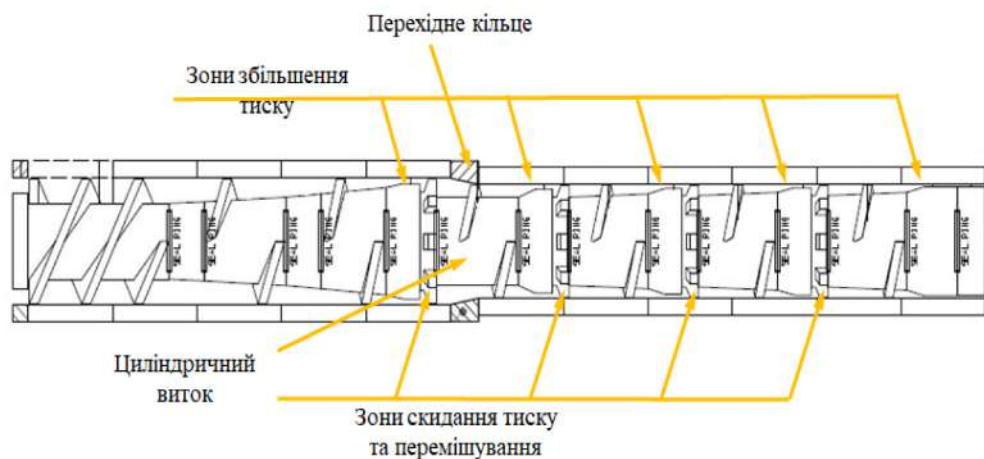


Рис. 5. Конструктивна схема шнекового тракту з удосконаленою конструкцією

– зносостійкість: сплав містить підвищену кількість хрому та спеціальні легуючі добавки (вольфрам, ванадій), що створюють стійку структуру карбідів – це критично важливо для дросельних кілець, які постійно контактують з абразивною макухою під тиском;

– термічна стабільність: матеріал зберігає свої механічні властивості при нагріванні до температур 200–250 °С, які є типовими для процесу інтенсивного пресування;

– ударна в'язкість: попри високу твердість, сталь має достатню міцність серцевини, що запобігає розтріскуванню кільця при різких перепадах тиску або потраплянні сторонніх твердих часток.

Дросельні кільця зі сталі Gold Star дозволяють:

– збільшити міжремонтний інтервал обладнання в 1,5–2 рази;

– підтримувати стабільний зазор виходу макухи, що напряму впливає на залишковий вміст олії та продуктивність преса;

– зменшити ризик «залипання» або заклинювання конуса завдяки високій якості обробки поверхні та низькому коефіцієнту тертя після притирання.

Висновки.

1. У результаті виконаного дослідження, спрямованого на оптимізацію конструкції шнекового пресу шляхом чергування зон стиску та перемішування маси у шнековому тракті, досягнуто поставлену мету та вирішено комплекс взаємопов'язаних науково-технічних завдань.



2. Проведений аналіз існуючих конструкцій шнекових пресів засвідчив, що традиційні технічні рішення, як правило, орієнтовані переважно на забезпечення процесу ущільнення матеріалу за рахунок поступового зменшення кроку шнека або зміни діаметра витків. Водночас у більшості конструкцій недостатньо уваги приділяється інтенсифікації процесів перемішування та вирівнювання фізико-механічних властивостей маси, що призводить до нерівномірності навантаження, локальних перевантажень та зниження загальної ефективності процесу пресування.

3. Розроблено конструкцію шнекового пресу та шнекового тракту, яка включає 14-секційний вал із чотирма модифікованими дросельними втулками з зубчастим профілем. У ході дослідження встановлено, що геометричні параметри шнека (крок, діаметр, висота витків, профіль поверхні) суттєво впливають на характер руху матеріалу, ступінь його ущільнення та інтенсивність внутрішніх зсувних деформацій. Обґрунтовано, що раціональне поєднання ділянок з різними геометричними характеристиками дозволяє керувати процесами транспортування, стиску та перемішування маси, забезпечуючи більш стабільний і керований технологічний режим роботи преса.

4. Доведено доцільність застосування принципу чергування зон стиску та перемішування у шнековому тракту. Зони стиску забезпечують необхідне підвищення тиску та формування щільної структури матеріалу, тоді як зони перемішування сприяють руйнуванню агломератів, вирівнюванню вологості, температури та структурних характеристик маси. Така організація робочого процесу дозволяє уникнути різких градієнтів тиску, зменшити ймовірність закупорювання каналу та підвищити стабільність роботи обладнання.

5. На основі проведених теоретичних узагальнень та конструктивного аналізу розроблено удосконалену конструкцію шнекового пресу, в якій передбачено функціональне зонування шнекового тракту. Запропоноване технічне рішення забезпечує поетапний вплив на оброблювану масу з чергуванням процесів ущільнення та активного перемішування, що створює передумови для більш повного використання потенціалу матеріалу та підвищення ефективності його обробки.

6. Оцінка впливу запропонованих конструктивних змін показала, що їх впровадження сприяє зниженню питомих енергетичних витрат за рахунок більш рівномірного розподілу навантаження по довжині шнека та зменшення пікових навантажень. Одночасно відбувається підвищення продуктивності преса, що зумовлено покращенням умов транспортування матеріалу та зменшенням втрат часу на усунення можливих технологічних збоїв.

7. Важливим результатом є також підвищення зносостійкості робочих органів шнекового пресу. Завдяки зменшенню нерівномірності навантаження та зниженню інтенсивності локальних контактних напружень забезпечується більш рівномірний характер зношування деталей, що подовжує термін їх експлуатації у 1,5–2 рази та зменшує витрати на технічне обслуговування і ремонт. Досягнуто зниження енергоспоживання на 10 % та підвищення ефективності процесу пресування, що проявляється у збільшенні виходу олії близько 5 %. Отримані результати підтверджують доцільність впровадження запропонованих конструктивних рішень та їх позитивний вплив на техніко-економічні показники роботи шнекового пресу.

Список використаних джерел

1. Kachur O., Korendiy V., Havran V. Designing and simulation of an enhanced screw-type press for vegetable oil production. *Computer Design Systems. Theory and Practice*. 2023. V. 5 № 1. P. 128–136. DOI: <https://doi.org/10.23939/cds2023.01.128>
2. Singh J., Bargale P.C. Development of a small capacity double stage compression screw press for oil expression. *Journal of Food Engineering*. 2000. V. 43 № 2. P. 75–82. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(99\)00134-X](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(99)00134-X)



3. Bogaert L., Mathieu H., Mhemdi H. Characterization of oilseeds mechanical expression in an instrumented pilot screw press. *Industrial crops and products*. 2018. V. 121. P. 106–113. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.04.039>
4. Паславський Б. Гвинтовий маслопрес з системою охолодження. *Вісник Львівського національного екологічного університету. Серія Агроінженерні дослідження*. 2018. № 22. С. 92–98. DOI: <https://doi.org/10.31734/agroengineering2018.01.092>
5. Korendiy V., Havran V. Analysis of the oil extraction process and prospects of automation of screw press operation. *Scientific Bulletin of UNFU*, 2024. V. 34 № 1. P. 85–90. DOI: <https://doi.org/10.36930/40340112>
6. Chapuis A., Blin J., Carré P., Lecomte D. Separation efficiency and energy consumption of oil expression using a screw-press: The case of *Jatropha curcas* L. seeds. *Industrial Crops and Products*, 52. 2014. P. 752–761. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.11.046>
7. Mursalykova M., Kakimov M., Kassenov A., Iskakov B., Sergibayeva Z. Mathematical Modeling of Screw Press Configuration for Processing Safflower Oil. *Applied Sciences*. 2023. V. 13(5). 3057. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13053057>
8. Пугач А.М., Бровко Р.С. Розробка конструкції та обґрунтування параметрів шнекового пресу. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2025. № 4 (119). С. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2025-4-1>

Дата першого надходження статті до видання: 29.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



R. Brovko, A. Puhach
Dnipro State Agrarian and Economic University

OPTIMIZATION OF THE SCREW PRESS DESIGN BY ALTERNATING COMPRESSION AND MIXING ZONES IN THE SCREW CHANNEL

Summary

The article addresses the optimization of the screw press design through the alternation of compression and mixing zones in the screw channel. An analysis of existing designs showed that traditional solutions mainly focus on material compaction by reducing the screw pitch or changing the thread diameter, while insufficient attention is paid to intensifying mixing and equalizing the physico-mechanical properties of the material, which leads to uneven loading, local overloads, and reduced pressing efficiency. The study examined the influence of screw geometric parameters (pitch, diameter, thread height, surface profile) on material flow, compaction degree, and intensity of internal shear deformations. The feasibility of functional zoning of the screw channel was justified, where alternating compression and mixing zones stabilize the technological process, break agglomerates, equalize moisture, temperature, and structural properties, and prevent abrupt pressure gradients and channel blockage. A screw press and screw channel design has been developed and proposed, featuring a 14-section shaft with four modified throttle sleeves with a toothed profile, providing staged influence on the material, increasing productivity, improving material transport, reducing energy consumption, and enhancing wear resistance of working elements. It was found that the proposed solutions increase component service life by 1.5–2 times, reduce energy consumption by 10 %, and increase oil yield by approximately 5 %. The results confirm the effectiveness and feasibility of implementing these improvements and their positive impact on the technical and economic performance of the screw press.

Keywords: oil press, screw channel, modified design, throttle rings, pressing efficiency, wear resistance of parts.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-3>

УДК 664.14:658.52.011.56:007.52

Г. В. Дейниченко¹, д-р техн. наук, професор
Д. В. Дмитревський^{1, 2}, д-р техн. наук, доцент
Д. О. Гончар¹, аспірант
В. В. Лавренюк¹, здобувач вищої освіти

ORCID: 0000-0003-3615-8339

ORCID: 0000-0003-1330-7514

ORCID: 0009-0006-8808-6161

ORCID: 0009-0001-1454-9657

¹ Державний біотехнологічний університет² Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: dmitrevskyidv@gmail.com

АНАЛІЗ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ УЛЬТРАФІЛЬТРАЦІЇ ПРИ ОСВІТЛЕННІ СОКІВ ТА ВИЗНАЧЕННЯ НАПРЯМІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Анотація. У статті проаналізовано закономірності ультрафільтрації при освітленні фруктових соків з урахуванням впливу селективності мембран, трансмембранного тиску, гідродинамічних умов та фізико-хімічних властивостей сировини на ефективність процесу. Показано, що основними факторами зниження продуктивності є концентраційна поляризація та мембранне забруднення, механізми яких мають багатофакторний характер. Узагальнено сучасні наукові підходи до моделювання ультрафільтрації та оптимізації технологічних режимів. Обґрунтовано напрями подальших експериментальних досліджень, спрямованих на підвищення стабільності процесу та якості освітленого соку. Отримані результати можуть бути використані для удосконалення мембранних технологій у харчовій промисловості та розроблення раціональних режимів промислової ультрафільтрації.

Ключові слова: ультрафільтрація, освітлення соків, мембранні процеси, фруктові соки, селективність мембран, трансмембранний тиск, продуктивність мембрани, мембранне забруднення, гідродинамічні умови, технологічні параметри.

Постановка проблеми. Сучасний розвиток харчової промисловості характеризується зростанням вимог до якості, безпечності та стабільності готової продукції, зокрема фруктових соків. Споживачі надають перевагу натуральним продуктам із мінімальною термічною обробкою, збереженими біологічно активними речовинами та привабливими органолептичними показниками. У цьому контексті особливого значення набувають мембранні процеси, серед яких ультрафільтрація займає провідне місце як ефективний метод освітлення соків без застосування допоміжних фільтрувальних матеріалів і жорстких температурних режимів.

Ультрафільтрація є баромембранним процесом, що реалізується під дією трансмембранного тиску та забезпечує розділення компонентів за розміром і частково за молекулярною масою. Використання цього методу при освітленні фруктових соків дозволяє видаляти завислі частинки, колоїдні сполуки, пектинові речовини та високомолекулярні комплекси, зберігаючи при цьому низькомолекулярні біологічно цінні компоненти. Завдяки цьому ультрафільтрація розглядається як альтернатива традиційним методам освітлення, таким як ферментативна обробка та фільтрація з використанням кізельгуру чи інших допоміжних матеріалів [1].

Разом із тим, впровадження ультрафільтрації у промислові технології освітлення соків супроводжується низкою невирішених науково-практичних проблем. Однією з ключових є зниження продуктивності мембрани внаслідок розвитку мембранного забруднення (фоулінгу). У процесі фільтрації на поверхні та в порах мембрани накопичуються макромолекули, коло-



їдні частинки, білково-пектинові комплекси, що призводить до зменшення питомого потоку пермеату та зміни селективності мембран. Це ускладнює прогнозування технологічних показників процесу та знижує економічну ефективність виробництва [2].

Складність проблеми посилюється багатокомпонентністю та варіабельністю складу фруктових соків, що залежить від виду сировини, ступеня зрілості плодів, умов переробки та попередньої обробки. Гідродинамічні умови в каналах мембранних модулів, значення трансмембранного тиску, температура, швидкість тангенціального потоку та інші технологічні параметри істотно впливають на інтенсивність масопереносу та характер формування поляризаційного шару. Водночас відсутність узагальнених закономірностей, що описують взаємозв'язок між зазначеними факторами та кінетикою зниження продуктивності, обмежує можливості оптимізації процесу [3].

Незважаючи на наявність численних досліджень у галузі мембранних процесів, питання комплексного аналізу закономірностей ультрафільтрації при освітленні соків з урахуванням селективності мембран, механізмів фоулінгу, гідродинамічних умов та параметрів масопереносу залишаються недостатньо систематизованими. Особливої актуальності набуває розроблення адекватних моделей процесу, що дозволяють б прогнозувати зміну продуктивності мембрани та якісних показників пермеату залежно від режимних параметрів [4].

Таким чином, постає науково-практична проблема встановлення закономірностей ультрафільтрації при освітленні фруктових соків та визначення раціональних напрямів експериментальних досліджень, спрямованих на підвищення ефективності процесу, зниження інтенсивності мембранного забруднення та забезпечення стабільної якості готової продукції. Вирішення цієї проблеми потребує комплексного підходу, що поєднує теоретичний аналіз механізмів масопереносу, експериментальне дослідження впливу технологічних параметрів та моделювання процесу з урахуванням реальних виробничих умов.

Аналіз останніх досліджень. Аналіз сучасних наукових досліджень у сфері ультрафільтрації при освітленні фруктових соків свідчить про зростання інтересу до цього напрямку як з боку науковців, так і з боку виробників харчової продукції [5]. Ультрафільтрація розглядається як одна з найбільш перспективних баромембранних технологій, що дозволяє забезпечити ефективне видалення колоїдних частинок, пектинових речовин, білково-полісахаридних комплексів і механічних домішок без суттєвого впливу на низькомолекулярні біологічно активні компоненти соку. Останні дослідження зосереджені на виявленні закономірностей масопереносу, вивченні механізмів формування концентраційної поляризації, аналізі причин зниження продуктивності мембран та розробленні підходів до моделювання процесу з урахуванням реальних технологічних умов [6].

У наукових роботах останніх років значна увага приділяється дослідженню механізмів масопереносу при ультрафільтрації складних багатокомпонентних систем, до яких належать фруктові соки. Встановлено, що інтенсивність переносу розчинених і дисперсних компонентів визначається не лише характеристиками мембрани, зокрема розміром пор і молекулярно-масовою відсічкою, а й фізико-хімічними властивостями самого соку – в'язкістю, вмістом пектину, ступенем дисперсності частинок, наявністю білково-полісахаридних агрегатів [7]. Дослідники підкреслюють, що в процесі фільтрації поблизу поверхні мембрани формується шар підвищеної концентрації високомолекулярних сполук, який створює додатковий опір масопереносу [8]. Це явище концентраційної поляризації істотно впливає на величину питомого потоку пермеату та зумовлює відхилення реальних показників продуктивності від теоретично розрахованих значень [9].

Особливу увагу приділено дослідженню мембранного забруднення (фоулінгу), яке визнано основним фактором зниження ефективності ультрафільтрації соків. У сучасних роботах фоулінг розглядається як багатостадійний процес, що включає адсорбцію органічних молекул на

поверхні мембрани, закупорювання пор та формування гелеподібного шару. Показано, що пектинові речовини, характерні для фруктових соків, відіграють ключову роль у формуванні стійких структур на поверхні мембрани, які важко піддаються видаленню під час стандартних процедур промивання [10]. Дослідження також свідчать, що білки та фенольні сполуки можуть взаємодіяти між собою, утворюючи комплекси, які додатково ускладнюють процес фільтрації. У зв'язку з цим науковці активно досліджують вплив попередньої ферментативної обробки соку, спрямованої на руйнування пектинових структур, що дозволяє знизити інтенсивність фоулінгу та стабілізувати продуктивність мембрани [11].

Важливим напрямом досліджень є вивчення впливу технологічних параметрів на ефективність процесу. Експериментальні дані підтверджують, що трансмембранний тиск суттєво впливає на величину потоку пермеату, проте залежність має нелінійний характер [12]. На початкових етапах підвищення тиску супроводжується зростанням продуктивності, однак після досягнення певного критичного значення подальше збільшення тиску призводить до ущільнення гелевого шару і прискорення фоулінгу. Аналогічно встановлено, що швидкість тангенціального потоку визначає інтенсивність зсувних напружень на поверхні мембрани, що сприяє частковому руйнуванню поляризаційного шару та зменшенню товщини відкладень. Разом з тим підвищення швидкості потоку пов'язане зі зростанням енергетичних витрат, тому актуальним залишається питання оптимізації гідродинамічних умов [13].

Суттєвий інтерес у сучасних дослідженнях викликає проблема селективності мембран та вибору їх матеріалу. Порівняльні випробування полімерних мембран різного складу показали, що гідрофільність поверхні відіграє важливу роль у зменшенні адсорбції органічних компонентів. Розробляються мембрани з модифікованими поверхнями, нанокompозитні структури та покриття, які покликані зменшити схильність до забруднення. Водночас результати свідчать, що підвищення гідрофільності не завжди гарантує довготривалу стабільність характеристик, оскільки склад соків є змінним і включає широкий спектр компонентів, здатних до взаємодії з матеріалом мембрани.

Окрему групу досліджень становлять роботи, присвячені математичному моделюванню процесу ультрафільтрації. Сучасні підходи передбачають використання як емпіричних залежностей, так і більш складних моделей, що враховують гідродинаміку потоку, дифузійні процеси та кінетику формування забруднюючого шару. Запропоновано моделі, які описують зміну питомого потоку в часі з урахуванням зростання гідравлічного опору мембрани та шару відкладень. Разом з тим наголошується, що універсальної моделі, придатної для різних видів соків і різних мембран, наразі не існує. Це зумовлено складністю фізико-хімічних взаємодій у системі «сік – мембрана» та впливом великої кількості змінних факторів [14].

Аналіз останніх досліджень також демонструє тенденцію до комплексного підходу, коли експериментальні дані поєднуються з методами чисельного моделювання для прогнозування поведінки системи за змінних режимів роботи. Водночас значна частина робіт має прикладний характер і орієнтована на конкретні види соків, що ускладнює формування узагальнених закономірностей. Багато дослідників підкреслюють необхідність подальшого систематичного вивчення впливу складу сировини, гідродинамічних умов та режимних параметрів на селективність мембран, інтенсивність масопереносу та кінетику фоулінгу [15].

Отже, проведений аналіз свідчить, що попри суттєвий прогрес у дослідженні ультрафільтрації при освітленні соків, низка аспектів залишається недостатньо вивченою. Зокрема, потребують уточнення кількісні закономірності взаємозв'язку між технологічними параметрами процесу та динамікою зміни продуктивності мембрани, а також розроблення адаптивних моделей, здатних враховувати багатфакторний характер системи. Це обумовлює необхідність подальших експериментальних досліджень, спрямованих на встановлення узагальнених закономір-



ностей ультрафільтрації та обґрунтування раціональних режимів освітлення фруктових соків у промислових умовах.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою статті є встановлення основних закономірностей ультрафільтрації при освітленні фруктових соків з урахуванням впливу селективності мембран, трансмембранного тиску, гідродинамічних умов та фізико-хімічних властивостей сировини на продуктивність процесу й інтенсивність мембранного забруднення. Для досягнення поставленої мети передбачається проаналізувати сучасні теоретичні та експериментальні підходи, узагальнити наявні наукові дані та визначити пріоритетні напрями подальших експериментальних досліджень і вдосконалення моделювання процесу ультрафільтрації.

Основна частина. Основна частина дослідження присвячена системному аналізу закономірностей ультрафільтрації при освітленні фруктових соків з урахуванням фізико-хімічної природи сировини, характеристик мембран, гідродинамічних умов та технологічних параметрів процесу. Ультрафільтрація як баромембранний процес реалізується під дією трансмембранного тиску, що забезпечує проходження розчинника та низькомолекулярних компонентів через напівпроникну мембрану і затримання високомолекулярних сполук та дисперсних частинок. Однак для багатокомпонентних систем, якими є фруктові соки, механізм розділення суттєво ускладнюється через наявність колоїдних структур, пектинових речовин, білково-полісахаридних комплексів та фенольних сполук, які здатні взаємодіяти між собою та з поверхнею мембрани.

Однією з ключових закономірностей процесу є залежність питомого потоку пермеату від трансмембранного тиску. На початковому етапі фільтрації спостерігається майже лінійна залежність між тиском і продуктивністю, що відповідає класичним уявленням про гідравлічний опір мембрани. Проте зі збільшенням тривалості процесу і концентрації затриманих компонентів поблизу поверхні мембрани формується шар концентраційної поляризації, який створює додатковий опір. У результаті залежність набуває нелінійного характеру, а після досягнення певного критичного тиску подальше його підвищення не забезпечує істотного приросту продуктивності. Більше того, надмірний тиск може сприяти ущільненню гелеподібного шару, що призводить до зниження потоку та посилює мембранне забруднення.

Формування концентраційної поляризації є наслідком дисбалансу між конвективним переносом частинок до поверхні мембрани та їх зворотною дифузією в об'єм потоку. Інтенсивність цього явища визначається коефіцієнтами дифузії компонентів, в'язкістю середовища та гідродинамічними умовами. У випадку соків, що містять значну кількість пектину, спостерігається схильність до утворення в'язкопружних структур, які додатково перешкоджають зворотній дифузії і сприяють накопиченню відкладень. Таким чином, закономірності масопереносу при ультрафільтрації соків не можуть бути адекватно описані без урахування структуроутворення в прикордонному шарі.

Важливим аспектом є селективність мембран, яка визначається їх молекулярно-масовою відсічкою та морфологією пор. Для освітлення соків зазвичай застосовують мембрани з відсічкою в діапазоні, що забезпечує затримання високомолекулярних пектинових і білкових фракцій при збереженні цукрів, органічних кислот і ароматичних компонентів у пермеаті. Разом із тим реальна селективність може відрізнятися від номінальної через часткове закупорювання пор та зміну ефективного діаметра проходів у процесі експлуатації. У міру розвитку фойлінгу спостерігається зменшення проникності та зміна коефіцієнтів затримання, що впливає на стабільність якісних показників освітленого соку.

Мембранне забруднення є багатофакторним явищем, яке включає адсорбційні, колоїдні та гелеві механізми. На початковій стадії фільтрації відбувається швидка адсорбція органічних молекул на внутрішніх стінках пор, що зумовлює зростання гідравлічного опору. Надалі фор-

мується шар відкладень на поверхні мембрани, який поступово ущільнюється під дією тиску. Для фруктових соків характерною є наявність білково-пектинових комплексів, що здатні утворювати просторові сітки з високою водоутримувальною здатністю. Такі структури формують гелеподібний шар, який стає основним джерелом опору масопереносу. Кінетика зниження продуктивності в цьому випадку має виражений часовий характер: після різкого падіння потоку на початку процесу спостерігається відносно повільна стадія стабілізації, що відповідає квазі-стаціонарному стану між накопиченням і зсувним руйнуванням відкладень.

Гідродинамічні умови істотно впливають на інтенсивність формування поляризаційного та гелевого шарів. Використання тангенціального потоку дозволяє створити зсувні напруження на поверхні мембрани, які частково руйнують відкладення та зменшують їх товщину. Зі збільшенням швидкості потоку зростає коефіцієнт масопереносу, що сприяє зниженню концентрації компонентів у прикордонному шарі. Проте надмірне підвищення швидкості пов'язане зі зростанням енергетичних витрат і можливими гідродинамічними коливаннями, що впливають на стабільність процесу. Тому одним із напрямів досліджень є визначення оптимального співвідношення між трансмембранним тиском і швидкістю тангенціального потоку, яке забезпечує максимальну продуктивність за мінімального розвитку фоулінгу.

Температурний фактор також має значення для закономірностей ультрафільтрації. Підвищення температури зменшує в'язкість соку та збільшує коефіцієнти дифузії, що позитивно впливає на інтенсивність масопереносу. Водночас занадто високі температури можуть спричинити денатурацію білків або зміну структури пектину, що потенційно посилює фоулінг. Отже, вибір температурного режиму має враховувати як фізичні, так і хімічні аспекти стабільності системи.

Суттєву роль у формуванні закономірностей процесу відіграє попередня обробка соку. Ферментативний гідроліз пектинових речовин зменшує середню молекулярну масу полімерів і знижує схильність до гелеутворення. Це призводить до зменшення товщини відкладень і підвищення стабільності потоку пермеату. Разом із тим надмірна ферментативна обробка може вплинути на структурні та органолептичні властивості продукту, тому оптимізація цього етапу потребує окремого експериментального обґрунтування.

Математичний опис процесу ультрафільтрації соків ґрунтується на концепції сумарного гідравлічного опору, що включає опір чистої мембрани та опір шару відкладень. У загальному випадку питома продуктивність визначається співвідношенням між рушійною силою (різницею тисків) і сумарним опором системи. Проте для реальних соків необхідно враховувати зміну опору в часі, а також залежність від концентрації та властивостей компонентів. Перспективним є використання динамічних моделей, які дозволяють прогнозувати поведінку системи при зміні режимів роботи, а також застосування методів чисельного моделювання для аналізу розподілу швидкостей і концентрацій у каналах мембранних модулів.

Експериментальні дослідження показують, що стабільність процесу може бути підвищена шляхом комбінування різних технологічних прийомів: оптимізації тиску, регулювання швидкості потоку, періодичного зниження навантаження або впровадження імпульсних режимів. У деяких випадках застосування циклічних змін тиску сприяє частковому руйнуванню гелевого шару та відновленню проникності мембрани. Такі підходи дозволяють продовжити робочий цикл без проведення повного очищення.

Окремим напрямом є дослідження матеріалів мембран та модифікації їх поверхні. Підвищення гідрофільності зменшує адсорбцію гідрофобних компонентів, а створення наноструктурованих поверхонь може впливати на характер взаємодії з колоїдними частинками. Разом із тим довготривала експлуатація мембран у харчових середовищах потребує оцінки їх хімічної та механічної стійкості, що також має враховуватися при визначенні напрямів експериментальних досліджень.

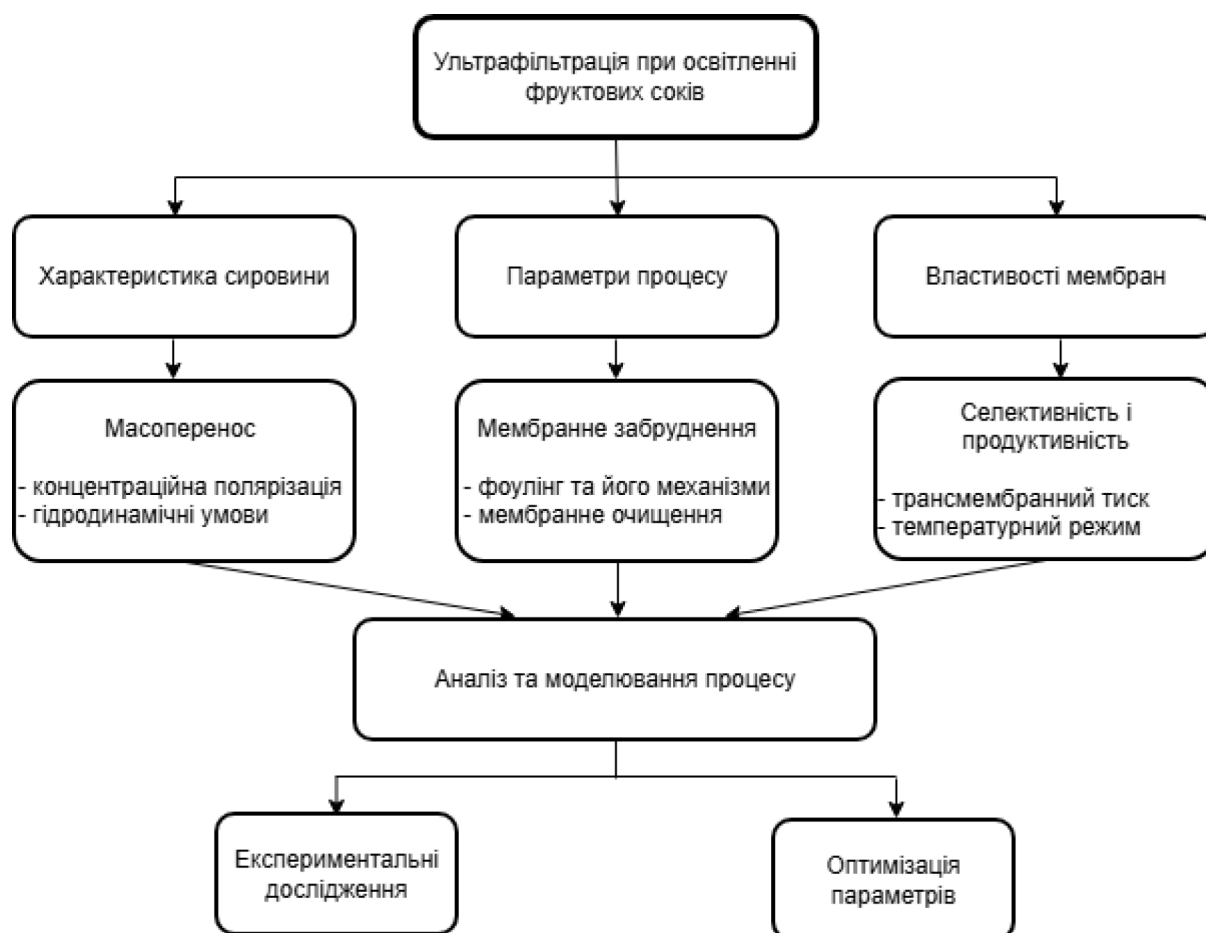


Рис. 1. Блок-схема встановлення закономірностей ультрафільтрації при освітленні фруктових соків та визначення напрямів експериментальних досліджень

На рисунку 1 представлена блок-схема встановлення закономірностей ультрафільтрації при освітленні фруктових соків та визначення напрямів експериментальних досліджень

Схема відображає структурно-логічний взаємозв'язок між основними чинниками, що визначають закономірності ультрафільтрації при освітленні фруктових соків. У ній узагальнено вплив характеристик сировини, параметрів процесу та властивостей мембран на інтенсивність масопереносу, селективність, продуктивність і розвиток мембранного забруднення. Узгодження цих факторів формує основу для аналізу та моделювання процесу, проведення експериментальних досліджень і подальшої оптимізації технологічних параметрів ультрафільтрації.

Аналіз сукупності закономірностей ультрафільтрації при освітленні соків дозволяє сформулювати ключові фактори, що визначають ефективність процесу: фізико-хімічний склад соку, характеристики мембрани, трансмембранний тиск, швидкість тангенціального потоку, температура та тривалість фільтрації. Їх взаємодія має нелінійний характер, що ускладнює пряме масштабування лабораторних результатів на промислові умови. У зв'язку з цим актуальним є проведення комплексних експериментальних досліджень із варіюванням кількох параметрів одночасно та використанням методів математичного планування експерименту.

Таким чином, встановлення закономірностей ультрафільтрації при освітленні фруктових соків потребує поєднання експериментального аналізу, теоретичного узагальнення та моделювання процесу. Глибоке розуміння механізмів масопереносу та фоулінгу дозволить обґрунтувати раціональні режими роботи мембранних установок, підвищити їх продуктивність і забезпечити стабільну якість готового продукту. Подальші дослідження мають бути спрямовані на

кількісну оцінку впливу окремих факторів і розроблення інтегрованих підходів до оптимізації технологічних параметрів ультрафільтрації в умовах реального виробництва.

Висновки. Проведений аналіз закономірностей ультрафільтрації при освітленні фруктових соків засвідчив, що ефективність процесу визначається комплексною взаємодією фізико-хімічних властивостей сировини, характеристик мембрани та технологічних параметрів, зокрема трансмембранного тиску і гідродинамічних умов. Встановлено, що ключовими факторами зниження продуктивності є концентраційна поляризація та мембранне забруднення, механізми яких мають багатофакторний характер. Обґрунтовано доцільність поєднання експериментальних досліджень і математичного моделювання для прогнозування поведінки системи та визначення раціональних режимів роботи. Отримані узагальнення створюють підґрунтя для подальшої оптимізації процесу ультрафільтрації у промислових умовах.

Список використаних джерел

1. Bhattacharjee C., Saxena V. K., Dutta S. Fruit juice processing using membrane technology: a review. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2017. 43, 136–153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.08.002>
2. Lu C., Bao Y., Huang J. Y. Fouling in membrane filtration for juice processing. *Current Opinion in Food Science*. 2021. 42, 76–85. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.05.004>
3. Li F., Yan H., Li W., Zhao J., Ming J. A comparative study of the effects of ultrafiltration membranes and storage on mulberry juice. *Journal of Food Science*. 2019. 84(12), 3565–3572. DOI: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14935>
4. Deinychenko G., Dmytrevskiy D., Honchar D., Piddubnyi O., Lavreniuk V. Technical review and intellectual property aspects of innovative membrane technologies in juice production. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі* : зб. наук. пр. Харків : ДБТУ, 2025. – Вип. 1 (37). С. 164–173. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.18154526>
5. Bhattacharjee C., Saxena V. K., Dutta S. Watermelon juice concentration using ultrafiltration: analysis of sugar and vitamin C. *Food Science and Technology International*. 2017. 23(7), 637–645. DOI: <https://doi.org/10.1111/jifs.12345>
6. Gulec H. A., Bagci P. O., Bagci U. Clarification of apple juice using polymeric ultrafiltration membranes: membrane fouling and juice quality. *Food and Bioprocess Technology*. 2017. 10(5), 875–885. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-017-1871-x>
7. Deynichenko G., Guzenko V., Dmytrevskiy D., Chervonyi V., Kolisnichenko T., Omelchenko O., Nykyforov, R. Study of the new method to intensify the process of extraction of beet pulp. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. 4(11–94), 15–20. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.140126>
8. De Bruijn, J., Bórquez R. Analysis of fouling mechanisms during cross-flow ultrafiltration of apple juice. *LWT – Food Science and Technology*. 2006. 39(8), 861–871. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2005.06.014>
9. Echavarría A. P., Torras C., Pagán J., Ibarz, A. Fruit juice processing and membrane technology application. *Food Engineering Reviews*. 2011. 3(3), 136–158. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12393-011-9042-8>
10. Fukumoto L. R., Delaquis P., Girard B. Microfiltration and ultrafiltration ceramic membranes for apple juice clarification. *Journal of Food Science*. 1998. 63(5), 845–850. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1998.tb17912.x>
11. Deynichenko G., Dmytrevskiy D., Guzenko V., Omelchenko O., Perekrest V. Prospects of using equipment for membrane separation of food liquids. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання / ТДАТУ*; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. – Запоріжжя : ТДАТУ, 2023. Вип. 13, том 2. С. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2023-2-12>
12. Ortega-Rivas A., et al. Effect of membrane pore size on quality of ultrafiltered apple juice. *International Journal of Food Science & Technology*. 2001. 36(6), 663–670. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2001.00663.x>
13. Deynichenko G., Dmytrevskiy D., Honchar D., Chervonyi V., Horielkov D. Review and analysis of membrane juice processing in food industry enterprises. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання / ТДАТУ*; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. Запоріжжя : ТДАТУ, 2025. Вип. 25, т. 2. С. 148–156. DOI: <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-18>

14. Katibi K. K., Mohd Nor N., Yunus K. F. Strategies to enhance membrane processing for fruit juice clarification. *Membranes*. 2023. 13(7), 679. DOI: <https://doi.org/10.3390/membranes13070679>
15. Deynichenko G., Dmytrevskiy D., Honchar D., Piddubnyi O., Lavreniuk V. Increasing the efficiency of the membrane filtration process in the production of fruit and berry juices. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання / ТДАТУ*; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. Запоріжжя : ТДАТУ, 2025. Вип. 15, том 2. С. 10–16. DOI: <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-1>
16. Girard B., Fukumoto L. R. Membrane processing of fruit juices and beverages: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2000. 40(2), 91–157. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408690091189293>
17. Deynichenko G., Dmytrevskiy D., Honchar D. Membrane processing of apple juice as an innovative direction in the food industry. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання / ТДАТУ*; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. – Запоріжжя : ТДАТУ, 2025. Вип. 25, т. 3. С. 190–197. DOI: <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-3-25>

Дата першого надходження статті до видання: 26.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



G. Deynichenko¹, D. Dmytrevskiy^{1,2}, D. Honchar¹, V. Lavreniuk¹

¹ State Biotechnological University, Kharkiv

² Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

ANALYSIS OF ULTRAFILTRATION PATTERNS DURING JUICE ILLUMINATION AND DETERMINATION OF DIRECTIONS FOR EXPERIMENTAL RESEARCH

Summary

The article is devoted to the analysis of ultrafiltration regularities in the clarification of fruit juices with special attention to the influence of membrane selectivity, transmembrane pressure, hydrodynamic conditions and physicochemical properties of raw materials on process efficiency. Ultrafiltration is considered one of the most promising membrane technologies for juice clarification, enabling the removal of colloidal particles, pectic substances and high-molecular compounds while preserving valuable low-molecular components. However, practical implementation of the process is complicated by phenomena of concentration polarization and membrane fouling, which lead to a gradual decrease in permeate flux and changes in membrane selectivity. The study summarizes modern scientific approaches to describing mass transfer mechanisms and modeling ultrafiltration processes. It is shown that the formation of a polarization layer near the membrane surface creates additional resistance to mass transfer, and its thickness depends on hydrodynamic conditions and the composition of the juice. High concentrations of pectin and protein-polysaccharide complexes promote the formation of gel-like structures that intensify fouling and reduce productivity. Transmembrane pressure has a nonlinear effect on permeate flux: an initial increase in pressure enhances productivity, whereas further growth leads to compaction of the fouling layer and stabilization or even reduction of the flux. The influence of temperature, tangential flow velocity and membrane material properties on process stability is also considered. The necessity of combining experimental studies with mathematical modeling is substantiated to predict process behavior and determine optimal operating regimes. Directions for further research include quantitative evaluation of the impact of individual technological parameters, development of adaptive models that account for the multifactor nature of ultrafiltration, and experimental validation of optimal operating conditions. The obtained results can be applied to improve membrane technologies in the food industry, increase the efficiency of juice clarification and ensure stable product quality in industrial production.

Keywords: ultrafiltration, juice clarification, membrane processes, fruit juices, membrane selectivity, transmembrane pressure, membrane performance, membrane fouling, hydrodynamic conditions, technological parameters.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-4>

УДК 665.335.2:519.6

Д. П. Журавель¹, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-6100-895X

В. В. Дідур², д-р техн. наук

ORCID: 0000-0001-7584-5073

Я. В. Білоконь³, аспірант

ORCID: 0009-0003-4510-2780

¹ Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного² Уманський національний університет³ Полтавський державний аграрний університет

e-mail: didur.vv@gmail.com

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ МЕХАНІЧНОГО ВИЛУЧЕННЯ ОЛІЇ З НАСІННЯ РИЦИНИ

Анотація. У статті розглянуто питання оцінювання математичної моделі процесу механічного вилучення олії з насіння рицини. Дослідження проводились з використанням теорії консолідації пористих середовищ та закону фільтрації рідин, а визначення можливостей її застосування для пресів безперервної дії. Експериментальні випробування проводилися з використанням переривчастого та безперервного механічних пресів при різних температурних і силових режимів. У ході роботи встановлено, що проникність твердої структури насіння істотно впливає на ефективність екстракції, а підвищення температури сприяє інтенсифікації процесу завдяки зменшенню в'язкості олії.

Ключові слова: математична модель, насіння рицини, механічне пресування, екстракція, фільтрації рідин, консолідація пористих середовищ.

Постановка проблеми. Механічне пресування залишається одним із найбільш поширених способів отримання рослинної олії, проте його ефективність часто обмежується значними втратами продукту в макусі та недостатньою оптимізацією режимів роботи обладнання. Попри наявність численних досліджень, спрямованих на вдосконалення геометрії пресів, параметрів процесу та попередньої підготовки сировини, значна частина цих підходів базується переважно на емпіричних даних, а не на глибокому теоретичному аналізі фізичних явищ, що супроводжують екстракцію. Сучасні математичні моделі, побудовані із використанням теорії консолідації та законів руху рідин у пористих середовищах, потребують додаткової перевірки щодо їх відповідності реальним умовам роботи пресового обладнання. У зв'язку з цим виникає наукова задача оцінювання адекватності таких моделей і визначення можливості їх застосування для прогнозування продуктивності пресів безперервної дії, що є важливим кроком до підвищення економічної ефективності виробництва рослинної олії.

Аналіз останніх досліджень. Процес вилучення олії з насіння рицини може реалізовуватися двома основними способами: механічним пресуванням або хімічною екстракцією із застосуванням розчинників. Механічний метод характеризується відносною простотою технологічної організації порівняно з розчинниковим, однак поступається йому за рівнем вилучення олії через наявність її залишків у твердому шроті [1–5].

З метою підвищення результативності пресування було проведено значну кількість досліджень [6–10]. У більшості випадків увага зосереджувалася на трьох ключових напрямках: удосконаленні технологічних режимів роботи обладнання, оптимізації конструктивних параметрів пресів, а також застосуванні попередньої підготовки насіннєвої сировини.

Водночас чимало наукових робіт базуються переважно на практичних підходах і емпіричних спостереженнях, що часто спираються на досвід та інтуїтивні рішення, а не на комплексне теоретичне обґрунтування фізичних процесів, які супроводжують екстракцію [11–14].

Протягом останніх п'ятнадцяти років з'явилися дослідження, присвячені створенню імітаційних моделей вилучення олії з різних видів насіння [15–18]. Теоретичною основою частини таких моделей стало поєднання положень теорії консолідації насичених середовищ, запропонованої К. Терцагі у 1943 році, та закону Дарсі, що описує рух рідин крізь пористі структури [19–21].

Разом із тим окремі припущення цих моделей не повністю узгоджуються з реальною поведінкою матеріалу під час пресування. З урахуванням цього Баргале та його колеги розробили математичний опис процесу, спрямований на зменшення розбіжностей між теоретичними розрахунками та фактичними явищами. Запропонована модель містить низку математичних залежностей, що дозволяють точніше відобразити процес механічного вилучення рослинної олії [22, 23].

Формулювання мети статті. Метою даного дослідження стало відтворення експерименту Баргале для насіння рицини із застосуванням механічного преса переривчастого типу.

Основна частина. Після впровадження математичного апарату результати моделювання було адаптовано до умов роботи преса безперервної дії, конструктивно подібного до промислових установок більшої потужності. Передбачається, що використання такої моделі може сприяти вдосконаленню конструкції обладнання та підвищенню його продуктивності.

Для проведення експериментальних досліджень було обрано високоолійний сорт насіння рицини. Отримані результати є складовою ширших досліджень, спрямованих на оцінювання перспектив формування енергетичного ланцюга виробництва рицинової олії в аграрному секторі. У цьому контексті механічна екстракція розглядається як важливий етап отримання продукту, що може використовуватися як паливо для електрогенераторів або як сировина для виробництва біодизеля.

Варто зазначити, що економічна доцільність усього виробничого циклу значною мірою визначається рівнем продуктивності обладнання та ефективністю процесу вилучення олії.

Основне припущення даного експериментального дослідження полягає в тому, що під час механічного вилучення олії процес ущільнення насіння за своєю природою подібний до консолідації однорідних насичених ґрунтів, які перебувають під дією аналогічного механічного навантаження. У низці експериментальних досліджень [1, 2] Баргейл продемонстрував перспективні результати, використовуючи цей підхід для аналізу періодичного процесу екстракції олійної сировини.

Механізми, що визначають функціонування такої системи, описуються положеннями теорії Терцагі. Відповідно до неї, у разі прикладання стискального зусилля до насиченого середовища з невисокою проникністю спостерігається різке підвищення тиску рідини в поровому просторі. Надалі цей тиск поступово зменшується, що пояснюється витісненням рідини через пористу структуру матеріалу [3].

Крім того, теорія передбачає, що коливання порового тиску прямо пов'язані зі зміною гідравлічного градієнта, тобто є пропорційними до нього [1,2,10]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c \frac{\partial u^2}{\partial z^2}, \quad (1)$$

де u – тиск рідини в межах ущільненого середовища;

z – координата або глибина розташування шару матеріалу;

t – тривалість дії стискального навантаження;

c – коефіцієнт консолідації ущільненого середовища, який визначається за наступним співвідношенням:



$$c = \frac{k}{m_v \rho_f}, \quad (2)$$

де ρ_f – питома густина олії;

m_v – коефіцієнт об'ємної деформації матеріалу;

k – коефіцієнт проникності пористого середовища, що визначається за відповідною залежністю:

$$k = \frac{QH}{\Delta h A_d}, \quad (3)$$

де Q – інтенсивність фільтрації рідини, тобто її витрата крізь пористе середовище;

H – висота шару матеріалу;

Δh – перепад тиску під час проходження рідини через середовище;

A_d – ефективна площа дренажування.

Водночас коефіцієнт об'ємної зміни m_v визначається за такою залежністю:

$$m_v = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dU} = -\frac{1}{H} \frac{dH}{dU} = \frac{d\varepsilon_z}{d\sigma_z}, \quad (4)$$

де V – об'єм досліджуваного зразка;

dU – приріст прикладеного тиску;

$d\varepsilon_z$ – зміна вертикальної деформації за умов одновісного стискання;

$d\sigma_z$ – приріст вертикального напруження, що виникає під час одновісного навантаження.

Окремі положення теорії Терцагі щодо консолідації ґрунтів можуть бути застосовані до насіннєвого матеріалу лише з певними обмеженнями. Зокрема, у процесі стискання насіння початкові деформації зумовлені передусім структурною перебудовою твердого каркаса та видаленням повітря з міжзернового простору [1].

Отже, припущення про повністю насичену систему, яка характеризується наявністю лише рідкої фази, стає справедливим лише після початкового етапу ущільнення, коли олія заповнює порожнини, що утворилися внаслідок витіснення повітря.

Рух рідини крізь пористу структуру, а відповідно і процес екстракції олії з насіння, описується законом Дарсі:

$$q = \frac{Q}{A_o} = \frac{k}{\rho_f} \frac{\partial u}{\partial z}, \quad (5)$$

де q – інтенсивність потоку рідини;

$\partial u / \partial z$ – гідравлічний градієнт, що характеризує зміну тиску по глибині середовища [2, 9].

У результаті теоретичних узагальнень і послідовних математичних перетворень [2] було отримано залежність, яка дає змогу оцінити об'єм олії (Ves), що виділяється під час екстракції в установці з циліндричною камерою. У такій системі стискання насіння здійснюється поршнем, який створює зовнішній тиск U :

$$Ves(f) = B_0 \left(\int_0^k k(t) e^{-\partial_p f} dt \right), \quad (6)$$

в якому:

$$B_0 = \frac{2A_o U}{\rho_f H}; \quad (7)$$

$$B_1 = \left(\frac{\pi}{2H} \right)^2, \quad (8)$$

де B_0 та B_1 стали коефіцієнти. Варто підкреслити, що у своїх розрахунках Баргейл застосовує довільно задане та змінне значення нижньої межі інтегрування часу (t_{int}).

Визначення об'єму видобутої олії відповідно до рівняння (6) потребує аналізу часової зміни параметрів k і c . У процесі екстракції їх варіації зумовлені передусім трансформацією структури твердого каркаса матеріалу, що відбувається під впливом стискального навантаження.

Експериментальні дослідження виконувалися із застосуванням двох типів механічного обладнання для вилучення олії з насіння олійних культур. На першому етапі використовувався прес періодичної дії, за допомогою якого здійснювалися вимірювання з метою визначення основних фізичних параметрів сировини – k , c , m_v та ρ_s , що надалі були використані під час побудови математичної моделі.

На наступному етапі розроблену модель апробували на пресі безперервного типу, який також був залучений до експериментальної програми. Для всіх випробувань застосовували насіння рідини високооїйного сорту з масовою часткою олії 41,3 %. Вологість дослідного матеріалу підтримувалася в межах 5–6 %, що забезпечувало стабільність умов проведення експерименту.

Переривчастий механічний прес. Установка періодичної екстракції представлена механічним пресом, обладнаним горизонтально розташованою циліндричною камерою, в межах якої переміщуються два поршні, встановлені назустріч один одному (рис. 1). Їх робота забезпечувалась подачею робочої рідини під тиском у гідравлічній системі. Керування процесом здійснювалось через панель управління, яка контролює функціонування поршневого насоса, який приводився в рух електродвигуном потужністю 3 кВт.

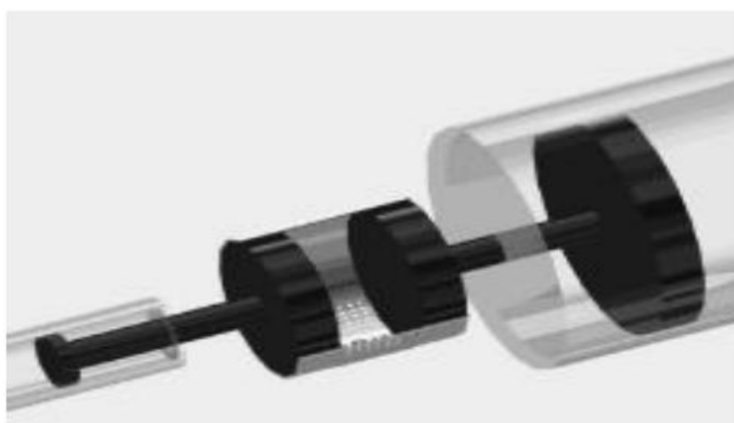


Рис. 1. Поздовжній переріз механічного преса періодичної дії

Камера пресування, з якої відводилась отримана олія, відповідав діаметру 120 мм та довжині 60 мм. На її зовнішній поверхні передбачено систему отворів для дренажування, розміщених лінійно, при цьому сумарна площа відведення рідини (A_d) становила 22 608 мм². У процесі стискання ефективна площа зливу змінювалась, оскільки вона залежить від відстані між поршнями. Тому під час моделювання використовувались усереднені значення площі, визначені між початковим положенням поршнів із максимальною дистанцією та кінцевим станом, коли вона є мінімальною. Граничний тиск, що передається на насіння в межах камери пресування, може досягати 45 МПа.

Контроль тиску здійснювався за допомогою високоточного манометра, інтегрованого в гідравлічну систему преса. Для реєстрації переміщення поршнів використовувався ноніус із точністю вимірювання 0,1 мм, встановлений на бічній частині обладнання паралельно їхнім штокам.

Завантаження насіння до зони пресування відбувалось через приймальну лійку, після чого матеріал розміщувався у просторі між двома поршнями. Кожен із них приводився в дію автономно через систему керування, розташовану на приладовій панелі.

Під камерою стискання передбачено похилу площину для відведення отриманої олії, яка спрямовується до спеціальної ємності, де здійснюється її подальше зважування.

Механічний прес безперервної дії. Прес безперервної дії, що застосовувався під час дослідження, є зменшеною моделлю промислових установок і відтворює їх конструктивні особливості та принцип функціонування. В склад агрегату входять електродвигун потужністю 4 кВт, ремінна передача зі шківками, корпус із вбудованою камерою пресування, а також вузли для відведення твердого залишку та збирання отриманої олії.

Середня продуктивність обладнання при переробці насіння ріпички становить приблизно 46,2 кг/год. Сировина подавалась до невеликого завантажувального бункера, під яким розміщено шнековий транспортер із кроком (f) 30 мм, що забезпечує її поступове переміщення в зону стискання.

Паралельно до шнека встановлено вісім сталевих напрямних довжиною по 200 мм, розташованих циліндрично та вмонтованих у чавунний корпус. На одному кінці шнека передбачено кривошипний механізм, тоді як на протилежному закріплена стальна пресувальна головка обтічної форми, яка обертається всередині циліндричної камери.

Проміжок між пресувальною головкою та внутрішньою поверхнею камери формує зону стискання діаметром 70 мм і довжиною 120 мм. Обертання кривошипа спричиняє осьове переміщення шнека, що, своєю чергою, змінює положення пресувальної головки в камері. Завдяки наявності нерухомого кільцевого упора в кінцевій частині камери відбувається поступове зменшення її робочого об'єму, що супроводжується зростанням тиску на насіння (рис. 2).

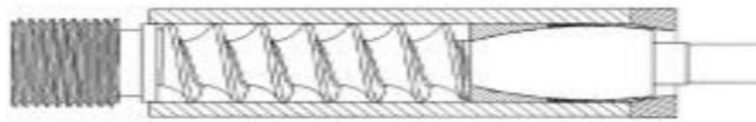


Рис. 2. Поздовжній переріз механічного пресу безперервного типу

Процес ущільнення розпочинається тоді, коли зазор між головкою та стінкою камери стає меншим за середню товщину насінин ріпички. У міру переміщення матеріалу вздовж пресувальної головки тверда структура додатково ущільнюється, досягаючи кінцевої товщини близько 1,5 мм.

З урахуванням того, що довжина ділянки камери, де безпосередньо відбувається стискання (l_c), дорівнює 28,2 мм, а частота обертання шнека (v_{rc}) становить 2 об/хв, можна визначити середню тривалість стиснення насіння (t_{cp}):

$$t_{cp} = \frac{l_c}{v_{rc}} = \frac{l_c}{v_{rc} \cdot f}, \quad (9)$$

де v_{lc} – лінійна швидкість переміщення шнека, що фактично відповідає швидкості транспортування насіння через пресову установку. Використовуючи значення зазначених параметрів, середній час перебування матеріалу в зоні стискання (t_{cp}) можна оцінити приблизно у 0,47 с.

Виділена олія відводиться через торцеві дренажні канали камери пресування, після чого проходить очищення крізь систему послідовно розташованих металевих сіток. Далі продукт надходить до приймальної ємності, де здійснюється його зважування. Твердий залишок виводиться з протилежної частини агрегату, переміщується похилою металевою поверхнею та накопичується у спеціальному контейнері.

Конструкція преса передбачає наявність підігрівальної системи на основі електричних нагрівальних елементів, робота яких контролюється термостатом. Нагрівальний контур охоплює шнек і камеру стискання, забезпечуючи необхідний температурний режим процесу.



У міру переміщення пресувальної головки вздовж внутрішньої поверхні камери відбувається поступове підвищення тиску на насіннєвий матеріал. Така особливість конструкції ускладнює безпосереднє вимірювання цього параметра під час роботи обладнання. У зв'язку з цим величину тиску екстракції визначали опосередковано – шляхом порівняльного аналізу ефективності роботи преса періодичної дії, де тиск фіксується високоточним манометром, та преса безперервного типу.

Отже, було прийнято припущення, що за однакових значень ефективності екстракції (η_e), яка визначається відношенням маси отриманої олії до маси завантаженої сировини, середній тиск, створюваний обома установками, можна вважати еквівалентним. Такий параметр отримав назву еквівалентного тиску екстракції (U_{eq}).

Випробування екстракції на переривчастому механічному пресі. Фізичні характеристики матеріалу, що враховувались під час математичного моделювання процесу вилучення олії (k , c , m_v , ρ_f), були визначені на основі спеціалізованих вимірювань, виконаних у ході експериментів із використанням преса періодичної дії.

Експериментальна програма передбачала поєднання двох температурних режимів екстракції ($T_1 = 30^\circ\text{C}$ та $T_2 = 60^\circ\text{C}$) із трьома рівнями прикладеного тиску ($U_1 = 250$ бар, $U_2 = 350$ бар, $U_3 = 450$ бар). У результаті було сформовано шість варіантів умов проведення досліджень.

У кожному експерименті застосовували зразок насіння масою (S_m) 300 г, що відповідало робочому об'єму камери пресування. Після завантаження матеріалу за допомогою ноніуса визначали початкову висоту шару (H_i). Процес екстракції здійснювали за трьох значень тривалості стискання (t_{cp}) – 5, 10 і 20 секунд – із п'ятиразовим повторенням для кожного режиму. Після завершення заданого інтервалу поршень розвантажували, і виділена олія протягом кількох хвилин відводилася через дренажну систему в розташовану нижче приймальну ємність.

Перед початком кожної серії дослідів прес виводили на номінальний робочий режим шляхом виконання кількох попередніх циклів екстракції. Додаткові випробування дали змогу встановити оптимальну швидкість відведення олії, перевищення якої не призводило до помітного збільшення об'єму зібраного продукту. Саме цей часовий інтервал було прийнято, як стандартний для всіх експериментів.

Зміна коефіцієнта проникності k часі, відповідно до даних Баргейла [1], визначалася для кожного повторення з використанням співвідношення (10), отриманого на основі залежності (3):

$$k(t) = \frac{V_0}{t_{cp}} \frac{H_t}{\Delta h A_{cf}}, \quad (10)$$

де Δh відповідає тиску екстракції (U_e), який визначався з урахуванням густини олії, а V_0 – об'єм олії, отриманої з преса періодичної дії протягом інтервалу стискання t_{cp} .

Після цього для кожного режиму експерименту обчислювали усереднені значення коефіцієнта проникності k , використовуючи результати окремих повторень. Подібним чином в межах тих самих досліджень визначали параметри, необхідні для розрахунку середнього коефіцієнта об'ємної деформації m_v . Його значення встановлювали відповідно до залежності (11), отриманої на основі співвідношення (4):

$$m_v = \frac{H_i - H_f}{H_i \cdot U_e}, \quad (11)$$

де H_f – кінцева товщина шару залишкового шроту насіння ріпичи після завершення процесу стискання.

Густину олії (ρ_f) визначали експериментально із застосуванням пікнометра. Параметр, необхідний для подальших розрахунків у математичній моделі, встановлювали як середні арифме-

тичні значення ρ_f , які отримали під час вимірювань зразків, відібраних у кожному повторенні експерименту.

Випробування екстракції на безперервному механічному пресі. Ключовим показником ефективності роботи преса безперервної дії є вихід екстракції (η_e), що визначається як відношення маси отриманої олії (O_e) до маси насіннєвої сировини (S_m), поданої на переробку:

$$\eta_e = \frac{O_e}{S_m}. \quad (12)$$

Для встановлення значення виходу екстракції (η_e) було виконано п'ять експериментальних досліджень, у кожному з яких використовували по 100 кг насіння соняшнику з масовою часткою олії 41,3 %. У процесі випробувань масу переробленої сировини, отриманої олії та залишкової макухи визначали за допомогою високоточних ваг із похибкою вимірювання 0,5 г.

Додатково фіксували тривалість екстракційного процесу, а температуру олії на виході з камери пресування безперервно контролювали за допомогою термопари. На основі співвідношення між масою отриманої олії (O_e) та відповідним часом екстракції (t_e) обчислювали продуктивність преса за олією (p_{ro}) упродовж кожного експерименту:

$$p_{ro} = \frac{O_e}{t_e}. \quad (13)$$

Застосування моделі. Математичний розв'язок рівняння (6), що дозволяє оцінити об'єм олії (V_{es}), отриманої в процесі стискання, базується на встановленні функціональних залежностей, які описують часову зміну фізичних характеристик матеріалу – $k(t)$ та $c(t)$.

Функцію $k(t)$ для різних поєднань температурних і силових режимів визначали методом нелінійного регресійного аналізу середніх значень коефіцієнта проникності k , отриманих під час експериментів із використанням преса періодичної дії за різних значень t_{cp} .

Обробку експериментальних даних виконували із застосуванням програмного пакета Tablecurve® 2D for Windows, при цьому враховували математичні моделі, запропоновані у попередніх дослідженнях [1,2]. У результаті залежність $k(t)$ було подано у вигляді такої функції:

$$\left(\frac{1}{k}\right) = k_0 + k_1 t^2. \quad (14)$$

Для обчислення функції $c(t)$ застосовували залежність (2), використовуючи відомі значення густини олії ρ_f та коефіцієнта об'ємної деформації m_v , який в межах даного дослідження приймався сталим параметром [1]. Таким чином, функціональну залежність $c(t)$ можна подати у вигляді:

$$\frac{1}{c} = c_0 + c_1 t^2,$$

в якому

$$c_0 = k_0 \rho_f m_v;$$

$$c_1 = k_1 \rho_f m_v.$$

На завершальному етапі коефіцієнти B_0 та B_1 визначали на основі співвідношень (7) і (8), після чого отримані значення підставляли у рівняння (6). Чисельне розв'язання цього рівняння здійснювали методом Рунге–Кутти четвертого порядку, реалізованим у програмному середовищі MATLAB.

Використання розробленої моделі дає змогу прогнозувати об'єм олії (V_{es}), що може бути отриманий із заданої маси насіння ріцини під час екстракції в камері стискання.

Ефективність екстракції, визначену за результатами моделювання (η_{es}), обчислювали відповідно до формули (15), де g – прискорення вільного падіння.

$$\eta_{es} = \frac{V_{cs} \cdot \rho_f}{g \cdot S_{es}} = \frac{O_{es}}{S_{es}}. \quad (15)$$

З метою визначення розбіжностей між експериментальними даними та результатами моделювання виконували порівняльний аналіз середнього значення O_e із величиною O_{es} , що відображає об'єм олії, розрахований теоретично з урахуванням часу стискання t_{cp} .

Для кількісної оцінки точності прогнозу використовували показник відносної похибки (E_p), який обчислювали відповідно до залежності (16):

$$E_p = \frac{(O_{es} - O_e)}{O_{es}} \cdot 100. \quad (16)$$

Аналіз значень E_p дає можливість оцінити адекватність математичної моделі щодо відтворення показників продуктивності преса періодичної дії та визначити ступінь узгодженості розрахункових результатів із фактичними експлуатаційними даними.

Прогнозування продуктивності преса безперервної дії. Використання рівняння (9) в межах математичної моделі (6) дає змогу прогнозувати інтенсивність екстракції та продуктивність безперервного преса за олією залежно від частоти обертання шнека та робочих характеристик обладнання. Під час адаптації моделі до умов роботи преса безперервного типу було прийнято значення $Ad = 6200 \text{ м}^2$, що відповідає ділянці внутрішньої поверхні камери стискання, де зазор між стінкою та пресувальною головкою змінюється від 3,2 мм до 1,5 мм, тобто між H_i та H_f відповідно.

Для визначення еквівалентного тиску екстракції (U_{eq}) встановлювали функціональний зв'язок між тиском пресування (U_e), тривалістю стискання (t_{cp}) та ефективністю екстракції (η_e), отриманими під час експериментів на пресі безперервної дії. У розрахунках використовували дані, що відповідають температурному режиму T_2 , який характеризує типовий робочий стан обладнання.

Математичну обробку результатів виконували методом регресійного аналізу із застосуванням програмного пакета Tablecurve3D. Із набору можливих аналітичних залежностей обирали ту, що забезпечувала найбільше значення коефіцієнта детермінації.

Після встановлення математичної залежності між зазначеними параметрами та підстановки значень t_{cp} і η_e , характерних для преса безперервної дії, було визначено величину еквівалентного тиску U_{eq} .

Для побудови функції $k(t)$ у рівнянні тиску застосовували раніше описаний підхід, заснований на нелінійній регресії середніх значень коефіцієнта проникності k для різних значень t_{cp} . Оскільки пряме вимірювання тиску на пресі безперервного типу для значень, що дорівнюють U_{eq} , було неможливим, параметр k визначали опосередковано, використовуючи залежності виду $k(U_e)$. Такі функції формували окремо для кожного значення t_{cp} за допомогою програмного забезпечення Tablecurve 2D, спираючись на дані, отримані при тисках U_1 , U_2 та U_3 . Для подальшого аналізу обирали криву з максимальним коефіцієнтом детермінації R^2 серед рівнянь простого типу.

Отримані функції $k(U_e)$ дали змогу визначити значення k при еквівалентному тиску, після чого було сформовано залежність $k(t)$ для U_{eq} , використовуючи ті самі критерії оцінювання.

Підставивши U_{eq} у модель (6), застосувавши функції $k(t)$ та $c(t)$ і врахувавши інші необхідні параметри, стало можливим розрахувати об'єм олії (O_{es}), отриманої на безперервному пресі протягом часу стискання t_{cp} .

Визначення O_{es} виконували для двох різних значень початкового часу інтегрування (t_{int}). Аналогічно до досліджень із використанням преса періодичної дії, надійність моделі оціню-

вали за показником похибки прогнозування (E_p), який обчислювали відповідно до залежності (16) для заданих значень t_{cp} .

Час стискання t_{cp} безпосередньо залежить від швидкості обертання шнекового транспортера (9), що, своєю чергою, визначає рівень продуктивності преса.

$$p_{ro} = v_{rc} \cdot f \cdot m_s \cdot \eta_e, \quad (17)$$

де m_s – маса насіння рицини, що припадає на одиницю довжини шнекового транспортера та піддається переробці. Значення цього показника визначали на основі співвідношення продуктивності преса (p_{rs}) до лінійної швидкості переміщення шнека (v_{lc}); при цьому параметр m_s розглядається як одна з конструктивно-експлуатаційних характеристик обладнання.

Зокрема:

$$m_s = \frac{p_{ex}}{v_{ls}} = \frac{46\,200}{3600 \cdot 60} = 0,21 \text{ г} \cdot \text{мм}^{-1}. \quad (18)$$

Інтегрування співвідношень (17) і (18) дає змогу визначити залежність продуктивності преса від швидкості обертання шнека. На основі отриманих аналітичних залежностей було сформовано прогнозну модель продуктивності обладнання з урахуванням початкового часу інтегрування (t_{int}), значення якого забезпечує мінімізацію похибки прогнозування (E_p) і тому приймається як оптимальний параметр у межах математичної моделі.

Визначення фізичних параметрів матеріалу. Експериментальні дані, отримані під час роботи безперервного преса, становлять основу для застосування прогностичної моделі вилучення олії з насіння. Показники, встановлені на початковому етапі дослідження, відображають характерні фізичні властивості матеріалу в заданих умовах стискання під час екстракційного процесу.

Відповідно до методики, у таблиці 1 подано усереднені значення коефіцієнта проникності k , визначені для різних режимів проведення екстракції.

Таблиця 1

Усереднені значення коефіцієнта проникності k залежно від тривалості стискання, тиску та температури

Час стискання t_{cp} , с	Температура, T_2 , °C			Температура, T_2 , °C		
	Тиск, U_1 , бар	Тиск, U_2 , бар	Тиск, U_3 , бар	Тиск, U_1 , бар	Тиск, U_2 , бар	Тиск, U_3 , бар
	Коефіцієнт проникності км/с			Коефіцієнт проникності км/с		
5	$3,2 \cdot 10^{-9}$	$1,2 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-9}$	$5,7 \cdot 10^{-9}$	$3,5 \cdot 10^{-9}$	$3,8 \cdot 10^{-9}$
10	$1,7 \cdot 10^{-9}$	$9,6 \cdot 10^{-9}$	$1,2 \cdot 10^{-9}$	$3,8 \cdot 10^{-9}$	$2,4 \cdot 10^{-9}$	$2,4 \cdot 10^{-9}$
20	$1,5 \cdot 10^{-9}$	$8,3 \cdot 10^{-9}$	$9,2 \cdot 10^{-9}$	$2,1 \cdot 10^{-9}$	$1,4 \cdot 10^{-9}$	$1,4 \cdot 10^{-9}$

Отримані результати свідчать про зменшення коефіцієнта проникності k зі збільшенням часу стискання (t_{cp}). Зокрема, підвищення t_{cp} з 5 до 10 с супроводжується зниженням цього показника приблизно на 40–45 %, тоді як при $t_{cp} = 20$ с спад може перевищувати 60 %. Зменшення проникності зі збільшенням тривалості навантаження проявляється у поступовому зниженні інтенсивності вилучення олії під час механічного пресування.

Експериментальні дані також демонструють, що основна частина олії виділяється на початковій стадії процесу. Так, за загального часу стискання 20 с близько 60–70 % від сумарного об'єму отриманої олії екстрагується протягом перших п'яти секунд.

Дослідження зміни коефіцієнта k підтверджує значний вплив температурного режиму на перебіг екстракції. Проведення процесу за підвищених температур характеризується більшими значеннями проникності, причому цей ефект найбільш виражений при невеликих зна-

ченнях t_{cp} . За таких умов коефіцієнт k , визначений при температурі T_2 , може у декілька разів перевищувати відповідні показники, отримані при T_1 .

Щодо впливу тиску спостерігається протилежна закономірність: зі збільшенням тиску екстракції середні значення k мають тенденцію до зменшення. Цей ефект більш помітний у поєднанні з підвищеною температурою, однак проявляється переважно в межах певних діапазонів тиску, за якими подальші зміни стають незначними або важко ідентифікуються.

Результати вимірювань, виконаних під час досліджень на безперервному пресі, дали змогу також визначити коефіцієнт об'ємної деформації m_v із використанням залежності (11). У таблиці 2 наведено усереднені значення цього параметра для кожного з досліджуваних режимів екстракції.

Таблиця 2

Усереднені значення коефіцієнта об'ємної деформації m_v залежно від тривалості стискання, рівня тиску та температурного режиму

Час стискання t_{cp} , с	Температура, T_1 , °C			Температура, T_2 , °C		
	Тиск, U_1 , бар	Тиск, U_2 , бар	Тиск, U_3 , бар	Тиск, U_1 , бар	Тиск, U_2 , бар	Тиск, U_3 , бар
	Коефіцієнт об'ємної деформації, m_v , м ² /кН			Коефіцієнт об'ємної деформації, m_v , м ² /кН		
5	$1,23 \cdot 10^{-6}$	$1,13 \cdot 10^{-6}$	$1,08 \cdot 10^{-6}$	$1,26 \cdot 10^{-6}$	$1,23 \cdot 10^{-6}$	$1,15 \cdot 10^{-6}$
10	$1,12 \cdot 10^{-6}$	$1,14 \cdot 10^{-6}$	$1,09 \cdot 10^{-6}$	$1,27 \cdot 10^{-6}$	$1,20 \cdot 10^{-6}$	$1,18 \cdot 10^{-6}$
20	$1,15 \cdot 10^{-6}$	$1,15 \cdot 10^{-6}$	$1,10 \cdot 10^{-6}$	$1,17 \cdot 10^{-6}$	$1,15 \cdot 10^{-6}$	$1,13 \cdot 10^{-6}$

Загалом встановлено, що значення m_v дещо вищі при температурному режимі T_2 порівняно з T_1 та мають тенденцію до зменшення зі зростанням прикладеного тиску. Отримані результати узгоджуються з експериментальними даними Баргейла, отриманими під час досліджень насіння сої та ріцини, і частково підтверджують виявлені ним закономірності.

Випробування екстракції на пресі безперервної дії. У таблиці 3 подано результати експериментальних досліджень, виконаних із використанням преса безперервного типу. Зокрема, наведено значення маси отриманої олії (O_e), ефективності екстракції (η_e), середньої температури продукту на виході з преса, тривалості процесу та продуктивності обладнання (p_{ro}), визначені під час кожного експериментального випробування.

Таблиця 3

Результати експериментальних випробувань преса безперервної дії

Номер досліджу	Маса отриманої олії (O_e), кг	Ефективність екстракції (η_e), %	Середня температура продукту на виході з преса, °C	Тривалість процесу та продуктивність обладнання (p_{ro}), кг/год
1	32,5	32,5	61,2	14,7
2	33,8	33,8	63,5	14,2
3	31,9	31,9	60,8	14,5
4	34,3	34,3	60,9	14,8
5	33,5	33,5	64,1	14,3

Узагальнення результатів експериментальних досліджень свідчить, що середній вихід екстракції (η_e) становить приблизно 33,2 %.

Температурний режим упродовж усіх випробувань залишався відносно стабільним – середнє значення температури олії на виході становило близько 62,1 °C при стандартному відхиленні 1,6 °C. За таких умов роботи прес забезпечував середню продуктивність на рівні 14,5 кг/год видобутої олії, причому варіація показника була незначною (стандартне відхилення – 0,2 кг/год).



Порівняння реальних значень та значень, отриманих за допомогою моделювання. Відповідно до підходу, та з урахуванням експериментальних результатів, отриманих під час досліджень на пресі періодичної дії, для кожного режиму екстракції було визначено коефіцієнти k_0 та k_1 рівняння (14), яке описує функціональну залежність $k(t)$ (табл. 4).

Таблиця 4

Значення коефіцієнтів k_0 та k_1 для різних режимів екстракції

Тиск, U	Температура, T , °C	Коефіцієнт, k_0	Коефіцієнт, k_1	Коефіцієнт детермінації, R^2	Рівень значущості, p
U_1	T_1	$2,9 \cdot 10^8$	$1,4 \cdot 10^6$	0,60	0,22
U_2		$8,2 \cdot 10^8$	$8,7 \cdot 10^5$	0,78	0,11
U_3		$4,8 \cdot 10^8$	$1,8 \cdot 10^6$	0,84	0,08
U_1	T_2	$1,6 \cdot 10^8$	$8,7 \cdot 10^5$	0,98	0,01
U_2		$2,6 \cdot 10^8$	$1,0 \cdot 10^6$	0,97	0,02
U_3		$2,4 \cdot 10^8$	$1,4 \cdot 10^6$	0,96	0,02

Загалом отримані значення коефіцієнта детермінації R^2 для всіх досліджуваних режимів можна оцінити як прийнятні, оскільки вони перевищують рівень 0,6, а в окремих випадках є суттєво вищими. Водночас статистично значущі результати ($p < 0,05$) зафіксовано лише для процесів екстракції, проведених за температурного режиму T_2 .

Як свідчать отримані дані, на початковому етапі екстракції проникність має максимальні значення, однак із подовженням часу стискання (t_{cp}) вона швидко зменшується.

Виявлена динаміка відповідає структурним змінам, що відбуваються у твердій матриці насіння під час стискання. На початковій стадії процесу матеріал характеризується значною пористістю, завдяки чому олія легко проходить через наявні порожнини тканини.

Із подальшим підвищенням ступеня ущільнення пористість поступово зменшується, а міжклітинні та внутрішньоклітинні канали перекриваються, що ускладнює виділення олії з твердого залишку [1].

Порівняльний аналіз фактичних об'ємів екстрагованої олії та результатів, отриманих за допомогою прогнозової моделі, наведено в таблицях 5 і 6 для температурних режимів T_1 та T_2 відповідно. Розбіжності між експериментальними та розрахунковими даними є помітними.

Загалом показник похибки прогнозування (E_p) змінюється в межах від 8,9 % до 63,9 % і демонструє тенденцію до зростання зі збільшенням тривалості стискання (t_{cp}).

Таблиця 5

Порівняльний аналіз експериментальних O_e розрахункових значень O_{es} маси отриманої олії для різних режимів екстракції при температурі 30 °C

Час стискання t_{cp} , с	Температура, T_1 , °C								
	Тиск, U_1 , бар			Тиск, U_2 , бар			Тиск, U_3 , бар		
	Маса отриманої олії (O_e), кг	Маса отриманої олії (O_{es}), кг	Похибка прогнозування (E_p)	Маса отриманої олії (O_e), кг	Маса отриманої олії (O_{es}), кг	Похибка прогнозування (E_p)	Маса отриманої олії (O_e), кг	Маса отриманої олії (O_{es}), кг	Похибка прогнозування (E_p)
5	7,2	7,9	8,9	11,7	15,5	24,5	12,3	17,1	28,1
10	10,6	15,4	31,2	10,7	28,2	62,1	14,7	31,6	53,5
20	17,4	28,2	38,3	18,4	44,2	58,4	18,4	51,1	63,9

Таблиця 6

Порівняльний аналіз експериментальних O_e розрахункових значень O_{es} маси отриманої олії для різних режимів екстракції при температурі 60 °C

Час стискування t_{cp} , с	Температура, T_2 , °C								
	Тиск, U_1 , бар			Тиск, U_2 , бар			Тиск, U_3 , бар		
	Маса (екс.) отриманої олії (O_e), кг	Маса (роз.) отриманої олії (O_{es}), кг	Похибка прогнозування (E_p)	Маса отриманої олії (O_e), кг	Маса отриманої олії (O_{es}), кг	Похибка прогнозування (E_p)	Маса отриманої олії (O_e), кг	Маса отриманої олії (O_{es}), кг	Похибка прогнозування (E_p)
5	21,2	28,1	24,6	21,5	24,9	13,7	24,4	34,3	28,9
10	28,1	51,6	45,5	26,9	45,0	40,2	30,5	61,2	50,1
20	29,7	78,8	62,3	31,8	73,2	56,6	35,3	92,8	62,0

Упродовж перших п'яти секунд значення похибки прогнозування (E_p) досягає приблизно 29 % і демонструє тенденцію до збільшення зі зростанням прикладеного тиску.

Для адаптації математичної моделі до умов роботи преса безперервного типу виникла необхідність визначення функціональної залежності тиску U . З огляду на результати, було отримано наступне рівняння:

$$\ln \eta_e = a + h \cdot U_e^2 + c \cdot t_{cp}^{1,5}, \quad (19)$$

де $a = 2,12$, $b = 3,56 \cdot 10^{-9}$, $c = 7,55 \cdot 10^{-3}$, а коефіцієнт кореляції R^2 становить 0,87, що свідчить про достатній рівень узгодженості моделі з експериментальними даними.

Після розв'язання рівняння для $t_{cp} = 0,47$ с та $\eta_e = 33,2$ % які відповідають середньому часу стискування та типовій інтенсивності екстракції при безперервному пресуванні, було отримано значення еквівалентного тиску $U_{eq} = 880$ бар.

У таблиці 7 подано коефіцієнти функцій $k(U_e)$ для різних значень t_{cp} . Найточніший опис взаємозв'язку між досліджуваними параметрами забезпечує залежність виду $k = d + e \cdot U_e^{-2}$.

Крім того, у таблиці наведено розраховані значення k при тиску 880 бар, на основі яких було побудовано функцію $k(t)$ для зазначеного режиму. Отримана залежність, представлена рівняннями того ж типу, що й у (14), характеризується коефіцієнтами $k_0 = 4,34 \cdot 10^8$ та $k_1 = 1,35 \cdot 10^7$, при цьому значення $R^2 = 0,99$ підтверджує високу точність апроксимації.

Результати моделювання, виконаного з урахуванням функції $k(t)$ для $U_e = 880$ бар і $m_v = 6,04 \cdot 10^{-9}$, що відображає зміну об'єму видобутої олії залежно від тривалості стискування t_{cp} .

За умови продуктивності преса за олією (p_{ro}) на рівні 1,89 г/с розраховані значення похибки прогнозування (E_p) змінюються в межах від 30,3 % до 72,6 % залежно від початкового часу інтегрування (t_{int}) (табл. 8).

Подальший аналіз залежності E_p від параметра t_{int} показав, що при значенні 0,125 с похибка прогнозу зменшується до нульового рівня, що свідчить про оптимальність цього інтервалу для використання в розрахунках математичної моделі.

Прогнозування продуктивності безперервного пресування. Застосування методичного підходу, дало змогу сформувати прогностичну модель, що встановлює залежність продуктивності преса від ефективності екстракції з урахуванням швидкості обертання шнека (v_{rc}).

Отримані результати свідчать, що зі зміною (v_{rc}) показники продуктивності за олією (p_{ro}) та розрахункової ефективності екстракції (η_{es}) демонструють протилежні тенденції.

Зокрема, підвищення швидкості обертання шнека супроводжується зменшенням ефективності екстракції, тоді як продуктивність обладнання має тенденцію до зростання. При

Таблиця 7

Коефіцієнти функцій $k(U_e)$ та відповідні значення k при тиску 880 бар за різних температурних режимів

Час стискання t_{cp} , с	Постійний адитивний коефіцієнт моделі, d	Коефіцієнт пропорційності, e	Коефіцієнт детермінації, R^2	Розрахунковий коефіцієнт, $k_{(880\text{-бар})}$, м/с
5	$2,5 \cdot 10^{-9}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	0,84	$2,7 \cdot 10^{-9}$
10	$1,5 \cdot 10^{-9}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	0,93	$1,7 \cdot 10^{-9}$
20	$9,7 \cdot 10^{-9}$	$7,1 \cdot 10^{-5}$	0,93	$1,1 \cdot 10^{-9}$

Таблиця 8

Значення похибки прогнозування E_p залежно від початкового часу інтегрування t_{int}

Початковий час інтегрування t_{int} , с	Маса (екс.) отриманої олії (O_e), г	Маса (роз.) отриманої олії (O_{es}), г	Похибка прогнозування (E_p)
0,01	1,89	6,89	72,6
0,05	1,89	4,56	58,6
0,08	1,89	3,34	43,4
0,1	1,89	2,71	30,3

$v_{rc} = 2$ б/с – швидкості, що підтримувалася під час експериментальних досліджень безперервного пресування – об'єм видобутої олії становив близько 4 г/с (приблизно 14,4 кг/год).

Практично повний збіг із експериментальними даними пояснюється використанням у моделі початкового часу інтегрування $t_{int} = 0,125$, що було прийнято як оптимальне значення для прогнозних розрахунків.

Загальна динаміка, відображена моделлю, підтверджує, що зі зростанням v_{rc} ефективність вилучення олії поступово знижується, тоді як її виробнича продуктивність збільшується. Водночас підвищення продуктивності спостерігається лише в певному інтервалі швидкостей. Після досягнення приблизно 4 об/с фіксується протилежна тенденція, що проявляється у зменшенні виходу олії.

Висновки. 1. Трансформація фізичних властивостей матеріалу під час механічного стискання олійного насіння відіграє визначальну роль у поясненні механізмів, що лежать в основі процесу вилучення олії. Одним із ключових параметрів вважається проникність твердої структури насіння, оскільки саме вона значною мірою визначає ефективність відокремлення олії в умовах компресійного навантаження. Основними технологічними чинниками, які впливають на цей показник, є тиск, температура та тривалість стискання (t_{cp}).

2. Результати експериментів засвідчили, що коефіцієнт проникності k зростає за підвищення температури. Практичний досвід показує, що нагрівання сировини під час екстракції сприяє інтенсифікації відведення олії, внаслідок чого за однакового часу стискання забезпечується більший вихід продукту. Імовірно, така залежність пов'язана зі зменшенням в'язкості олії при вищих температурах. Найбільш виразно цей ефект проявляється на початковій стадії стискання, тобто в діапазоні t_{cp} , характерному для стандартних безперервних пресів. Зокрема, приблизно за 5 секунд може бути вилучено понад 60 % загальної маси олії, тоді як при $t_{cp} = 20$ с її об'єм за підвищеної температури інколи перевищує показники низькотемпературного режиму у 2–3 рази. Варіативність цієї закономірності частково пояснюється впливом тиску екстракції, який за сталого t_{cp} зазвичай спричиняє зниження проникності k . Водночас в межах дослідженого інтервалу часу стискання цей фактор не демонструє істотного впливу на загальний об'єм отриманої олії, хоча його значення може посилюватися при коротших циклах навантаження.

4. Отримані результати математичної моделі, запропонованої Баргейлом, дають підстави вважати, що нижня межа t_{cp} , розглянута в експериментах, може позначатися на чутливості та достовірності моделювання для процесів із більшою тривалістю стискання. Водночас встанов-

лено, що для $t_{cp} = 5$ с розбіжність між експериментальними та розрахунковими даними є відносно невеликою і не перевищує 30 %.

5. Покращення відповідності моделі реальній роботі досліджуваного преса можливе шляхом коригування початкового часу інтегрування (t_{int}). Фактично, підбір такого значення цього параметра, за якого різниця між прогнозними та експериментальними результатами є мінімальною, можна розглядати як ефективний спосіб адаптації математичного опису процесу.

6. Удосконалений алгоритм розрахунку відкриває можливості для детального аналізу змін ефективності та продуктивності пресового обладнання за різних режимів роботи. Завдяки цьому модель може використовуватися як практичний інструмент для оптимізації параметрів машини та досягнення заданих виробничих показників.

Список використаних джерел

1. Чумак О. П. Процеси та апарати харчових виробництв. Київ: Центр учбової літератури, 2018. 476 с.
2. Технологічне обладнання олійно-жирових виробництв: НУХТ, навч. посіб. Київ: НУХТ, 2019. 420 с.
3. Terzaghi K. Theoretical Soil Mechanics. New York: Wiley, 1943. 510 p.
4. Darcy H. Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Paris: Dalmont, 1856. 647 p.
5. Bird R. B., Stewart W. E., Lightfoot E. N. Transport Phenomena. 2nd ed. Wiley, 2002. 895 p.
6. Geankoplis C. J. Transport Processes and Separation Process Principles. 4th ed. Prentice Hall, 2003. 1026 p.
7. Singh R. P., Heldman D. R. Introduction to Food Engineering. 5th ed. Academic Press, 2014. 864 p.
8. Fellows P. Food Processing Technology: Principles and Practice. 4th ed. Woodhead Publishing, 2017. 1152 p.
9. Savoie R., Lanoisellé J. L., Vorobiev E. Mechanical oil expression from oilseeds: A review. *Food and Bioprocess Technology*. 2013. Vol. 6. P. 1–16.
10. Adeeko K. A., Ajibola O. O. Processing factors affecting yield and quality of mechanically expressed groundnut oil. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1990. Vol. 45. P. 31–43.
11. Бондар А. М. Обґрунтування технологій отримання рицинової олії. Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі». ТДАТУ, м. Запоріжжя, 01–25 листопада 2022 р. С. 77–79.
12. Дідур В. В., Журавель Д. П. Аналіз технологій отримання олії з олійних культур. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*: електронне наукове фахове видання. Мелітополь: ТДАТУ, 2022. Вип. 12, том 3. 10 с. DOI: 10.31388/2220-8674-2022-3-18.
13. Журавель Д. П., Дідур В. В. Механіко-технологічні основи глибокої переробки насіння рицини на енергетичну біосировину: монографія. Запоріжжя : ТДАТУ, 2025. 275 с., іл.
14. Бондар А. М. Використання біологічної оливи для сільськогосподарської техніки. *Механізація та електрифікація сільського господарства*: загальнодержавний збірник / ННЦ «ІМЕСГ». Глеваха, 2019. Вип. № 10 (109). С. 125–131.
15. Журавель Д. П., Дідур В. В. Обґрунтування технологічного процесу збирання рицини. Збірник тез доповідей XXVI Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (17–18 жовтня 2025 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2025. 717 с. С. 147–150.
16. Дідур В. В., Журавель Д. П., Повар І. Ю., Петриченко Є. А. Теоретичні основи розрахунку конструкційно-технологічних параметрів конічної центрифуги для очищення рослинних олій. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*: наукове фахове видання. ТДАТУ, 2025. Вип. 25, т. 3. С. 118–124. DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-3-16>. <https://oj.tsatu.edu.ua/index.php/pratsi/issue/view/65/164>
17. Дідур В. В., Журавель Д. П., Повар І. Ю., Петриченко Є. А. Наукові основи очищення рослинних олій у конічних центрифугах. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*: наукове фахове видання. Запоріжжя : ТДАТУ, 2025. Вип. 25, т. 3. С. 125–130. DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-3-17>
18. Дідур В. В., Журавель Д. П., Колесніченко І. А., Петриченко Є. А. Моделювання теплової обробки насіння олійних культур високотемпературним теплоносієм. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*: наукове фахове видання. Запоріжжя: ТДАТУ, 2025. Вип. 15, т. 2. С. 37–44. DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-5>



19. Колесніченко І. А., Петриченко Є. А. Моделювання тепломасоперенесення в поверхневих капілярно-пористих середовищах. Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції. «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі» (01–25 листопада 2025 року). Запоріжжя, 2025. С. 46–49.

20. Бондар А. М. Прогнозування ресурсу трибосистем при використанні сумішевих олив. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*: електронне наукове фахове видання. ТДАТУ. Мелітополь: ТДАТУ, 2021. Вип. 11, том 1. 19 с. DOI: 10.31388/2220-8674-2021-1-10

21. Kuznetsov M., Lysenko O., Chebanov A. Ensuring power balance in a hybrid power system with a backup generator. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (8 (114)), 2021. 6–15. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.245557>

22. Samoichuk K.; Petrychenko S.; Bondar A.; Hutsol T.; Kubo' n, M.; Niemiec M.; Mykhailova L.; Gródek-Szostak Z.; Sorokin D. Modeling of Diesel Engine Fuel Systems Reliability When Operating on Biofuels. *Energies*, 2022, 15, 1795. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15051795>

23. Kaplan M.; Klimek K.; Maj, G.; Bondar A.; Lemeshchenko-Lagoda, V.; Boltianskyi, B.; Boltianska, L.; Syrotyuk, H.; Syrotyuk, S.; et al. Method of Evaluation of Materials Wear of Cylinder-Piston Group of Diesel Engines in the Biodiesel Fuel Environment. *Energies*, 2022, 15, 3416. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15093416>

Дата першого надходження статті до видання: 15.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 09.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



D. Zhuravel¹, V. Didur², Ya. Bilokin³

¹ **Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University**

² **Uman National University**

³ **Poltava State Agrarian University**

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF MECHANICAL EXTRACTION OF OIL FROM CASTOR SEEDS

Summary

The article considers the issue of evaluating the mathematical model of the process of mechanical extraction of oil from castor seeds. The research was conducted using the theory of consolidation of porous media and the law of liquid filtration, and the determination of the possibilities of its application for continuous presses. Experimental tests were conducted using intermittent and continuous mechanical presses under different temperature and force regimes. In the course of the work, it was established that the permeability of the solid structure of the seeds significantly affects the extraction efficiency, and an increase in temperature contributes to the intensification of the process due to a decrease in the viscosity of the oil. The transformation of the physical properties of the material during mechanical compression of oilseeds plays a decisive role in explaining the mechanisms underlying the oil extraction process. One of the key parameters is the permeability of the solid structure of the seed, since it largely determines the efficiency of oil separation under compressive loading. The main technological factors that affect this indicator are pressure, temperature and compression duration t_{cp} . The results of the experiments showed that the permeability coefficient k increases with increasing temperature. Practical experience shows that heating the raw material during extraction contributes to the intensification of oil removal, as a result of which a higher product yield is ensured for the same compression time. Presumably, this dependence is associated with a decrease in oil viscosity at higher temperatures. This effect is most pronounced at the initial stage of compression, in the range t_{cp} , typical for standard continuous presses. In particular, in approximately 5 seconds, more than 60 % of the total mass of oil can be removed, while at $t_{cp} = 20$ s, its volume at elevated temperature sometimes exceeds the indicators of the low-temperature regime by 2–3 times. The variability of this pattern is partly explained by the influence of the extraction pressure, which at a constant t_{cp} usually causes a decrease in the permeability k . At the same time, within the studied



compression time interval, this factor does not demonstrate a significant effect on the total volume of oil obtained, although its value may increase with shorter load cycles. Regarding the use of the mathematical model proposed by Bargail, the results obtained give reason to believe that the lower limit of t_{cp} , considered in the experiments, may affect the sensitivity and reliability of the modeling for processes with a longer compression duration. At the same time, it was found that for $t_{cp} = 5$ s the discrepancy between the experimental and calculated data is relatively small and does not exceed 30 %. Improving the compliance of the model with the real operation of the studied press is possible by adjusting the initial integration time (t_{int}). In fact, the selection of such a value of this parameter, at which the difference between the predicted and experimental results is minimal, can be considered as an effective way to adapt the mathematical description of the process. The improved calculation algorithm opens up opportunities for detailed analysis of changes in the efficiency and productivity of press equipment under different operating modes. Thanks to this, the model can be used as a practical tool for optimizing machine parameters and achieving specified production indicators.

Keywords: mathematical model, castor seeds, mechanical pressing, extraction, liquid filtration, consolidation of porous media.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-5>

УДК 631.67:004.94

М. Л. Засць¹, канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0002-2290-1892

П. К. Погребніченко², асистент

ORCID: 0009-0005-1943-6538

¹ Поліський національний університет² Державний університет «Житомирська політехніка»

e-mail: mzaec81@gmail.com

РОЗРОБКА ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ КОНТРОЛЕРА ДИФЕРЕНЦІЙОВАНОГО ВНЕСЕННЯ ДОБРИВ В СИСТЕМІ ТОЧНОГО ЗЕЛЕРОБСТВА

Анотація. У статті запропоновано низьковартісний модернізований контролер диференційованого внесення (VRAC), який враховує неоднорідність ґрунту та сприяє впровадженню технологій змінної норми. У межах виробничих полів спостерігається значна просторова варіабельність ґрунтових умов, що впливає на ефективність використання ресурсів і продуктивність культур. Система базується на платформі Raspberry Pi з використанням RTK-сумісної GNSS, крокового двигуна та енкодера колеса. Контролер забезпечує високоточне регулювання норми внесення в реальному часі відповідно до карт-завдань. Реалізація за принципом plug-and-play дозволяє використовувати систему для диференційованого висіву та внесення добрив. Експериментально підтверджено високу точність роботи (97,17 %), низьку похибку (RMSE 4,57; $R^2 = 0,994$) та швидку реакцію системи. Запропоноване рішення є доступним і сприяє розвитку точного землеробства.

Ключові слова: точне землеробство, диференційоване внесення, контролер VRAC, Raspberry Pi, GNSS-навігація, кроковий електродвигун, автоматизоване керування, змінна норма внесення, агротехнологічні системи.

Постановка проблеми. Застосування комплексних добрив (надалі КД) є невід'ємною складовою вирощування сільськогосподарських культур на даний час. Використання КД з метою покращити показники родючості ґрунту та збільшення врожаності культур, постійно зростало протягом останніх років [1].

Ефективне та раціональне застосування РКД є важливим фактором для підвищення ефективності та продуктивності в рослинництві, та аграрній галузі в цілому. З метою безпечного та ефективного застосування важливо застосовувати технологічні системи точного внесення та мінімізувати похибку в дозуванні, та зменшити непотрібне потрапляння добрив за межі ділянки внесення. Застосовуючи сучасні передові методи управління технологічними процесами, одним зі способів досягнення цієї мети є використання сучасних технологій точного землеробства, такі як регулятори та контролери дози внесення [4, 5], автоматичне регулювання подачі добрив на секції машин для внесення КД, індивідуальний контроль дозаторів [6, 7] та системи диференційованого внесення (Variable Rate Application, VRA) [8, 9].

Точне землеробство здатне сприяти задоволенню зростаючого попиту на продовольчу продукцію, одночасно підвищуючи ефективність господарювання за рахунок оптимізації витрат на матеріально-технічні ресурси. Технології точного землеробства, зокрема диференційоване внесення (Variable Rate Application, VRA), забезпечують удосконалене управління ресурсами шляхом точного дозування технологічних матеріалів – насіння, мінеральних добрив, зрошувальної води, вапна та засобів захисту рослин. Це сприяє підвищенню ефективності аграрного виробництва.

Технологію VRA можна розглядати як базовий інструмент реалізації заходів із захисту клімату та підвищення економічної результативності виробництва. Застосування диференційованого внесення забезпечує точність дозування матеріалів, зменшує їх перевитрати та мінімізує негативний вплив на довкілля. Зокрема, знижується вимивання поживних речовин у ґрунтові та поверхневі води, а також скорочуються викиди парникових газів [10–14].

Аналіз останніх досліджень. Останні дослідження підтвердили, що раціональне дозування рідких добрив та інших агрохімічних матеріалів сприяє запобіганню надлишковому накопиченню поживних речовин у ґрунті, підтриманню його родючості та підвищенню врожайності культур [10, 11, 13, 15].

З економічної точки зору технологія диференційованого внесення (VRA) забезпечує зниження виробничих витрат шляхом оптимізації використання матеріальних ресурсів. Адаптивність VRA до кліматичних умов і використання сучасних цифрових технологій для прийняття рішень на основі даних роблять її невід'ємною складовою сталих агротехнологій [8, 9].

Дослідження, проведене Schimmelpfennig (2018) на основі аналізу 750 тисяч полів сої, передбачало порівняння витрат на внесення добрив залежно від рівня просторової варіабельності ґрунту. Оцінювання продуктивної варіабельності здійснювалося за допомогою індексу (NCCPI), нормованого в межах від 0 до 1. Результати показали, що господарства з низькою варіабельністю ґрунтів мали витрати на добрива в середньому 54,73 дол. США на гектар, тоді як у господарствах із високою варіабельністю цей показник становив лише 2,75 дол. США на гектар (за умов індивідуалізованого внесення).

Отримані дані свідчать про суттєвий вплив технологій змінної норми внесення на зниження витрат і підвищення економічної ефективності виробництва залежно від ґрунтових умов.

Попри те, що технологія змінної норми внесення (VRT) застосовується з 1990-х років, за даними звітності United States Department of Agriculture (2023), лише 27 % фермерських господарств США використовують практики диференційованого управління посівами. Водночас 19 % виробників перебувають на етапі впровадження цієї технології, тоді як 28 % орних земель уже обробляються із застосуванням VRT.

Разом із тим сучасні машини, оснащені системами змінної норми внесення, зазвичай характеризуються високою вартістю. Значні капіталовкладення в обладнання для VRT, особливо для сучасних сівалок, а також потреба у фахівцях із відповідним рівнем технічної підготовки для експлуатації та обслуговування таких систем є суттєвими бар'єрами для їх впровадження в малих фермерських господарствах.

Таким чином, основними чинниками, що стримують поширення VRT, залишаються висока вартість технічного оснащення та необхідність спеціалізованих знань і навичок для роботи з цими системами, що особливо ускладнює їх доступність для дрібних сільськогосподарських виробників.

Низка досліджень, спрямованих на розроблення доступних систем змінної норми внесення (VRT), створила підґрунтя для подальших інновацій у сфері точного землеробства з метою зниження витрат для малих фермерських господарств.

Зокрема, у дослідженні Coelho та співавт. (2020) було розроблено низьковартісний контролер змінної норми внесення, інтегрований в однорядну ручну сівалку. Система використовувала електродвигун постійного струму, керований одноплатним комп'ютером BeagleBoard.org BeagleBone Black. Випробування проводилися під час висіву кукурудзи в різних зонах управління. Контролер автоматично регулював густоту висіву відповідно до карт-завдань, що підтвердило можливість використання доступних компонентів (загальна вартість 337,97 дол. США) для реалізації елементів точної сівби, придатних для малих господарств.

Інше дослідження, виконане Mirzakhani et al. (2021), було присвячене створенню аплікатора добрив зі змінною нормою внесення, здатного виявляти дефіцит азоту в режимі

реального часу безпосередньо в польових умовах та відповідно коригувати норму внесення. Система базувалася на мікроконтролері, який отримував сигнали від азотного сенсора та регулював клапан із широтно-імпульсною модуляцією (PWM), змінюючи частоту обертання гідравлічного двигуна. Орієнтовна вартість такої системи становила близько 700 дол. США.

Наведені приклади демонструють, що розроблення економічно доступних рішень для VRT є реалістичним напрямом підвищення рівня впровадження технологій точного землеробства серед дрібних і середніх агровиробників.

У 2026 році прогнозоване споживання азотних добрив під посіви кукурудзи в Україні, визначене методом лінійної регресійної інтерполяції на основі даних (USDA) за 2003 ... 2024 роки, становить орієнтовно 3,4 ... 3,5 млн тонн.

Прогнозований обсяг виробництва кукурудзи у 2026 році оцінюється на рівні 29,9 млн тонн, що на 11,2 % більше, порівнюючи з минулим маркетинговим роком, хоча і на 6,8 % менше за середній показник останніх 5 років.

Отримані розрахунки свідчать про значний економічний потенціал застосування технологій диференційованого внесення в системах точного землеробства.

Сучасні механізми контролерів змінної норми внесення (VRT) часто базуються на використанні сигналів широтно-імпульсної модуляції (PWM) для керування виконавчими електродвигунами постійного струму. Такий підхід може спричиняти часові затримки при перетворенні вхідних сигналів від польових сенсорів або GNSS-навігації до керуючого впливу на виконавчий механізм. Крім того, в окремих системах VRT як основний обчислювальний модуль застосовуються програмовані логічні контролери (PLC), які були розроблені переважно для промислових умов експлуатації та демонструють оптимальну ефективність у закритих виробничих середовищах, а не в польових агротехнологічних умовах.

Сучасний ринок сільськогосподарської техніки також пропонує нові апарати для внесення матеріалів без функцій диференційованого регулювання. Наприклад, продукція компанії John Deere, зокрема сівалка John Deere 1590 No-Till Drill, а також обладнання типу Agromaster Seed Drills, Landoll 5000 Series Grain Drill та пневматична сівалка Gandy OrbitAir, постачається як стандартне обладнання, яке після придбання розраховане на роботу приблизно на 15 000 гектарів без функцій VRT.

Формулювання мети досліджень. Аналіз літературних джерел показав, що більшість попередніх досліджень, які вивчали вплив не варіативного внесення добрив на навколишнє середовище та значні економічні витрати, за рахунок неефективного застосування [10–14, 15]. Однак якісні показники диференційованого адаптивного застосування залишалися поза увагою. Зокрема, більшість робіт не досліджували, яким чином технології точного внесення КД, відповідно контролери дози внесення, дадуть змогу адаптивно за потреби підвищити ефективність під час застосування рідких азотних чи інших добрив.

Інвестиції в сільськогосподарську техніку часто характеризуються ефектом «заморожених витрат», оскільки після придбання обладнання вкладені кошти стають незворотними, що формує так звані комітовані витрати.

Отже, метою даного дослідження є розроблення та експериментальне оцінювання ретрофітного контролера VRAC для модернізації вже наявних аплікаторів із використанням просторової варіабельності агроумов та існуючого машинного парку, що сприятиме підвищенню рівня впровадження технологій змінної норми внесення.

Основна частина. Вимоги до конструкції VRAC (SDSU-VRAC) охоплюють кілька критично важливих функціональних компонентів, кожен з яких має специфічні технічні параметри. Модернізація висівного апарата повинна забезпечувати безшовну інтеграцію виконавчого механізму та систем зворотного зв'язку з сенсорами.

Розроблення контролера VRAC передбачає забезпечення швидкої реакції системи для динамічного коригування норми висіву на основі вхідних даних у режимі реального часу. Процедури калібрування та експериментального оцінювання є ключовими етапами дослідження, оскільки потребують високої точності налаштування для забезпечення надійності та стабільності роботи контролера в різноманітних польових умовах.

Модифікація висівного апарата. Ретрофитний контролер змінної норми внесення був розроблений та випробуваний на чотирирядному аплікаторі Gandy Company (модель P454WP12 – аплікатор поживних речовин із чотирма виходами), що показано на (рис. 1, а).

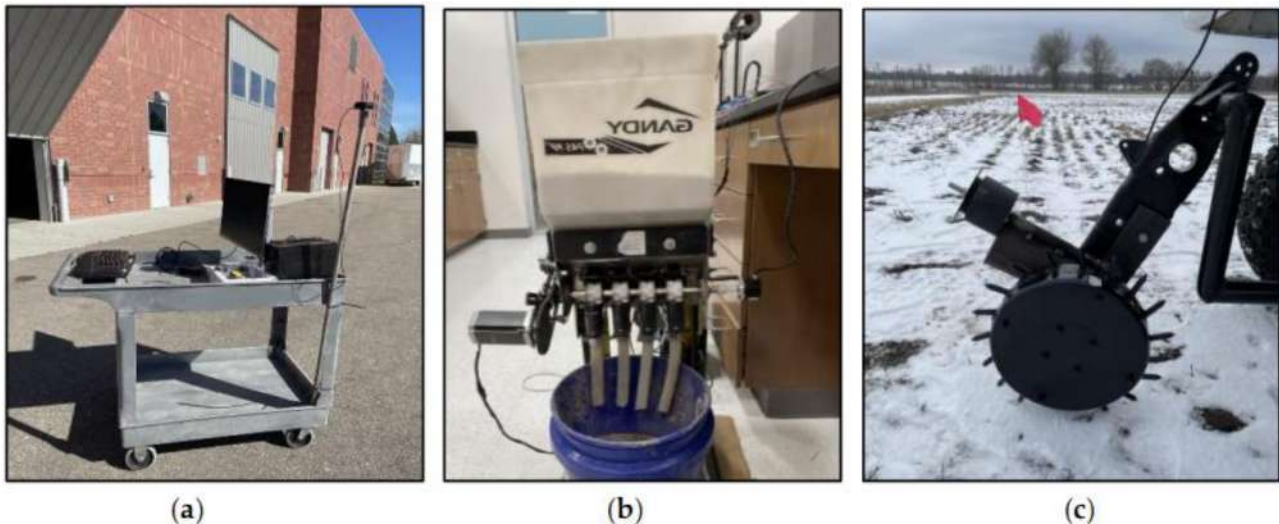


Рис. 1. Розробка системи SDSU-VRAC: (а) розроблення та випробування контролера SDSU-VRAC; (b) модернізація чотирирядного аплікатора Gandy Company; (c) випробування протиковзного приводного колеса

Джерело: розроблено авторами

Модифікація апарата включала доопрацювання чотирьох дозувальних висівних коліс, встановлення крокового двигуна типу NEMA 23 із крутним моментом 3 Н·м, який з'єднувався ланцюговою передачею зі зірочкою з передавальним відношенням редукції 1:2 відносно головного дозувального вала.

Додатково було встановлено інкрементний енкодер колеса для контролю виходу висівного матеріалу (рисунок 5b) та протиковзне приводне колесо з ґрунтовим контактом для керування електродвигуном, як показано на рисунку 5с.

Технічні характеристики компонентів, а також вартість системи контролера змінної норми внесення наведено в табл. 1.

Структура системи SDSU-VRAC представлена на (рис. 2.). Вхідними даними є інформація від GNSS-модуля для визначення просторового положення агрегату в полі та карта-завдання з диференційованими нормами внесення технологічного матеріалу.

Отримані сигнали обробляються на платформі Raspberry Pi, яка виконує функції керуючого обчислювального модуля системи. Через драйвер двигуна здійснюється керування кроковим електродвигуном, що забезпечує виконання технологічних операцій, таких як висів насіння або внесення добрив відповідно до заданої карти-завдання.

Додатково інкрементний енкодер забезпечує передачу сигналів зворотного зв'язку про режим роботи двигуна до обчислювального модуля, що дозволяє підтримувати параметри технологічного процесу відповідно до запрограмованих норм внесення. Така архітектура забезпечує підвищену точність та стабільність функціонування контролера в польових умовах.

Таблиця 1

Технічні характеристики контролера змінної норми внесення

Кількість	Компонент	Технічна характеристика	USD/од.
1	Raspberry Pi 4 Model B	4 ГБ RAM, 64-бітний чотириядерний процесор 5 GHz, 40 GPIO	90
1	GNSS-приймач	Прийом сигналів GLONASS, Galileo, BeiDou; точність позиціювання до 10 мм	275
1	SparkFun Electronics Arduino Qwiic	ATMega328P, інтерфейс USB-C	22
2	Інкрементний енкодер	600 імп/об, АВ канал, NPN-вихід	19
1	Кроковий двигун NEMA 23	Крутний момент 3 Н·м; кут кроку 1,8° (200 кроків/об); струм 4,2 А	40
1	Драйвер крокового двигуна	Логічна напруга 5–24 В; сигналізаційний вихід; робочий струм 1,0–4,2 А; напруга живлення 20-50 В	29
1	Монітор	7-дюймовий LCD-дисплей, роздільна здатність 024 × 600 IPS	50
1	Акумулятор	12 В, 75 А·год, глибокий цикл перезарядження	140
—	Електричні комплектуючі	Екрановані кабелі, конектори та допоміжні матеріали	50
Загальна вартість			715

* Ціни є орієнтовними та відповідають вартості обладнання на час проведення дослідження; у майбутньому можливі зміни вартості компонентів.

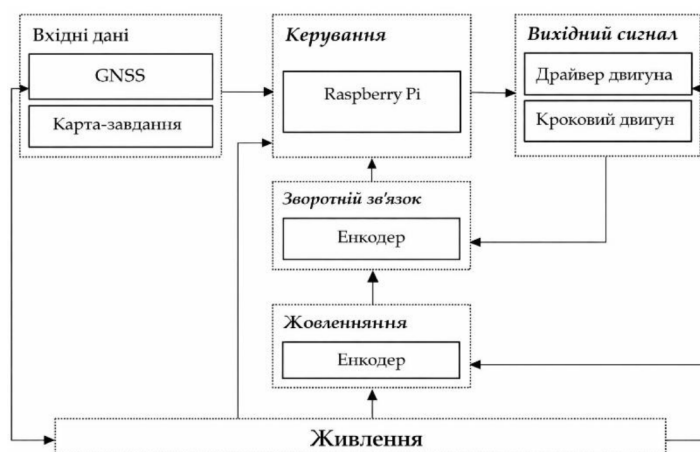


Рис. 2. Блок-схема системи керування зворотнім зв'язком

Джерело: розроблено авторами

Розроблений у цифровій лабораторії Житомирської політехніки, SDSU-VRAC, показаний на рис. 3 (a–i), потребує стандартного джерела живлення 12 В (a) і складається з інкрементального енкодера (b), GNSS (c) та флеш-пам'яті (d) як пристроїв введення, Raspberry Pi 4 (e) як процесорного блоку, монітора (f), драйвера крокового двигуна (g) і двигуна (h) як пристроїв виведення, з використанням зворотного зв'язку від інкрементального енкодера (i). Другий інкрементальний енкодер був використаний для вимірювання кутової швидкості обертання та положення валу висівного апарата.

Процес починається з того, що система зчитує карту приписів з USB-накопичувача та визначає позицію машини для забезпечення її відповідності певним зонам. Далі машина реєструє імпульси руху, коригує співвідношення імпульсів відповідно до заданої щільності та здійснює керування для застосування необхідної технологічної обробки. На завершення система записує дані зворотного зв'язку на карту для подальшого використання, як показано на рис. 4.

У таблиці 2 наведено вимоги до електроживлення компонентів системи SDSU-VRAC. Raspberry Pi 4 працює при напрузі 5 В і струмі 3 А, споживаючи 5 Вт потужності. GNSS-

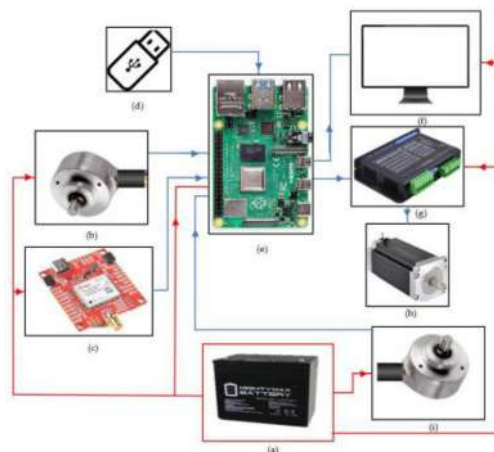


Рис. 3. Компоненти VRAC:

(a) джерело живлення 12 В, (b) колісний енкодер, (c) GNSS, (d) карта приписів, (e) Raspberry Pi, (f) монітор, (g) привод двигуна, (h) кроковий двигун та (i) енкодер зворотного зв'язку.

Джерело: розроблено авторами



Рис. 4. Схема управління мехатронним процесом

Джерело: розроблено авторами

модуль може працювати при напрузі 3,3 або 5 В і споживає струм від 0,085 до 0,13 А, що відповідає потужності 0,65 Вт. Аналогічно Sparkfun Arduino потребує напругу 7–12 В при струмі 1,5 А, загальне споживання становить 1,0 Вт. Інкрементальний енкодер, що працює в діапазоні напруги 5–24 В, споживає 0,16 А та використовує 0,8 Вт потужності.

Двигун NEMA 23, який функціонує в межах 12–36 В, споживає струм 4,2 А та використовує 3 Вт потужності. Крім того, драйвер крокового двигуна, що працює в діапазоні 20–50 В і споживає струм від 1 до 4,5 А, має логічний варіант керування 5/24 В; його потужність залежить від крутного моменту двигуна. Монітор, який потребує 12 В, споживає 15 Вт потужності. Загальне енергоспоживання зазначених компонентів становить 28,45 Вт.

Акумулятор ємністю 12 В, 75 А·год здатний безперервно жити систему із споживаною потужністю 28,45 Вт приблизно протягом 31,65 год. Це розрахункове значення, а фактична тривалість роботи може змінюватися залежно від таких чинників, як ступінь зношення акумулятора, температурні умови та ефективність системи перетворення електроенергії. У практичних умовах розроблений контролер може житися від стандартних клем живлення трактора напругою 12 В.

Таблиця 2

Споживання потужності контролера

Компонент	Необхідна напруга	Струм, А	Споживана потужність
Raspberry Pi 4	5 V	3 A	5 W
GNSS приймач	3,3/5 V	0,085–0,13 A	0,65 W
Sparkfun Arduino	7–12 V	1,5 A	1,0 W
Інкрементальний енкодер	5–24 V	0,16 A	0,8 W
Двигун NEMA 23	12–36 V	4,2 A	3 W
Драйвер крокового двигуна	20–50 V	1–4,5 A	–
Монітор	12 V	–	15 W
Разом			28,45 W

Оскільки дослідний висівний механізм (модифікований дозуючий апарат Gandy) спочатку не був призначений для висіву пшениці із застосуванням електронних систем керування, налаштування електропривода SDSU-VRAC було відкалібровано відповідно до розробленого експериментального зразка.

На основі рекомендацій [35] було побудовано калібрувальну характеристику норм висіву пшениці, яка використовується як довідкова та калібрувальна база (рис. 5).

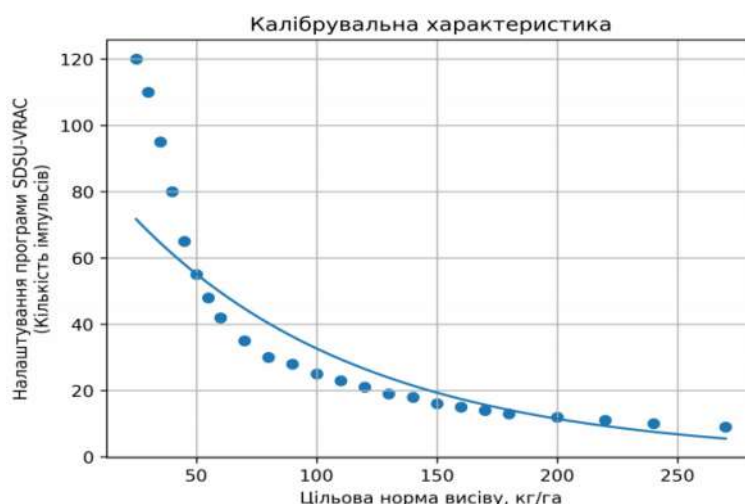


Рис. 5. Характеристика калібрування висівного апарату

Джерело: розроблено авторами

На площі 0,8 га експеримент проводили за рандомізованою схемою, що включала 42 контрольні точки, розміщені на відстані 45 м одна від одної, для оцінювання точності та прецизійності висіву насіння системою (рис. 6).

Крім того, було створено іншу карту-завдання (рис. 7), яка складалася з 5 зон, розташованих через 60 м. Вона використовувалася для оцінювання часу реакції системи під час зміни норми висіву при переході з однієї зони в іншу.

Обидві дослідні ділянки були промарковані для забезпечення контролю та оцінювання ефективності роботи модернізованої системи VRAC.

Зони були обрані відповідно до плану експерименту для ефективної оцінки роботи розробленого контролера. Крім того, для забезпечення достовірності результатів необхідно проводити кілька повторностей (щонайменше 3), особливо при роботі з даними з високою варіабельністю, такими як норми висіву. Більша кількість повторень дозволяє точніше виявити закономірності та зменшити вплив викидів. Додатково збільшення кількості повторностей дає змогу суттєво звужити довірчі інтервали, забезпечуючи більш точні оцінки ефектів обробок.

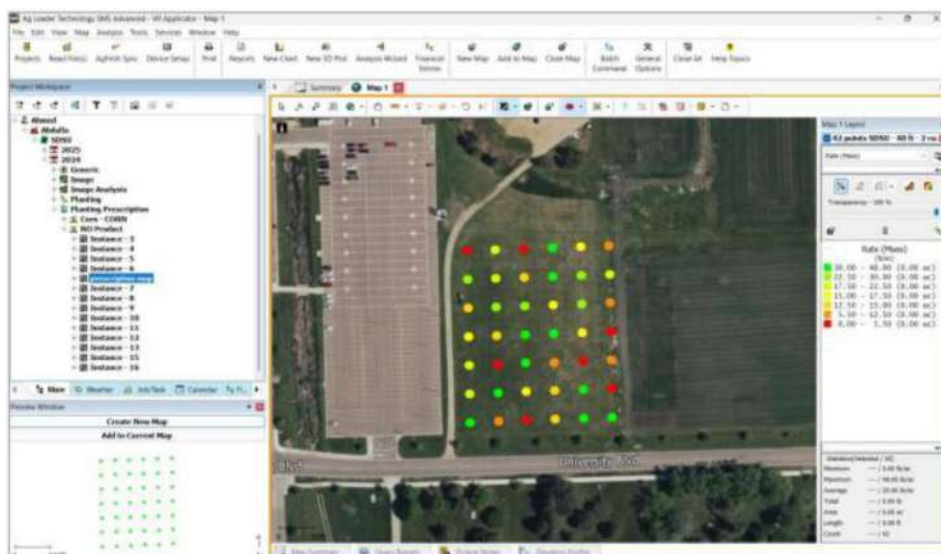


Рис. 6. Карта завдання висіву для дослідної ділянки з рандомізованим планом експерименту
Джерело: розроблено авторами

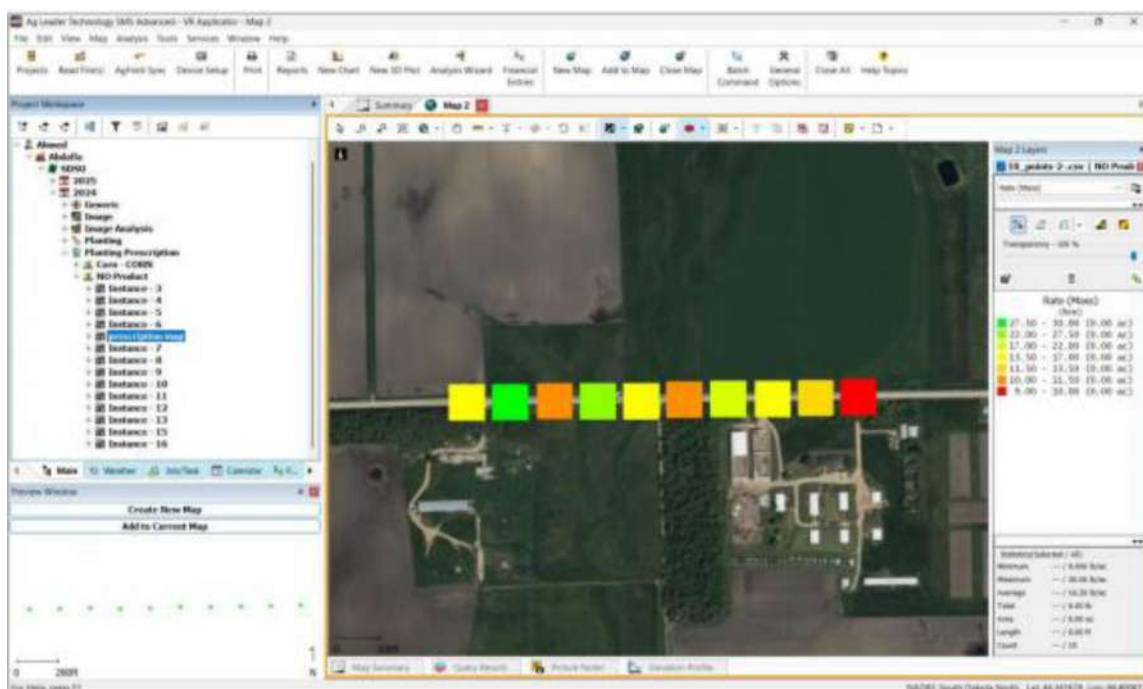


Рис. 7. Карта оцінки часової реакції для різних швидкостей і норм висіву
Джерело: розроблено авторами

Оцінка продуктивності висівного апарата. Експериментальне поле було розмічено 56 прапорцями для встановлення меж кожної зони. Модифікований висівний апарат Gandy був розміщений у кузові вантажівки, а протиковзний енкодер колеса встановлено в задній частині до його причіпного пристрою. Під час руху з фіксованою швидкістю 8 км/год висівний патрубок розміщували у пластиковому пакеті, який замінювали на межах зон для розділення норм висіву в кожній зоні; після цього пакети окремо зважували в лабораторії. Для проведення оцінювання були потрібні два оператори: один керував вантажівкою, а інший відбирав зразки, як показано на рис. 8.

Експеримент проводився на дослідній ділянці Дослідного поля університету, на відрізку дороги довжиною 300 м. Дорогу було поділено на 5 зон, а на межі кожної зони через кожні



Рис. 8. Оцінювання подачі насіння висівним апаратом

Джерело: розроблено авторами

60 м встановлено прапорець. Експеримент проводили за 6 різних швидкостей і 6 різних норм висіву.

На вікні вантажівки було нанесено контрольну смугу, вирівняну з GNSS-приймачем, закріпленим на даху автомобіля. Для фіксації сигналів, що надсилалися від контролера до електродвигуна для зміни норми висіву, використовувався осцилограф. Осцилограф також був підключений до ручної кнопки, яка подавала сигнал на межі зони. Під час руху вантажівки один оператор керував транспортним засобом, а інший відбирав зразки, натискаючи кнопку в момент, коли прапорець вирівнювався з контрольною смугою, як показано на рис. 9.

Дані були випадково відібрані та протестовані для 8 варіантів обробки. Для оцінювання точності та прецизійності висівної подачі використовували такі показники: середню похибку (ME) (рівняння 1), середньоквадратичну похибку (RMSE) (рівняння 2), коефіцієнт детермінації (R^2) (рівняння 3), похибку (рівняння 4), точність (рівняння 5) та прецизійність (рівняння 6).

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{X}_i - X_i), \quad (1)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{X}_i - X_i)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X}_i)(\hat{X}_i - \bar{\hat{X}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X}_i)^2 (\hat{X}_i - \bar{\hat{X}})^2}} \right]^2, \quad (3)$$

$$\text{похибка}\% = \frac{\bar{X}_i - \hat{X}_i}{\hat{X}_i} \times 100, \quad (4)$$

$$\text{достовірність}\% = (100 - \text{похибка})\%, \quad (5)$$

$$\text{прецизійність (точність)} = 100 - \text{STD}, \quad (6)$$

де $\hat{X}_i, X_i, N$ – відповідно фактичне значення, виміряні зразки та кількість зразків.

Осцилограф також був підключений до ручної кнопки, яка використовувалася для подачі сигналу на межі зони. Під час руху вантажівки один оператор керував транспортним засобом,

а інший відбирав зразки, натискаючи кнопку в момент, коли прапорець вирівнювався з контрольною смугою, як показано на рис. 9.

Було проведено рандомізований експеримент (рис. 10) для оцінювання ефективності подачі насіння. Для оцінювання роботи системи SDSU-VRAC використано вісім різних норм висіву:

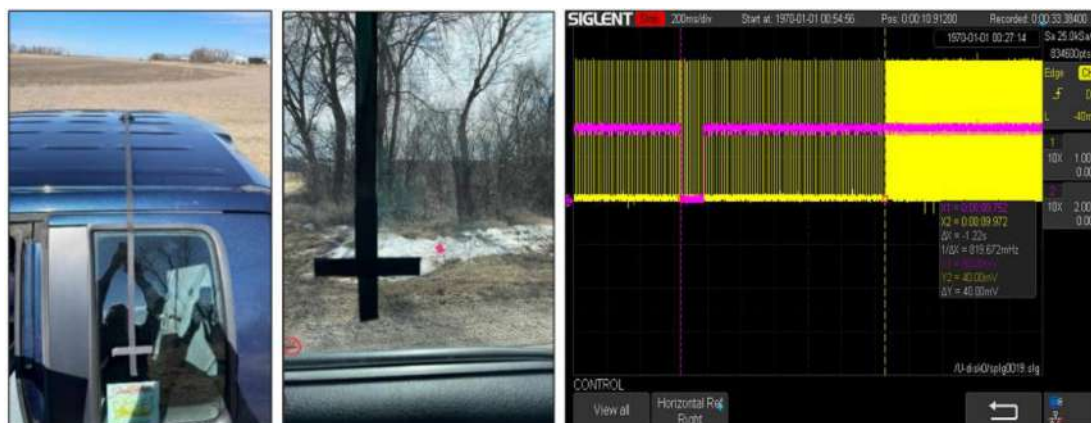


Рис. 9. Схема проведення випробування часової реакції системи

Джерело: розроблено авторами

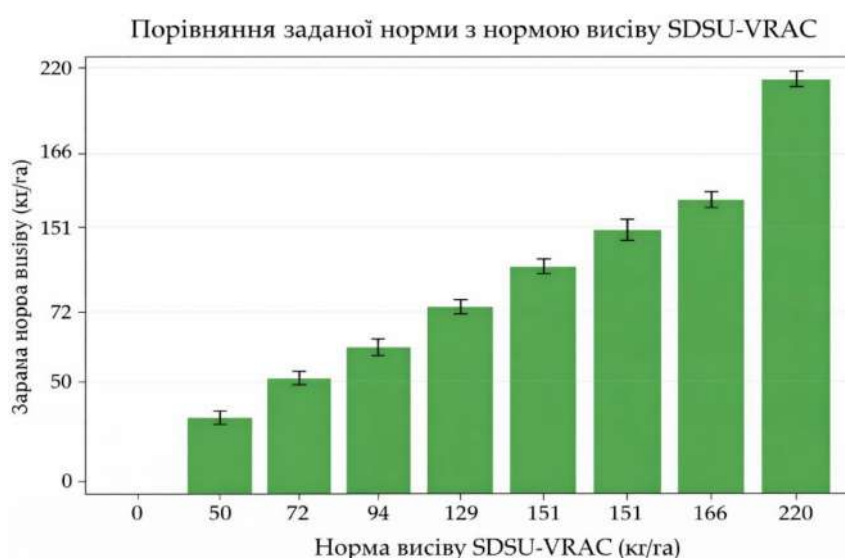


Рис. 10. Порівняння заданої норми висіву з нормою подачі SDSU-VRAC

Джерело: розроблено авторами

0, 50, 72, 94, 129, 151, 166 та 220 кг/га. Ці значення були обрані з урахуванням можливостей дослідного поля забезпечити випробування з різними нормами.

Загалом було виділено 42 зони розміром 15 × 15 м кожна. Розрахунок фактичної подачі насіння здійснювали для чотирьох рядків із міжряддям 2,5 м за сталої швидкості руху 8 км/год із п'ятьма повторностями.

Використання восьми різних норм висіву, від дуже низьких до дуже високих – забезпечує комплексну оцінку роботи контролера в широкому діапазоні умов. Такий підхід дозволяє перевірити здатність системи стабільно подавати задану кількість насіння незалежно від встановленої норми.

Випробування також оцінюють, наскільки ефективно контролер здійснює переходи між різними нормами, перевіряючи стабільність роботи в часі та за різних налаштувань. Крім того,

використання норм, що перевищують або є нижчими за типові робочі значення, фактично виступає стрес-тестом, перевіряючи систему за межами звичайних експлуатаційних параметрів.

У таблиці 3 наведено статистичний аналіз подачі насіння, де стандартне відхилення (STD) знаходиться в діапазоні від 0 до 8,68 кг, коефіцієнт варіації (C.V.) становить 4,59, середньоквадратична похибка (RMSE) – 5,13 кг, середня похибка – 0,85, а коефіцієнт детермінації R^2 – 0,9948, як показано на рис. 11.

Таблиця 3

Статистичний аналіз подачі насіння

Варіант досліджу	Середнє значення	Мінімум	Максимум	Стандартне відхилення (STD)	Коефіцієнт варіації (C.V.), %
Варіант 1	0 кг	0 кг	0 кг	0 кг	0
Варіант 2	48,44 кг	43,95 кг	53,82 кг	4,53 кг	8,38
Варіант 3	75,53 кг	68,17 кг	80,73 кг	6,30 кг	7,48
Варіант 4	95,62 кг	91,49 кг	104,05 кг	6,23 кг	5,84
Варіант 5	129,35 кг	124,68 кг	134,55 кг	4,82 кг	3,34
Варіант 6	142,98 кг	133,65 кг	152,49 кг	7,47 кг	4,69
Варіант 7	158,23 кг	145,31 кг	165,94 кг	8,68 кг	4,92
Варіант 8	226,22 кг	220,66 кг	233,22 кг	5,22 кг	2,07

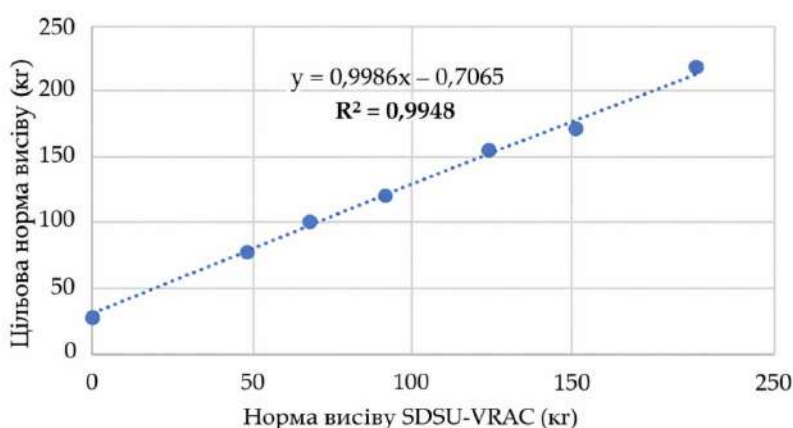


Рис. 11. Графік взаємозв'язку між цільовою нормою висіву та нормою подачі SDSU-VRAC, коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,0994$ для 8 варіантів досліджу

Джерело: розроблено авторами

У межах варіантів досліджу варіант 1 не мав варіації, середня маса становила 0 кг. Для варіанта 2 середня маса становила 48,44 кг у діапазоні від 43,95 до 53,82 кг.

Загалом стандартне відхилення вихідної норми висіву відображає тенденцію до зростання зі збільшенням середньої норми висіву. Це свідчить про те, що зі збільшенням норми висіву варіативність також має тенденцію до зростання. Однак у варіантах 5 і 8 демонструють значні відхилення від цієї тенденції, характеризуючись нижчими за очікувані значення стандартного відхилення. Ці винятки можуть бути зумовлені специфічними експлуатаційними факторами, пов'язаними з в'язкістю насіння пшениці та швидкістю обертання висівного колеса за певних умов роботи. Однією з можливих причин таких відхилень є динаміка руху насіння, що змінюється при підвищенні робочої швидкості.

За певних вищих швидкостей в'язкість насіння може взаємодіяти з висівним колесом непередбачуваним чином. При збільшенні швидкості обертання висівного колеса насіння може зазнавати підвищеного опору руху або тертя, що впливає на рівномірність проходження через висівний отвір.

Крім того, швидше обертання висівного колеса може спричиняти нерівномірний потік насіння, коли воно подається з різною інтенсивністю через фізичні збурення та коливання потоку всередині бункера.

Стандартне відхилення середніх вимірних зразків знаходилося в діапазоні від 0 до 8,68 кг, як наведено в табл. 4. Норма внесення та відповідні похибки системи SDSU-VRAC представлені на рис. 12. Значення похибки змінювалися в межах від -5,51 % до 3,67 %, при середній похибці 2,82 %, що детально показано на рисунку 17а.

Результати для середніх вимірних зразків продемонстрували точність 96,17 % та прецизійність 95,15 %.

Таблиця 4

Результати точності, прецизійності та похибки

Швидкість	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	Середнє
Цільова норма, кг/га	0	50	73	94	129	151	166	220	–
Середнє значення, кг/га	0	48,43	75,52	95,62	129,34	142,98	158,23	226,22	–
STD	0	4,53	6,3	6,23	4,82	7,47	8,68	5,22	1,764
Точність, %	100	96,03	96,33	98,44	99,65	94,49	95,38	97,02	96,17
Прецизійність, %	100	96,4	95	95	96,1	94	93,1	95,8	95,15
Похибка, %	0	-3,97	3,67	1,56	0,35	-5,51	-4,62	2,97	2,83

Примітка: інтенсивність норми висіву відображає градацію інтенсивності подачі насіння.

Похибки вимірювань у порівнянні з цільовими нормами, представленими на рис. 12, становлять: 0 кг для першої норми внесення, 1,98 кг для 50 кг, 2,68 кг для 73 кг, 1,47 кг для 94 кг, 0,4 кг для 129 кг, 8,32 кг для 151 кг, 7,66 кг для 166 кг та 6,55 кг для 220 кг.

Гістограма кластерів, представлена на рис. 12, ілюструє кореляцію між швидкістю руху та часом, необхідним для зміни робочої норми з однієї зони на іншу. При цьому значення $R^2 = 0,505$ свідчить про наявність 50,5 % кореляції між швидкістю та часом реакції системи на зміну норми.

Варіації у часовій відповіді частково обумовлені похибкою вимірювань оператора. В середньому зафіксований час, необхідний для переходу між нормами, становив 0,867 с, із діапазоном відхилень приблизно $\pm 0,3$ с.

На основі ширини аплікатора 63,5 см зміщена цільова норма (кг) унаслідок затримки часової відповіді коливалася в межах від 0 до 0,13 кг. Відповідні зміщення по дистанції становили 2,22; 3,06; 4,44; 5,28; 6,67 та 8,89 м для швидкостей 8, 11, 16, 19, 24 та 32 км/год відповідно.

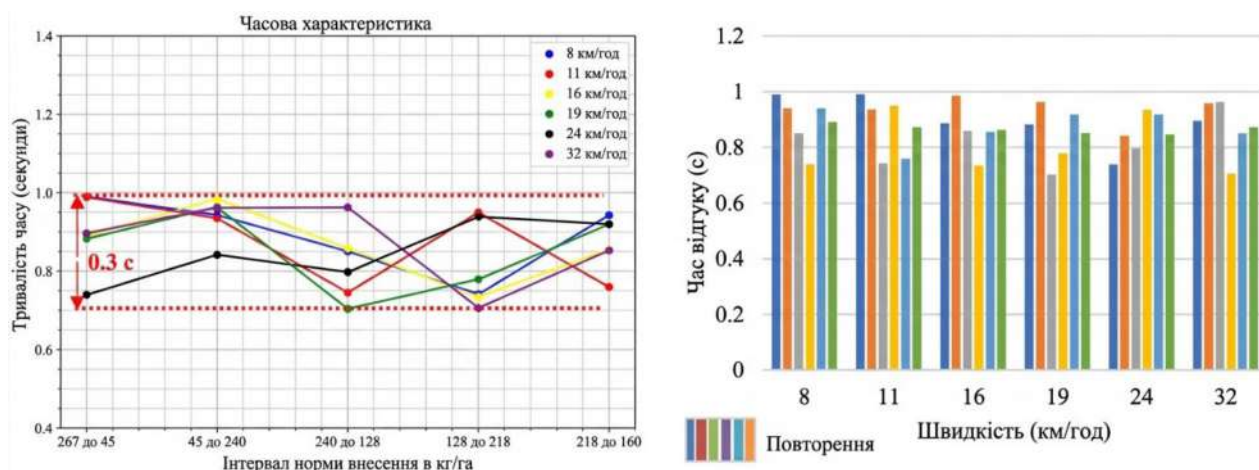


Рис. 12. Часова відповідь

У практичних застосуваннях часова відповідь визначає швидкість реакції системи на зміни експлуатаційних умов, таких як варіювання швидкостей під час сівби або внесення добрив. Затримки у часі при різних швидкостях можуть призвести до нерівномірного внесення матеріалів (насіння, добрив), що спричиняє локальні диспропорції в розподілі посівів, нераціональне використання ресурсів та, як наслідок, зниження врожайності.

Висновки. Контролер системи демонструє високу надійність з точністю 96,17 %, прецизійністю 95,15 % та низьким рівнем похибки 2,82 %, що підтверджує стабільну та ефективну роботу. Затримки часової відповіді призводять до незначних зміщень цільових норм у межах від 0 до 0,13 кг та відстаней від 2,22 до 8,89 м при швидкостях від 8 до 32 км/год. Ці результати підтверджують здатність системи підтримувати високу точність і ефективність при різних швидкостях експлуатації.

Дослідження представляють внесок у сферу точного землеробства через розробку та оцінку низьковартісного, модернізованого контролера аплікатора змінної норми (VRAC), створеного як відкрита платформа для широкого впровадження. Основні результати показують, що контролер досягає точності та прецизійності 97,17 % та 95,15 % відповідно при дозуванні насіння, з середньоквадратичною помилкою (RMSE) 4,57 кг, коефіцієнтом варіації 4,59 % та середньою похибкою 2,83 %. Система також демонструє середній час реакції 0,836 с при зміні норм на різних швидкостях.

Дослідження сприяє впровадженню ефективних та зручних технологій точного землеробства, забезпечуючи їх доступність для фермерів із обмеженими ресурсами. Подальші роботи будуть спрямовані на інтеграцію мобільних рішень для моніторингу в реальному часі та розширення застосування системи для більш широкого спектра культур та польових умов.

Список використаних джерел

1. United States Department of Agriculture-National Agricultural Statistics Service. 2021 Agricultural Chemical Use Highlights. 2024.
2. Huang J. X., Zhou H. B., Wang J. F., Hou Y. Research on variable rate fertilization control system based on fuzzy PID. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 614. P. 207–210. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.614.207
3. Abdalla A., Mirzakhani Nafchi A. Development and evaluation of an affordable variable rate applicator controller for precision agriculture. *AgriEngineering*. 2025. Vol. 6, No. 4. P. 4639–4657. DOI: 10.3390/agriengineering6040265
4. Tang X. Y., Chen Y. Z., Peng Y. K., Wang X., Xu Y., Yang W. L., Wang W. A DSP based control system for precision variable rate fertilization. *Advanced Materials Research*. 2012. Vol. 605–607. P. 1408–1414. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.605607.1408
5. Su N., Xu T. S., Song L. T., Wang R. J., Wei Y. Y. Variable rate fertilization system with adjustable active feed roll length. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2015. Vol. 8, No. 4. P. 19–26. DOI: 10.3965/j.ijabe.20150804.1644
6. Zhang J. C., Hou S. Y., Wang R. T., Ji W. Y., Zheng P., Wei S. Design of variable rate liquid fertilization control system and its stability analysis. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2018. Vol. 11, No. 1. P. 109–114. DOI: 10.25165/j.ijabe.20181101.2583
7. Smith R., et al. Development and performance evaluation of a control system for variable rate granular fertilizer application. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. Vol. 160. P. 31–39. DOI: 10.1016/j.compag.2019.03.011
8. McFadden J., Njuki E., Griffin T. Precision agriculture in the digital era: Recent adoption on US farms. In *Economic Information Bulletin*; United States Department of Agriculture, Economic Research Service: Washington, DC, USA, 2023.
9. Askarzadeh Y., Jones E., Sahraei M., Abdalla A., Nafchi A. M. Sustainable Weed Management through Precision Cover Cropping System. In *Proceedings of the 2024 ASABE Annual International Meeting*, Anaheim, CA, USA, 28–31 July 2024; American Society of Agricultural and Biological Engineers: St. Joseph, MI, USA, 2024. P. 1.
10. Schimmelpfennig D. Crop production costs, profits, and ecosystem stewardship with precision agriculture. *J. Agric. Appl. Econ.* 2018. Vol. 50. P. 81–103.

11. Coelho A. L. D. F., de Queiroz D. M., Valente D. S., Pinto F. A. Development of a variable-rate controller for a low-cost precision planter. *Appl. Eng. Agric.* 2020. Vol. 36. P. 233–243.
12. Maleki M. R., Mouazen A. M., De Ketelaere B., Ramon H., De Baerdemaeker J. On-the-go variable-rate phosphorus fertilisation based on a visible and near-infrared soil sensor. *Biosyst. Eng.* 2008. Vol. 99. P. 35–46.
13. Kempenaar C., Been T., Booij J., Van Evert F., Michielsen J. M., Kocks C. Advances in variable rate technology application in potato in the Netherlands. *Potato Res.* 2017. Vol. 60. P. 295–305.
14. English B. C., Mahajanashetti S. B., Roberts R. K. Assessing spatial break-even variability in fields with two or more management zones. *J. Agric. Appl. Econ.* 2001. Vol. 33. P. 551–565.

Дата першого надходження статті до видання: 29.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



M. Zayets¹, P. Pohrebniichenko²

¹ Polissia National University

² “Zhytomyr Polytechnic” State University

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF A SPRAYER WITH A DOSAGE RATE CONTROLLER AT VARIABLE OPERATING SPEED

Summary

Spatial heterogeneity of agro-physical and agro-chemical soil properties is one of the key challenges of modern agriculture, as it leads to uneven plant development, inefficient use of fertilizers and other resources, and may reduce production economic efficiency. In modern agrotechnology development, particular importance is given to the implementation of intelligent process control systems that allow adapting material application rates to the actual conditions of each field zone.

The development of low-cost and technically accessible devices for implementing precision agriculture principles is an important task, since the high cost of commercial systems often limits their use among small and medium-sized producers. The proposed Variable Rate Applicator Controller (VRAC) is aimed at reducing the financial cost of technology implementation by using an open hardware architecture and affordable electronic components.

The system is based on the Raspberry Pi platform and uses an RTK-compatible Global Navigation Satellite System to ensure high-precision positioning of the machine in field conditions. Additionally, a wheel encoder is used to measure travelled distance and calculate instantaneous movement speed while minimizing slip error, enabling accurate determination of motor rotation speed (RPM).

The Raspberry Pi platform processes input data and implements dynamic control algorithms for material application rates according to predefined prescription maps. Experimental results showed that the average switching time between application rates (from 267 to 45; from 45 to 241; from 241 to 128; from 128 to 218; from 218 to 160 kg/ha) is 0.864 s at operating speeds of 8, 11, 16, 19, 24, and 32 km/h.

The average coefficient of variation of system performance is 4.59, the control accuracy is 97.17 %, and the root mean square error (RMSE) is 4.57. The coefficient of determination R^2 is 0.994, indicating a high agreement between the set and actual parameter values. The average standard deviation of seeding rate is 1.76 kg.

The modular plug-and-play architecture allows the controller to be integrated into existing agricultural machinery without significant structural modification. This provides opportunities for gradual technical modernization of farms and promotes the wider adoption of digital technologies in agricultural production.

Therefore, the affordability of the proposed solution, high system accuracy, and the possibility of upgrading existing machinery make the developed controller a promising tool for improving technological process efficiency and ensuring environmentally safe and sustainable agricultural development.

Keywords: precision agriculture, variable rate application, VRAC controller, Raspberry Pi, GNSS positioning, stepper motor, automated control, variable rate seeding, agrotechnological systems.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-6>

УДК 631.312

М. Б. Клендій, канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0001-8271-5381

А. П. Драган, канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0001-7195-1127

*Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України
«Бережанський агротехнічний інститут»*

e-mail: dragan1402@ukr.net

ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКТИВНИХ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ БОРОНИ З ГВИНТОВИМИ РОБОЧИМИ ОРГАНАМИ

Анотація. У статті досліджено процес оптимізації конструктивних і технологічних параметрів борони з гвинтовими робочими органами. Обґрунтовано використання узагальненого критерію ефективності та побудовано регресійну модель, що описує залежність якості заробляння рослинних решток від основних факторів: глибини обробітку, кута атаки та кроку гвинтового органу. Експериментальні дослідження дозволили встановити закономірності впливу зазначених параметрів та визначити їх оптимальні значення. Доведено, що найбільший вплив має глибина обробітку та кут атаки, тоді як крок гвинтового органу є менш значущим фактором.

Ключові слова: поживні залишки, кут атаки, борона, гвинтовий робочий орган, ґрунтообробна машина, глибина обробітку ґрунту.

Постановка проблеми. Підвищення ефективності використання поживних залишків як джерела органічної речовини є актуальним завданням сучасного землеробства. Існуючі ґрунтообробні знаряддя не завжди забезпечують належну якість їх подрібнення та рівномірного заробляння в ґрунт при одночасному дотриманні вимог щодо енерго- та матеріалоемності. Особливо це стосується машин із новими конструктивними рішеннями, зокрема гвинтовими робочими органами, для яких відсутні достатньо обґрунтовані методики вибору раціональних параметрів. Недостатня обґрунтованість конструктивних і технологічних параметрів призводить до зниження якості обробітку ґрунту та ефективності технологічного процесу. У зв'язку з цим виникає необхідність оптимізації параметрів борони з гвинтовими робочими органами з урахуванням умов їх роботи та агротехнічних вимог.

Аналіз останніх досліджень. Аналіз наукових джерел показує, що значна увага приділяється дослідженню дискових ґрунтообробних знарядь, зокрема впливу конструктивних параметрів і режимів роботи на якість обробітку та енергетичні показники процесу [1, 5, 7, 10, 13, 14, 15, 20]. Розглянуто питання визначення тягового опору, оптимізації глибини обробітку та швидкісних режимів [6, 12, 15, 16]. Окремі роботи присвячені зниженню енергоемності та підвищенню ефективності комбінованих агрегатів [2, 3, 17, 18]. Водночас дослідження гвинтових робочих органів представлені обмежено і стосуються переважно їх конструкції та окремих процесів взаємодії з матеріалом [4, 8, 9, 11, 22, 23]. Питання комплексної оптимізації їх конструктивних і технологічних параметрів з урахуванням якості заробляння поживних залишків висвітлені недостатньо.

Формулювання мети статті. Метою цього дослідження було покращення якості подрібнення половини та інших рослинних залишків і їх внесення в ґрунт як органічних добрив шляхом оптимізації конструктивних та технологічних параметрів борони зі гвинтовими робочими органами, які працюють під час основного обробітку ґрунту.

Основна частина. Для проведення експериментальних досліджень застосовувалась спеціально виготовлена установка на базі розробленої борони з гвинтовими робочими органами. На даній установці проводились дослідження функціональних та експлуатаційних параметрів борони з різними конструктивними виконаннями та типорозмірами гвинтових робочих органів, їх взаємного розташування та положення відносно напрямку руху.

Борона з гвинтовими робочими органами (рис. 1) [21] складається з рами 1 із автозчепленням 2, ґрунтообробних батарей з гвинтовими робочими органами 3, що складаються з каркасу 4, поверх якого закріплені витки гвинтового робочого органу 5, а до складу каркасу входять два диски 6, до яких прикріплені підшипникові опори 7 із віссю з різьбою 8 та гайками 9, що з'єднані один з одним за допомогою шести прутків 10, що симетрично прикріплені по периферії дисків 6 з однаковою відстанню, направляючими 11 і 12, хомутів 13 із кріпильними елементами 14 (пристрій фіксації кута атаки), рамок батарей 15 з віссю 16.

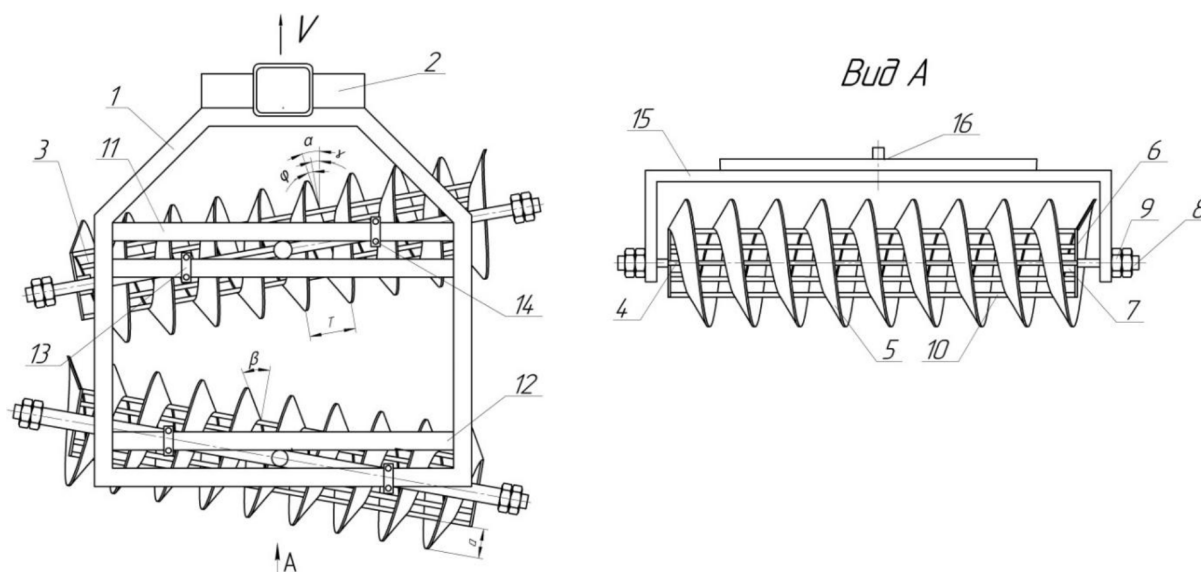


Рис. 1. Борона з гвинтовими робочими органами

Описана борона з гвинтовими робочими органами працює аналогічно бороні з дисковими органами. У момент контакту леза з поверхнею поля присутні кути, подібні до кута атаки та кута крену звичайних дискових органів. Кут нахилу можна змінювати, змінюючи кут нахилу прямолінійної твірної відносно осі гвинтової поверхні. Розроблений новий ґрунтообробний робочий орган має просту конструкцію та низьку металоємність. На відміну від дискових органів, він не потребує окремих підшипникових вузлів для встановлення окремих ґрунтообробних дисків. Гвинтові робочі органи монтуються з використанням лише двох підшипникових вузлів на кінцях кожної секції.

Для оптимізації конструктивних та технологічних параметрів борони з гвинтовими робочими органами необхідно вирішити адекватну задачу оптимізації, яка є багатокритеріальною задачею, і в якій критеріями оптимізації є: трудомісткість виконання супутніх технологічних операцій F_{01} ; енерговитрати F_{02} ; матеріалоємність F_{03} . За комплексний критерій F_0 можна прийняти суму вартісного еквіваленту кожного використаного ресурсу [16]:

$$F_0 = \varepsilon_1 \cdot F_{01} + \varepsilon_2 \cdot F_{02} + \varepsilon_3 \cdot F_{03}, \quad (1)$$

де ε_1 , ε_2 , ε_3 — коефіцієнти вагомості кожної зі складових, які по суті визначаються вартістю відповідних зекономлених ресурсів (трудомісткості, енергоємності та матеріаломісткості).

За основні параметри оптимізації, тобто за незалежні змінні при оптимізації конструктивних і технологічних параметрів гвинтового робочого органу приймемо такі як і у ГК [22]: $x_1 = D$ – зовнішній діаметр робочого органу; $x_2 = H$ – висота спіралі гвинтового робочого органу; $x_3 = \tan \alpha = p_k / (\pi \times D)$ – тангенс кута підйому витка, що визначається кроком гвинтової спіралі p_k ; $x_4 = \lambda$ – коефіцієнт форми гвинтової поверхні, який враховує наявність вирізів гвинтової спіралі та їх форму, кількість і розміри; $x_5 = \beta$ – кут атаки робочого органу; $x_6 = k_d = d/D$ – коефіцієнт, що оцінюється відношенням внутрішнього d і зовнішнього D діаметрів гвинтової спіралі; $x_7 = B$ – товщина гвинтової спіралі; $x_8 = L$ – довжина гвинтового робочого органу.

Як приклад, виконання технологічної операції, візьмо одну із найбільш поширених – кришення ґрунту та пожнивних решток. За критерій оптимізації приймемо якість заробляння (площа поверхні поля з повним зароблянням рослинних решток, %), що для кожного конструктивного виконання буде різною і залежатиме від параметрів x_i :

$$F_{01} = F_{01}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_8) \rightarrow \min. \quad (2)$$

В загальному випадку такі технологічні операції важко піддаються формалізованому опису і оптимізацію гвинтового робочого органу за даним критерієм, як правило, проводять за реалізацією математичного планування експерименту.

Цільову функцію, в цьому випадку, представляють у вигляді квадратного поліному:

$$F_{01} = b_0 + \sum b_i \cdot x_i + \sum b_{il} \cdot x_i \cdot x_l + \sum b_{ii} \cdot x_i^2 \quad (3)$$

На зміну параметрів x_i накладаються обмеження $f_j = f_j(x_i)$, які в загальному вигляді записують у вигляді $f_i \leq 0$. Для випадку математичного планування експерименту, як правило, обмежуються нижні та верхні значення зміни факторів, тобто $x_{\min} \leq x_i \leq x_{\max}$.

Експериментальне дослідження ефективності процесу заробляння рослинних решток у ґрунт (що передбачає визначення відсотка площі поверхні ділянки поля S з повністю вробленими рослинними рештками, %) було проведено в польових умовах під час обробітку стерні пшениці. Ґрунт мав такі властивості: тип ґрунту – сірий опідзолений, значення міцності на роздавлювання (твердість) – $87,4 \text{ кН м}^{-2}$, абсолютна вологість – 18 %, щільність ґрунту – $1,6 \text{ кг м}^{-3}$. Борона з шнековими робочими органами під час польових експериментальних досліджень показана на рис. 2, а технічну характеристику борони з гвинтовими робочими органами представлено в таблиці 1.

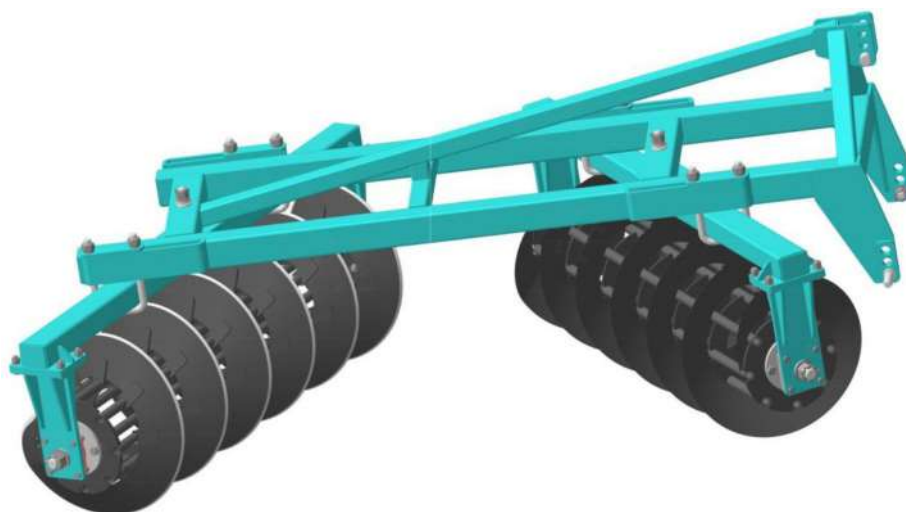


Рис. 2. Загальний вигляд борони з гвинтовими робочими органами

Таблиця 1

Технічна характеристика бороны з гвинтовими робочими органами

Параметр	Значення
Конструктивна ширина захвату, м	1,3
Необхідна потужність трактора, к.с.	від 25
Агрегатування з трактором	начіпне
Маса, кг	272
Кількість витків гвинтової поверхні, шт	10
Зовнішній діаметр гвинтової поверхні, мм	562–570
Глибина обробітку, см	6–12
Робоча швидкість, км/год	7...17
Габаритні розміри в транспортному положенні ($L \times B \times H$).	2090 × 1430 × 1250

Обробіток ґрунту проводився бороною із гвинтовими робочими органами, в якій почергово, після обробітку певної ділянки (площею приблизно 100 м²), замінювали робочі органи (різних конструкцій і типорозмірів) та проводили переналагодження їх відносно напрямку руху.

Програма експериментальних досліджень передбачала проведення досліджень зміни величини відсотка площі поверхні ділянки поля з повним зароблянням рослинних решток ξ від величини кута розміщення батареї гвинтових робочих органів відносно напрямку руху (кута атаки β), величини кроку гвинтового робочого органу T та глибини обробітку h . Для одержання значень досліджуваної величини використовували пікові (максимальні) значення, отримані в результаті досліджень даних.

Оцінка ефективності заробляння рослинних решток виконувалась методом спектрального аналізу інформації, одержаної із серії фотознімків, зроблених з висоти 10 м (при забезпеченні повздовжнього перекриття знімків не менше 60 % відповідно до вимог фотограмметрії [24]), камерою квадрокоптера моделі DJI Phantom 4 шляхом обробки результатів знімання та побудови картографічних матеріалів у комп'ютерній програмі Agisoft Photoscan. Для визначення відсотка площі поверхні ділянки поля з повним зароблянням рослинних решток використовувалась геоінформаційна система (ГІС) QGIS 3, у якій виконувалась керована класифікація поверхні ґрунту методом навчальної вибірки.

Для кожного з факторів експеримент проводився не менше 3 разів, після чого визначалося середнє значення результату, яке використовувалось для подальшого статистичного оброблення результатів експерименту.

Таблиця 2

Результати кодування факторів та рівні їх варіювання при дослідженні з визначення площі поверхні поля з повним зароблянням рослинних решток бороною з гвинтовими робочими органами

Фактори	Позначення		Інтерв. варіюв.	Рівні варіювання, натур./кодовані		
	Код.	Натур.				
Кут атаки робочого органу β , град	X_1	x_1	10	20/–1	30/0	40/+1
Величина кроку гвинтового робочого органу T , м	X_2	x_2	0,04	0,18/–1	0,22/0	0,26/+1
Глибина обробітку, h , м	X_3	x_3	0,02	0,08/–1	0,1/0	0,12/+1

Для визначення впливу конструктивних та технологічних параметрів гвинтових робочих органів бороны (незалежних факторів x_i) на величини відсотка площі поверхні ділянки поля з повним зароблянням рослинних решток ξ проведено повнофакторні експерименти, тобто визначення відсотка площі поверхні поля з повним зароблянням рослинних решток ξ , % від зміни трьох основних факторів: кута атаки робочого органу β , град., величини кроку гвинтового робочого органу T , м та глибини обробітку h , м, тобто $\xi = f(\beta, T, h)$, які наведено таблиці 2.

Після кодування факторів складали план-матрицю відповідного багатофакторного експерименту типу ПФЕ 3^3 для числа дослідів .

Загальний вигляд рівняння регресії відсотка площі поверхні поля з повним зароблянням рослинних решток залежно від зміни кута атаки робочого органу β , величини кроку гвинтового робочого органу T та глибини обробітку h , тобто, $\xi = f(\beta, T, h)$ має вигляд:

$$\xi = 81.205 - 33.33T - 245.32h + 2.84\beta h + 1639.61h^2. \quad (4)$$

Отримане рівняння регресії (4) може використовуватись для визначення відсотка площі поверхні поля з повним зароблянням рослинних решток ξ , % від зміни трьох основних факторів: кута атаки робочого органу β , величини кроку гвинтового робочого органу T та глибини обробітку h , при обробітку ґрунту в таких межах зміни вхідних факторів: $20 \leq \beta \leq 40$ (град); $0,18 \leq T \leq 0,26$ (м); $0,08 \leq h \leq 0,12$ (м).

За допомогою програмного забезпечення Statistica-6.0 побудовано графічне відтворення проміжних загальних регресійних моделей у вигляді квадратичних поверхонь відгуку відсотка площі поверхні поля з повним зароблянням рослинних решток ξ , як функцію від двох змінних факторів $x_{i(1,2)}$, за постійного незмінного рівня відповідного третього фактора $x_{i(3)} = \text{const}$.

Аналіз отриманого регресійного рівняння показує, що найбільший вплив на зміну відсотка площі поверхні поля з повним зароблянням рослинних решток ξ , чинять фактори x_3 , x_1 , (h , β) та комбінації цих факторів. Збільшення величини фактора $x_3(h)$ призводить до збільшення відсотка площі поверхні поля з повним зароблянням рослинних решток на 7,4 %. В загальному, для збільшення відсотка площі поверхні поля з повним зароблянням рослинних решток, необхідно збільшувати глибину обробітку і величину кута атаки та зменшувати крок гвинтового робочого органу.

Згідно отриманих рівнянь регресії побудовано поверхні відгуку від зміни двох двох змінних факторів $x_i(1, 2)$ при постійному незмінному рівні відповідного третього фактора $x_i(3) = \text{const}$.

Графічні значення результатів залежності зароблянням рослинних решток ξ , одержаної з використанням Statistica-6.0 наведено на рисунках 3–5.

З поверхонь відгуків (рис. 3 – 5) видно, що із збільшенням глибини обробітку величина відсотка площі поверхні поля з повним зароблянням рослинних решток зростає і найбільше

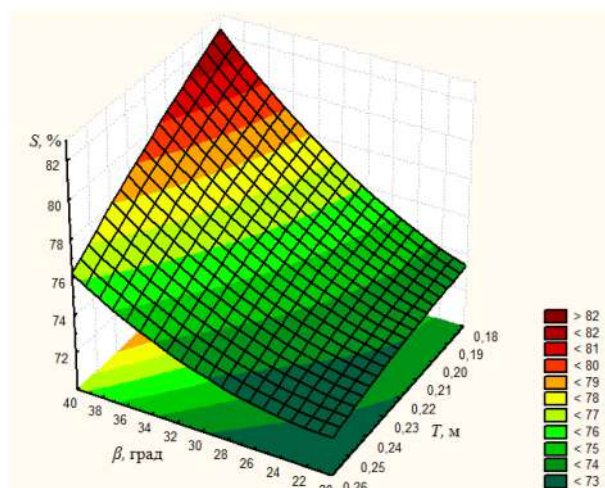


Рис. 3. Поверхня відгуку залежності відсотка площі поверхні поля з повним зароблянням рослинних решток $S = f(\beta, T)$ від зміни кута атаки робочого органу β та величини кроку гвинтового робочого органу T ($h = 0,1$ м)

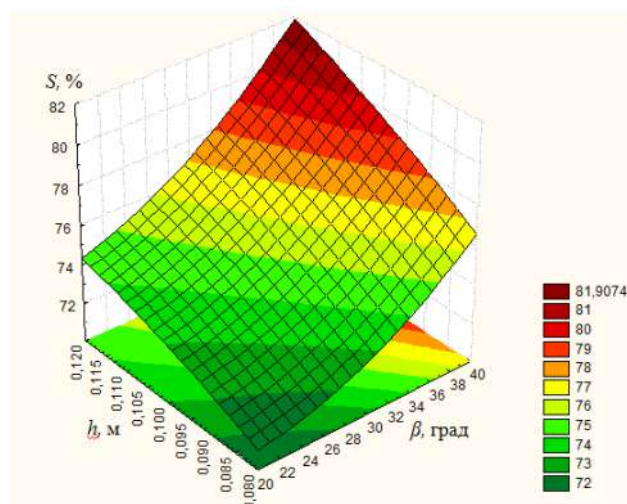


Рис. 4. Поверхня відгуку залежності відсотка площі поверхні поля з повним зароблянням рослинних решток $S = f(\beta, h)$ від зміни кута атаки робочого органу β та глибини обробітку h ($T = 0,22$ м)

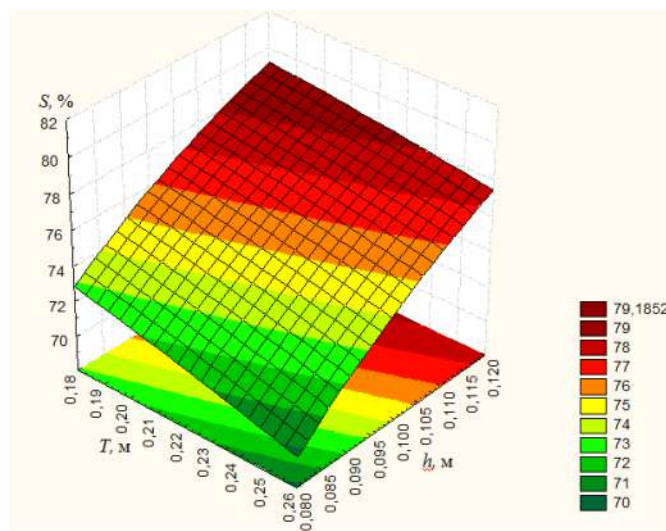


Рис. 5. Поверхня відгуку залежності відсотка площі поверхні поля з повним зароблянням рослинних решток $S = f(T, h)$ величини кроку гвинтового робочого органу T та глибини обробітку h ($\beta = 30$ град)

значення становить 84 %. Мінімальне значення відсотка площі поверхні поля з повним зароблянням рослинних решток складає 67 % при мінімальному куті атаки і максимальному кроці гвинтового робочого органу.

Встановлено, що збільшення кроку гвинтового робочого органу T з 0,18 м до 0,26 м призводить до зменшення частки площі поверхні поля S , з повним зароблянням рослинних решток, на 1,4 %. Водночас збільшення кута атаки гвинтового робочого органу β з 20° до 40° призводить до збільшення відсотка площі поверхні поля S з повністю заробленими рослинними рештками на 5,6 %. Збільшення глибини обробітку ґрунту h з 0,08 м до 0,12 м призводить до збільшення площі поверхні поля S з повністю заробленими рослинними рештками на 7,1 %. Одночасне збільшення глибини обробітку h та кута атаки β призводить до збільшення площі поверхні поля S з повністю заробленими рослинними рештками з 72 % до 82 %.

Висновки. Розроблено нову конструкцію борони із гвинтовими робочими органами та виготовлено її дослідний зразок. Конструкційні та технологічні параметри борони із гвинтовими робочими органами оптимізовано з метою підвищення родючості ґрунту шляхом внесення половини та інших поживних залишків як органічних добрив під час обробітку ґрунту.

Проведено комплекс експериментальних досліджень. На основі їх результатів отримано регресійні співвідношення, які дозволяють визначити відсоток площі поверхні поля з повним зароблянням рослинних решток бороною із гвинтовими робочими органами. Встановлено, що глибина обробітку ґрунту h має домінуючий вплив на відсоток площі поверхні поля з повним зароблянням рослинних решток S , далі йде кут атаки β батареї гвинтових робочих органів. Найменший вплив має крок T гвинтового робочого органу. Побудовано поверхні відгуку, які відображають співвідношення між відсотком площі поверхні ділянки поля S , на якій рослинні залишки повністю зароблені бороною із гвинтовими робочими органами, та основними факторами впливу. Аналізуючи ці поверхні, встановлено, що збільшення глибини обробітку ґрунту h призводить до зростання відсотка площі поверхні поля S з повним зароблянням рослинних решток, і максимальне значення якого становить 84 %. Мінімальне значення відсотка площі поверхні поля S з повністю заробленими рослинними рештками дорівнює 67 % і досягається за мінімального кута атаки β батареї гвинтових робочих органів та максимального кроку T гвинтового робочого органу.

Список використаних джерел

1. Aykas E., Cakir E. & Gulsoylu E. 2005. The effect of tillage parameters on the performance of the heavyduty offset disk harrow. *Asian J. Plant Sci.* 3, 425–428.
2. Balsari P., Biglia A., Comba L., Sacco D., Eloj Alcatrão L., Varani M., Mattetti M., Barge P., Tortia C., Manzone M., Gay P. & Ricauda Aimonino D. 2021. Performance analysis of a tractor – power harrow system under different working conditions. *Biosystem Engineering* 202, 28–41. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2020.11.0
3. Boson E. S., Verniaev O. V., Smirnov I. I. & Sultan-Shach E. G. 2019. Theory, Construction and Calculation of Agricultural Machines. 2nd Ed., Scientific Publisher, 810 pp. ISBN: 978938839983.
4. Volodymyr Bulgakov, Hryhorij Kaletnik, Oleksandra Trokhaniak, Svitlana Lutkovska, Mykola Klendii, Semjons Ivanovs, Lucretia Popa, Vitalii Yaropud. Investigation of the energy indicators for the surface treatment of soil by a harrow with a screw-type working body. *INMATEH – Agricultural Engineering* 2023. Vol. 71, No. 3. P. 818–833. DOI: 10.35633/inmateh-71-72
5. Bulgakov V., Olt J., Nadykto V., Volskiy V., Polishchuk S., Aboltins A. & Beloiev H. 2021. Theoretical research into directional stability of trailed tandem-type disk harrow. *Agronomy Research* 19(3), 1351–1363. DOI: 10.15159/AR.21.144
6. Bulgakov V., Adamchuk V., Arak M., Nadykto V., Kyurchev V. & Olt J. 2016. Theory of vertical oscillations and dynamic stability of combined tractor-implement unit. *Agronomy Research* 14(3), 689–710.
7. Damanauskas V., Velykis A. & Satkus A. 2019. Efficiency of disc harrow adjustment for stubble tillage quality and fuel consumption. *Soil Tillage Res.* 194, 104311. DOI: 10.1016/J.STILL.2019.104311
8. Javadi A. & Hahiahmad A. 2006. Effect of a New Combined Implement for Reducing Secondary Tillage Operation. *Int. J. Agric. Biol.* 8, 725–727.
9. Klendii M. B. & Klendii O. M. 2016. Verification of the mathematical model of the energy consumption drive for vibrating disc crusher. *INMATEH – Agricultural Engineering* 49(2), 13–20.
10. Kogut Z., Sergiel L. & Zurek G. 2016. The effect of the disc setup angles and working depth on disc harrow working resistance. *Biosyst. Eng.* 151, 328–337. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2016.10.004
11. Pylypaka S., Klendii M. B. & Klendii O. M. 2018. Particle motion on the surface of a concave soil-tilling disk. *Acta Polytechnica* 58(3), 201–208. DOI: 10.14311/AP.2018.58.0201
12. Macmillan R.H. 2002. The Mechanics of Tractor Implement Performance. Theory and Worked Examples. University of Melbourne, 165 pp.
13. Ranjbar I., Rashidi M., Lehmalı H. F., Mirmoradi M. & Abdolalizadeh E. 2013. Modeling of double action disc harrow draft force based on tillage depth and forward speed. *Middle East J. Sci. Res.* 17, 1061–1067.
14. Salokhe V.M., Soni P., Nalavade P.P. & Niyamapa T. 2010. Performance of Free Rolling and Powered Tillage Discs. *Soil Tillage Research* 109, 87–93. DOI: 10.1016/j.still.2010.05.004
15. Serrano J. M., Peca J. O., Marques da Silva J., Pinherio A. & Carvalho M. 2007. Tractor energy requirements in disk harrow systems. *Biosyst. Eng.* 98, 286–296. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2007.08.002
16. Macmillan R.H. 2002. The Mechanics of Tractor Implement Performance. Theory and Worked Examples. University of Melbourne, 165 pp.
17. Upadhyay G. & Raheman H. 2018. Performance of combined offset disc harrow (front active and rear passive set configuration) in soil bin. *Journal of Terramechanics* 78, 27–37. DOI: 10.1016/j.jterra.2018.04.002
18. Upadhyay G. & Raheman H. 2019. Specific draft estimation model for offset disc harrows. *Soil and Tillage Research* 191, 75–84. DOI: 10.1016/j.still.2019.03.021
19. Zhuk A.F. & Sokht K.A. 2018. Arrangement of Spherical Disks for Frontal Harrows. *Agric. Mach. Technol.* 12, 41–43. DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-4-53-56
20. Zubko V., Sokolik S., Khvorost T. & Melnyk V. 2021. Factors affecting quality of tillage with disc harrow. *Engineering for Rural Development* 20, 1193–1199. DOI: 10.22616/ERDev.2021.20.TF262
21. Патент на корисну модель № 133362 Борона з гвинтовими робочими органами Україна МПК (2019.01) A01B 25/00 № а 201702099 Заявл. 6.03.2017 Опубл. 10.03.2019 Бюл. № 7.
22. Pylypaka S. F., Klendii M. B., Nesvidomin V. M., Trokhaniak V. I. Particle motion over the edge of an inclined plane that performs axial movement in a vertical limiting cylinder. *ACTA POLYTECHNICA Journal of Advanced Engineering*, is a peer-reviewed scientific journal published by the Czech Technical University (CTU) in Prague, Volume 59 Issue 3, pg. 67–78, 2019.



23. Volodymyr Bulgakov, Ivan Holovach, Mykola Klendii, Oleksandra Trokhaniak, Yevhen Ihnatiev, Olha Dubrovina. Experimental study of the driving resistance of a harrow with screw working bodies. *MECHANIZATION IN AGRICULTURE & CONSERVING OF THE RESOURCES 2023 SOFIA, BULGARIA*. P. 86–89.

24. Фотограмметрія: Навчальний посібник / Ю. Г. Кордуба, Є. І. Смірнов. К., 2007. 256 с.

Дата першого надходження статті до видання: 29.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



M. Klendiy, A. Drahan
Separated Subdivision of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
“Berezhany Agrotechnical Institute”

OPTIMIZATION OF STRUCTURAL AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF A HARROW WITH SCREW WORKING BODIES

Summary

The article addresses the problem of optimizing the design and technological parameters of a harrow with screw-type working bodies intended for efficient soil tillage and incorporation of crop residues. The expediency of using a generalized efficiency criterion, which takes into account labor intensity, energy consumption, and material consumption, is substantiated. To assess the quality of the technological operation, the indicator of the percentage of the field surface area with complete incorporation of plant residues is used. Experimental studies were carried out under field conditions using a developed harrow design. The influence of the main factors – tillage depth, angle of attack of the working body, and pitch of the screw helix – on the efficiency of the technological process was determined. Based on the mathematical design of experiments, a regression model in the form of a quadratic polynomial was obtained, which adequately describes the dependence of the quality indicator on the studied parameters within the specified variation ranges. It was established that the greatest influence on the quality of incorporation of plant residues is exerted by the tillage depth, as well as the angle of attack of the screw working bodies. An increase in tillage depth and angle of attack leads to an increase in the proportion of the field area with fully incorporated residues, whereas an increase in the screw pitch results in a slight decrease in this indicator. Response surface plots were obtained, reflecting the interaction of factors and enabling the determination of rational operating parameters of the harrow. Based on the research results, optimal parameter ranges were established, ensuring maximum tillage quality.

Keywords: crop residues, angle of attack, harrow, screw working body, tillage machine, tillage depth.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-7>

УДК 631.22:697.94:621.577

О. С. Ковязін, канд. техн. наук

А. І. Панченко, д-р техн. наук

І. О. Чижиков, канд. техн. наук

О. О. Дереза, канд. техн. наук

С. В. Дереза, ст. викладач

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного
e-mail

ORCID: 0000-0002-3027-872X

ORCID: 0000-0002-1230-1463

ORCID: 0000-0002-3022-4828

ORCID: 0000-0003-2652-9853

ORCID: 0000-0001-9797-0967

ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ ВЕНТИЛЯЦІЇ ТА ТЕПЛООВОГО НАСОСА ҐРУНТ-ВОДА ДЛЯ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТВАРИННИЦЬКИХ ПРИМІЩЕНЬ

Анотація. У статті здійснено порівняльну оцінку геотермальної вентиляції та теплового насоса ґрунт-вода як альтернативних систем енергозабезпечення тваринницьких приміщень. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю зниження енергоспоживання, скорочення експлуатаційних витрат і забезпечення нормативних параметрів мікроклімату в умовах зростання вартості енергоресурсів та посилення екологічних вимог до аграрного виробництва. Метою роботи є обґрунтування доцільності використання геотермальної вентиляції шляхом її порівняння з тепловим насосом ґрунт-вода за ключовими технічними, енергетичними, економічними, експлуатаційними та екологічними характеристиками. Методичною основою дослідження є аналітичний огляд літературних джерел з подальшим узагальненням результатів за сімома критеріями ефективності: охолодження повітря, нагрівання повітря, енергоефективність, економічна ефективність, термін служби, вплив конденсату на роботу системи та екологічність. Результати порівняння подано у вигляді графічної моделі, що дає змогу інтегрально відобразити сильні та слабкі сторони досліджуваних технологій. Встановлено, що геотермальна вентиляція має переваги за показниками енергоефективності, економічної ефективності, тривалості експлуатації та екологічної безпечності, що зумовлено пасивним принципом її функціонування, конструктивною простотою та відсутністю холодоагентів. Водночас тепловий насос ґрунт-вода забезпечує кращі результати щодо стабільного підтримання температурного режиму впродовж року та ефективнішого контролю процесів, пов'язаних з утворенням конденсату. Обґрунтовано, що для більшості тваринницьких приміщень геотермальна вентиляція є більш доцільним рішенням з огляду на нижчі витрати, простоту експлуатації та вищу екологічну безпечність, тоді як тепловий насос ґрунт-вода слід розглядати як ефективнішу, але більш капіталомістку альтернативу для об'єктів із підвищеними вимогами до гарантованого цілорічного підтримання мікроклімату.

Ключові слова: альтернативне енергозабезпечення, ґрунтово-повітряний теплообмінник, мікроклімат, енергоефективність, економічна ефективність, екологічна безпечність.

Постановка проблеми. Енергозабезпечення тваринницьких приміщень є одним із ключових чинників забезпечення стабільної продуктивності галузі, оскільки параметри мікроклімату безпосередньо впливають на фізіологічний стан тварин, рівень їх продуктивності, збереженість поголів'я та економічні результати господарства. Особливої важливості це набуває в умовах зростання вартості традиційних енергоресурсів, посилення вимог до енергоефективності виробництва та необхідності зменшення екологічного навантаження від експлуатації інженерних систем [1, 2].

У практиці тваринництва підтримання нормативної температури й повітрообміну зазвичай супроводжується значними витратами енергії, особливо в зимовий і літній періоди. Це зумов-

лює потребу у впровадженні альтернативних систем, здатних забезпечити зниження енергоспоживання без погіршення умов утримання тварин. Серед таких рішень перспективними є системи, що використовують тепловий потенціал ґрунту, зокрема геотермальна вентиляція на основі ґрунтово-повітряного теплообмінника та тепловий насос ґрунт-вода [3–5].

Разом із тим вибір між зазначеними технологіями не є однозначним. Тепловий насос ґрунт-вода забезпечує високу керованість і здатність стабільно підтримувати нормативний температурний режим упродовж року, проте характеризується значними капітальними витратами, складністю монтажу та залежністю від активного енергоспоживання [1, 6, 7]. Геотермальна вентиляція, навпаки, є конструктивно простішою, дешевшою в експлуатації та екологічно безпечнішою, однак її ефективність залежить від сезонних умов і не завжди є достатньою для повного покриття теплового навантаження в холодний період [5, 8, 16].

Отже, виникає науково-прикладна проблема обґрунтування доцільності використання геотермальної вентиляції як альтернативного рішення для енергозабезпечення тваринницьких приміщень у порівнянні з тепловим насосом ґрунт-вода. Необхідність такого обґрунтування зумовлена тим, що в наукових публікаціях накопичено значний масив даних щодо окремих технічних, енергетичних, економічних та екологічних характеристик обох систем, однак їх узагальнення в контексті потреб тваринницьких приміщень залишається недостатньо систематизованим [1, 3, 5].

У зв'язку з цим актуальним є проведення систематизованого аналітичного огляду літературних джерел з метою узагальнення технічних, енергетичних, економічних, експлуатаційних та екологічних характеристик геотермальної вентиляції і теплового насоса ґрунт-вода. Такий підхід дає змогу сформулювати інтегральну порівняльну модель досліджуваних систем і на цій основі обґрунтувати вибір найбільш доцільного рішення для енергозабезпечення тваринницьких приміщень [1, 3, 5, 8].

Аналіз останніх досліджень. Проблема енергозабезпечення тваринницьких приміщень у сучасних умовах набуває особливої актуальності у зв'язку з необхідністю одночасного забезпечення нормативного мікроклімату, зниження експлуатаційних витрат, підвищення енергоефективності та мінімізації екологічного навантаження. У науковій літературі дедалі більша увага приділяється використанню ґрунтового теплового потенціалу як джерела або акумулятора енергії для систем вентиляції, опалення та охолодження. Серед найбільш досліджених рішень особливе місце займають геотермальна вентиляція, реалізована на основі ґрунтово-повітряних теплообмінників, та тепловий насос ґрунт-вода, який належить до активних систем теплопостачання і холодопостачання [3–5].

Аналіз опрацьованих джерел показує, що обидві технології базуються на використанні відносно стабільної температури ґрунту, однак відрізняються принципом дії, конструктивною складністю, енергетичними показниками, економічними параметрами та експлуатаційними ризиками. Геотермальна вентиляція функціонує переважно як пасивна система, у якій теплота або холод ґрунту безпосередньо передаються припливному повітрю через стінки підземного каналу. Тепловий насос ґрунт-вода, навпаки, є активною системою, де ґрунт виступає низькопотенційним джерелом теплоти або приймачем надлишкового тепла, а необхідний рівень температури забезпечується завдяки роботі компресора, циркуляційного насоса та системи керування [1, 3, 4].

Охолодження повітря. Дослідження ґрунтово-повітряних теплообмінників підтверджують ефективність використання ґрунту як природного холодоакумулятора у теплий період року. Установлено, що пропускання припливного повітря через підземні повітропроводи дає змогу знизити його температуру перед подачею до приміщення, зменшити пікові теплові навантаження та частково покрити потребу в попередньому охолодженні [9–11]. Ефективність такого



охладження визначається довжиною і діаметром каналу, глибиною закладання, швидкістю руху повітря та станом ґрунтового масиву [11–13].

Для теплових насосів ґрунт-вода характерна вища керованість процесу охолодження, оскільки система може працювати як у пасивному, так і в активному режимі. Це забезпечує стабільніше підтримання заданих параметрів внутрішнього середовища за умов екстремально високих зовнішніх температур, однак така перевага досягається за рахунок вищої конструктивної складності та більшого споживання електроенергії [7, 14, 15]. Отже, за критерієм охолодження повітря обидві технології мають високий потенціал, але геотермальна вентиляція вирізняється більшою енергетичною ощадністю, тоді як тепловий насос – вищою керованістю процесу.

Нагрівання повітря. У зимовий період між досліджуваними технологіями проявляється суттєвіша різниця. Геотермальна вентиляція забезпечує попередній підігрів припливного повітря завдяки тепловому потенціалу ґрунту, що є вищим за температуру зовнішнього повітря, і може ефективно згладжувати температурні коливання в міжсезоння [16–18]. Однак за низьких зовнішніх температур її потенціалу не завжди достатньо для гарантованого досягнення нормативного температурного режиму без застосування додаткового догріву [17, 18].

На відміну від неї, тепловий насос ґрунт-вода здатний підтримувати задану температуру в ширшому діапазоні зовнішніх умов, оскільки використовує активне підвищення температурного рівня за допомогою компресорного циклу [4, 15, 19]. Це робить його більш надійним рішенням для зимового періоду, особливо коли потрібне гарантоване цілорічне підтримання нормативних параметрів мікроклімату.

Енергоефективність. Порівняння енергоефективності двох систем потребує обережного тлумачення, оскільки для пасивних та активних технологій використовуються різні підходи до оцінювання ефективності. Для геотермальної вентиляції характерним є дуже низьке власне енергоспоживання, оскільки електроенергія витрачається переважно на переміщення повітря вентиляторами, тоді як тепловий ефект формується завдяки природному теплообміну з ґрунтом [8, 11, 20]. Саме тому такі системи часто розглядаються як надзвичайно вигідні з точки зору співвідношення між отриманим тепловим або холодним ефектом і прямими витратами електроенергії [20, 21].

Теплові насоси ґрунт-вода також демонструють високі показники енергоефективності та часто перевершують повітряні теплові насоси завдяки стабільнішій температурі джерела [3, 4, 19]. Водночас їхня робота завжди пов'язана з витратами електроенергії на компресор, насоси та автоматику, тому з позиції мінімізації прямих енерговитрат геотермальна вентиляція часто виявляється більш вигідною.

Економічна ефективність. Економічні аспекти використання ґрунтових енергетичних технологій є одним із ключових критеріїв вибору для тваринницьких приміщень. Геотермальна вентиляція характеризується порівняно невисокими капітальними витратами, оскільки її основними елементами є підземні повітропроводи, вентилятори та допоміжна арматура [8, 22, 23]. Водночас експлуатаційні витрати таких систем залишаються мінімальними через відсутність енергоємних елементів активного теплоперетворення [8, 24].

Тепловий насос ґрунт-вода, навпаки, потребує значних початкових інвестицій, пов'язаних із бурінням свердловин або влаштуванням горизонтального колектора, придбанням обладнання, монтажем і налагодженням [1, 6, 7]. Хоча в довгостроковій перспективі високий коефіцієнт перетворення енергії може компенсувати ці витрати, у реальних умовах тваринницьких підприємств стартова вартість і складність монтажу часто стають стримувальним чинником.

Термін служби. У літературі підкреслюється, що довговічність систем, які використовують ґрунтовий тепловий потенціал, суттєво залежить від конструктивної складності, наявності

рухомих елементів та вимог до сервісного обслуговування. Геотермальна вентиляція має перевагу завдяки простоті конструкції: відсутність компресорного обладнання, холодильного контуру та складної автоматики знижує ризик відмови та підвищує надійність довготривалої експлуатації [8, 25, 26].

Тепловий насос ґрунт-вода також характеризується значним ресурсом роботи, однак наявність компресора, насосного обладнання та систем автоматики зумовлює потребу в регулярному технічному обслуговуванні та періодичній заміні окремих елементів [1, 4, 7]. Саме тому в аспекті строку служби пасивна геотермальна вентиляція зазвичай має кращі позиції.

Конденсат і його вплив на роботу систем. Проблема утворення конденсату є одним із найважливіших експлуатаційних аспектів для систем ґрунтово-повітряних теплообмінників. При літньому охолодженні вологого припливного повітря нижче точки роси на внутрішніх поверхнях підземних повітропроводів може випадати волога, що за відсутності належного дренажу та санітарного контролю здатне спричинити накопичення води, розвиток мікроорганізмів і погіршення експлуатаційної надійності системи [10, 27, 28].

У системах із тепловим насосом конденсат також утворюється, однак його відведення конструктивно передбачене штатними дренажними рішеннями у складі внутрішніх блоків або теплообмінних вузлів [4, 15]. Тому вплив конденсату на загальну працездатність теплового насоса є значно меншим і краще контрольованим.

Екологічність. Екологічна доцільність використання ґрунтових технологій пов'язана не лише зі зменшенням споживання традиційних енергоресурсів, а й із характером потенційних ризиків для навколишнього середовища. Геотермальна вентиляція є однією з найбільш екологічно нейтральних систем, оскільки не потребує холодоагентів, не використовує активного теплового перетворення та характеризується низьким рівнем споживання електроенергії [8, 29, 30].

Теплові насоси ґрунт-вода також розглядаються як екологічно ефективна альтернатива традиційним системам опалення та охолодження, однак їхня екологічна ефективність залежить від джерела електроенергії, складу електромережі, герметичності холодильного контуру та ризику витіку холодоагенту або робочої рідини [1, 3, 4]. З огляду на це геотермальна вентиляція в більшості випадків може розглядатися як екологічно безпечніше рішення.

Проведений аналіз літературних джерел свідчить, що геотермальна вентиляція і тепловий насос ґрунт-вода представляють два різні підходи до використання теплового потенціалу ґрунту. Перша технологія демонструє переваги у сфері енергоощадності, економічності доступності, довговічності та екологічної безпечності, що особливо важливо для більшості фермерських господарств. Друга система забезпечує вищу надійність підтримання нормативного температурного режиму, насамперед у зимовий період, а також краще контролює експлуатаційні процеси, пов'язані з конденсатом, однак потребує значно більших капітальних і експлуатаційних витрат [3, 4, 8].

Таким чином, проведений огляд літературних джерел дозволив систематизувати основні переваги та обмеження геотермальної вентиляції і теплового насоса ґрунт-вода за ключовими технічними, енергетичними, економічними, експлуатаційними та екологічними характеристиками. На основі цього узагальнення можна побудувати радарну діаграму порівняльної ефективності досліджуваних систем, яка наочно відображає співвідношення їх сильних і слабких сторін та слугує візуальним підсумком проведеного аналітичного огляду.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою статті є порівняльне оцінювання геотермальної вентиляції та теплового насоса ґрунт-вода для енергозабезпечення тваринницьких приміщень на основі аналітичного узагальнення літературних джерел і побудови радарної діаграми за сукупністю ключових критеріїв ефективності.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати наукові підходи до використання геотермальної вентиляції та теплового насоса ґрунт-вода;
- систематизувати дані літературних джерел за основними критеріями ефективності досліджуваних систем;
- визначити переваги та обмеження кожної технології в умовах тваринницьких приміщень;
- побудувати радарну діаграму як візуальне узагальнення результатів аналітичного огляду;
- обґрунтувати вибір більш доцільної системи для практичного використання.

Основна частина. Для визначення оптимальної системи альтернативного енергозабезпечення тваринницьких приміщень доцільно враховувати сукупність технічних, енергетичних, економічних, експлуатаційних та екологічних характеристик. З цією метою на основі аналітичного огляду літературних джерел виконано узагальнене зіставлення геотермальної вентиляції та теплового насоса ґрунт-вода, результати якого подано на рис. 1.

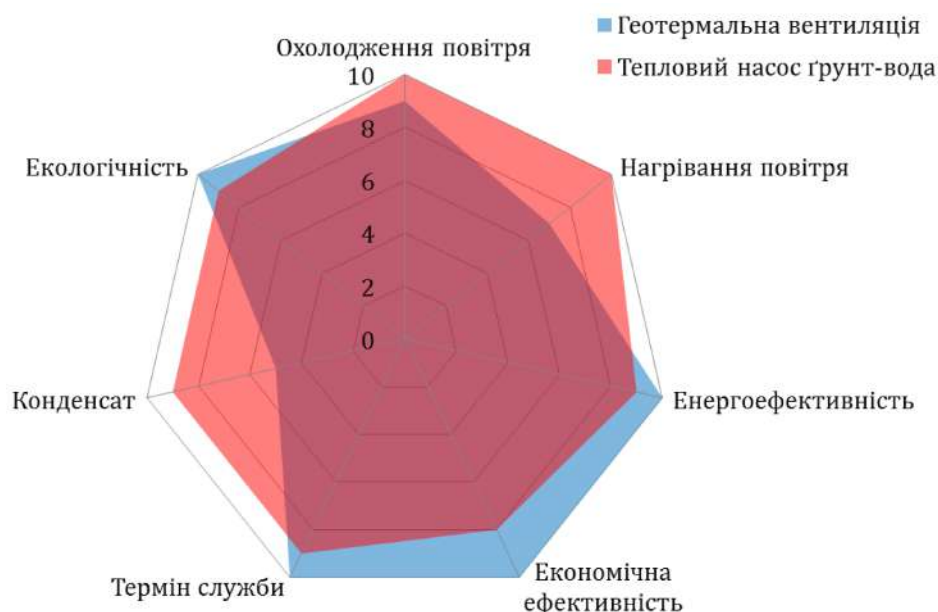


Рис. 1. Порівняння геотермальної вентиляції та теплового насоса ґрунт-вода за ключовими критеріями ефективності

Геотермальна вентиляція та тепловий насос ґрунт-вода належать до технологій, що використовують тепловий потенціал ґрунту, проте принципово відрізняються за характером функціонування. Геотермальна вентиляція є пасивною системою, в якій теплообмін між повітрям і ґрунтом відбувається без застосування активних елементів теплоперетворення. Тепловий насос ґрунт-вода, навпаки, є активною системою, у якій нагрів або охолодження теплоносія забезпечується за рахунок роботи компресора, циркуляційного насоса та системи автоматики. Така різниця визначає відмінності між системами за вартістю реалізації, енергоспоживанням, надійністю та експлуатаційними властивостями.

Аналіз рис. 1 показує, що геотермальна вентиляція має переваги за більшістю критеріїв, пов'язаних із ресурсною та експлуатаційною доцільністю. Насамперед це стосується економічної ефективності, оскільки така система характеризується нижчими капітальними та експлуатаційними витратами. Це зумовлено відсутністю складного теплотехнічного обладнання, простішою конструкцією та мінімальним рівнем енергоспоживання в процесі роботи. Для тваринницьких приміщень, де питання зниження виробничих витрат має визначальне значення, ця обставина є вагомою перевагою.

Додатково геотермальна вентиляція вирізняється вищим експлуатаційним ресурсом. Відсутність компресорних та інших складних механічних вузлів зменшує ймовірність технічних відмов і знижує потребу в періодичному сервісному обслуговуванні. У поєднанні з відносно простою схемою реалізації це підвищує загальну надійність системи та робить її привабливою для господарств, що орієнтовані на довготривалу експлуатацію з мінімальними витратами на утримання.

Перевага теплового насоса ґрунт-вода більш чітко проявляється у здатності підтримувати нормативний температурний режим упродовж року. Саме активний принцип роботи забезпечує його вищу ефективність у режимі нагрівання, особливо за несприятливих зовнішніх температур. Це дає змогу розглядати таку систему як більш надійне рішення у випадках, коли першочерговим є гарантоване забезпечення мікроклімату незалежно від сезонних коливань.

Окремим аспектом порівняння є вплив конденсату на роботу систем. У цьому відношенні тепловий насос ґрунт-вода має кращі експлуатаційні характеристики, оскільки процес відведення вологи в ньому конструктивно контрольований. Для геотермальної вентиляції утворення конденсату в підземних повітропроводах може становити суттєвіший експлуатаційний ризик, якщо не передбачено належного дренажу та санітарного контролю.

Разом із тим за критерієм екологічності геотермальна вентиляція має очевидну перевагу. Вона не потребує використання холодоагентів, не пов'язана з ризиком їх витоку в навколишнє середовище та не вимагає активного теплоперетворення. Це відповідає сучасним вимогам до раціонального використання природних ресурсів і зменшення техногенного впливу на довкілля. У контексті тваринницьких приміщень така властивість є особливо важливою, оскільки поєднує енергетичну доцільність із екологічною безпечністю.

Отже, результати, подані на рис. 1, свідчать, що геотермальна вентиляція є більш доцільною для тих випадків, коли пріоритетами є зниження витрат, енергоощадність, експлуатаційна простота та екологічна безпечність. Тепловий насос ґрунт-вода доцільно розглядати як ефективнішу, але більш капіталомістку альтернативу для об'єктів із підвищеними вимогами до стабільного цілорічного підтримання температурного режиму. За сукупністю розглянутих критеріїв саме геотермальна вентиляція має кращі передумови для впровадження в більшості фермерських господарств.

Висновки. Встановлено, що геотермальна вентиляція та тепловий насос ґрунт-вода є двома різними за принципом функціонування технологіями використання теплового потенціалу ґрунту: перша реалізує пасивний теплообмін між повітрям і ґрунтом, друга – активне теплоперетворення із застосуванням компресорного циклу.

Систематизовано результати літературних джерел за сімома ключовими критеріями ефективності: охолодження повітря, нагрівання повітря, енергоефективність, економічна ефективність, термін служби, вплив конденсату на роботу системи та екологічність.

Виявлено, що геотермальна вентиляція має переваги за показниками енергоефективності, економічної ефективності, тривалості експлуатації та екологічної безпечності, тоді як тепловий насос ґрунт-вода забезпечує кращі результати у стабільному підтриманні температурного режиму та контролі конденсату.

На основі результатів аналітичного огляду сформовано узагальнену візуальну модель порівняння геотермальної вентиляції та теплового насоса ґрунт-вода у вигляді рисунка, що дало змогу інтегрально відобразити сильні та слабкі сторони обох технологій за ключовими критеріями ефективності.

Обґрунтовано, що для більшості тваринницьких приміщень геотермальна вентиляція є більш доцільним рішенням з огляду на нижчі витрати, простоту експлуатації та вищу екологічну безпечність, тоді як тепловий насос ґрунт-вода слід розглядати як ефективнішу, але

більш капіталомістку альтернативу для об'єктів із підвищеними вимогами до гарантованого цілорічного підтримання температурного режиму.

Список використаних джерел

1. Vanbaelinghem L., Arulnathan V., Costantino A., Pelletier N. Comparative life cycle assessment of alternative heating, ventilation and air-conditioning (HVAC) systems for poultry houses. *Journal of Environmental Management*. 2025. Vol. 383. Art. 125541. DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.125541
2. Vanbaelinghem L., Costantino A., Grassauer F., Pelletier N. Alternative Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC) System Considerations for Reducing Energy Use and Emissions in Egg Industries in Temperate and Continental Climates: A Systematic Review of Current Systems, Insights, and Future Directions. *Sustainability*. 2024. Vol. 16. Art. 4895. DOI: 10.3390/su16124895
3. Aresti L., Florides G. A., Skaliontas A., Christodoulides P. Environmental Impact of Ground Source Heat Pump Systems: A Comparative Investigation From South to North Europe. *Frontiers in Built Environment*. 2022. Vol. 8. Art. 914227. DOI: 10.3389/fbuil.2022.914227
4. Casasso A., Sethi R. Assessment and Minimization of Potential Environmental Impacts of Ground Source Heat Pump (GSHP) Systems. *Water*. 2019. Vol. 11. Art. 1573. DOI: 10.3390/w11081573
5. Koshlak H. A Review of Earth-Air Heat Exchangers: From Fundamental Principles to Hybrid Systems with Renewable Energy Integration. *Energies*. 2025. Vol. 18. Art. 1017. DOI: 10.3390/en18051017
6. Congedo P. M., Baglivo C., Bonuso S., D'Agostino D. Numerical and experimental analysis of the energy performance of an air-source heat pump (ASHP) coupled with a horizontal earth-to-air heat exchanger (EAHX) in different climates. *Geothermics*. 2020. Vol. 87. Art. 101845. DOI: 10.1016/j.geothermics.2020.101845
7. Lu Q., Narsilio G. A., Aditya G. R., Johnston I. W. Economic analysis of vertical ground source heat pump systems in Melbourne. *Energy*. 2017. Vol. 125. P. 107–117. DOI: 10.1016/j.energy.2017.02.082
8. Mostafaeipour A., Goudarzi H., Khanmohammadi M., Jahangiri M., Sedaghat A., Norouzianpour H., Chowdhury S., Techato K., Issakhov A., Almutairi K., Hosseini Dehshiri S. J. Techno-economic analysis and energy performance of a geothermal earth-to-air heat exchanger (EAHE) system in residential buildings: A case study. *Energy Science & Engineering*. 2021. Vol. 9. P. 1807–1825. DOI: 10.1002/ese3.952
9. Diedrich C. H., Santos G. H. dos, Carraro G. C., Dimbarre V. V., Alves T. A. Numerical and Experimental Analysis of an Earth–Air Heat Exchanger. *Atmosphere*. 2023. Vol. 14. Art. 1113. DOI: 10.3390/atmos14071113
10. Pakari A., Ghani S. Performance evaluation of a near-surface earth-to-air heat exchanger with short-grass ground cover: an experimental study. *Energy Conversion and Management*. 2019. Vol. 201. Art. 112163. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.112163
11. Yang D., Guo Y., Zhang J. Evaluation of the thermal performance of an earth-to-air heat exchanger (EAHE) in a harmonic thermal environment. *Energy Conversion and Management*. 2016. Vol. 109. P. 184–194. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.11.050.
12. Benhammou M., Draoui B. Parametric study on thermal performance of earth-to-air heat exchanger used for cooling of buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 44. P. 348–355. DOI: 10.1016/j.rser.2014.12.030
13. Niu F., Yu Y., Yu D., Li H. Heat and Mass Transfer Performance Analysis and Cooling Capacity Prediction of Earth to Air Heat Exchanger. *Applied Energy*. 2015. Vol. 137. P. 211–221. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.10.008
14. Arghand T., Javed S., Dalenbäck J.-O. Combining direct ground cooling with ground-source heat pumps and district heating: Energy and economic analysis. *Energy*. 2023. Vol. 270. Art. 126944. DOI: 10.1016/j.energy.2023.126944
15. Dai L., Li S., DuanMu L., Li X., Shang Y., Dong M. Experimental performance analysis of a solar assisted ground source heat pump system under different heating operation modes. *Applied Thermal Engineering*. 2015. Vol. 75. P. 325–333. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.09.061
16. Ozgener L. A review on the experimental and analytical analysis of earth to air heat exchanger (EAHE) systems in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. Vol. 15. P. 4483–4490. DOI: 10.1016/j.rser.2011.07.103
17. Benhammou M., Draoui B., Zerrouki M., Marif Y. Performance analysis of an earth-to-air heat exchanger assisted by a wind tower for passive cooling of buildings in arid and hot climate. *Energy Conversion and Management*. 2015. Vol. 91. P. 1–11. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.11.042

18. Morshed W., Abbas L., Nazha H. Heating performance of the PVC earth-air tubular heat exchanger applied to a greenhouse in the coastal area of west Syria: An experimental study. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2022. Vol. 27. Art. 101000. DOI: 10.1016/j.tsep.2021.101000
19. Wei S., Wang H., Tian Y., Man X., Wang Y., Zhou S. Energy efficiency optimization analysis of a ground source heat pump system based on neural networks and genetic algorithms. *Geothermal Energy*. 2024. Vol. 12. Art. 43. DOI: 10.1186/s40517-024-00325-2
20. Greco A., Masselli C. The Optimization of the Thermal Performances of an Earth to Air Heat Exchanger for an Air Conditioning System: A Numerical Study. *Energies*. 2020. Vol. 13. Art. 6469. DOI: 10.3390/en13236469
21. Zeitoun W., Lin J., Siroux M. Energetic and Exergetic Analyses of an Experimental Earth–Air Heat Exchanger in the Northeast of France. *Energies*. 2023. Vol. 16. Art. 1542. DOI: 10.3390/en16031542
22. Ali N. B., Djuansjah J., Omar I. [та ін.]. Performance and cost-benefit analysis of an integrated earth-air heat exchanger and air handling unit system. *Scientific Reports*. 2025. Article in press. DOI: 10.1038/s41598-025-32275-5
23. Patin M., Rousse D. R. Optimizing economic performances of foundation earth-to-air heat exchangers for low-technology residential air-conditioning. *Energy and Buildings*. 2025. Vol. 328. Art. 115250. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.115250
24. Sakhri N., Kifouche A., Kaddour A., Chenini N., Larguech S., Chambashi G., Kaid N., Menni Y. Thermal and economic performance of an earth–air heat exchanger system for indoor climate control in arid winter environments. *International Journal of Low-Carbon Technologies*. 2025. Vol. 20. P. 855–864. DOI: 10.1093/ijlct/ctaf046
25. Basok B., Pavlenko A., Nedbailo A., Bozhko I., Novitska M., Koshlak H., Tkachenko M. Analysis of the Energy Efficiency of the Earth-To-Air Heat Exchanger. *Rocznik Ochrona Środowiska*. 2022. Vol. 24. P. 202–213. DOI: 10.54740/ros.2022.015
26. Rosa N., Santos P., Costa J. J., Gervásio H. Modelling and performance analysis of an earth-to-air heat exchanger in a pilot installation. *Journal of Building Physics*. 2018. Vol. 42. DOI: 10.1177/1744259117754298
27. D'Agostino D., Esposito F., Greco A., Masselli C., Minichiello F. The Energy Performances of a Ground-to-Air Heat Exchanger: A Comparison Among Köppen Climatic Areas. *Energies*. 2020. Vol. 13. Art. 2895. DOI: 10.3390/en13112895
28. Elminshawy N. A. S., Siddiqui F. R., Farooq Q. U., Addas M. F. Experimental investigation on the performance of earth-air pipe heat exchanger for different soil compaction levels. *Applied Thermal Engineering*. 2017. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.06.119
29. El-Said E. M. S., Abdelaziz G. B., Abdelhady M. I., Shokry N., Mohamed S., Dahab M. A. Experimental investigation of earth-air heat exchanger using porous clay vessels for eco-friendly. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Art. 17548. DOI: 10.1038/s41598-024-67212-5.
30. Hamdane S., Pires L. C. C., Silva P. D., Gaspar P. D. Evaluating the Thermal Performance and Environmental Impact of Agricultural Greenhouses Using Earth-to-Air Heat Exchanger: An Experimental Study. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. Art. 1119. DOI: 10.3390/app13021119.

Дата першого надходження статті до видання: 29.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)





O. Koviazin, A. Panchenko, I. Chyzhykov, O. Dereza, S. Dereza
Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

COMPARATIVE EVALUATION OF GEOTHERMAL VENTILATION AND A GROUND-TO-WATER HEAT PUMP FOR ENERGY SUPPLY IN LIVESTOCK BUILDINGS

Summary

This article presents a comparative evaluation of geothermal ventilation and a ground-to-water heat pump as alternative systems for the energy supply of livestock buildings. The relevance of the study is determined by the need to reduce energy consumption, lower operating costs, and maintain standard microclimate parameters under conditions of rising energy prices and stricter environmental requirements in agricultural production. The purpose of the study is to substantiate the feasibility of geothermal ventilation by comparing it with a ground-to-water heat pump according to key technical, energy, economic, operational, and environmental characteristics. The study is based on an analytical review of scientific literature followed by the generalization of the obtained results according to seven efficiency criteria: air cooling, air heating, energy efficiency, economic efficiency, service life, the impact of condensate on system operation, and environmental safety. On this basis, an integrated graphical comparison model was developed to visualize the strengths and weaknesses of the studied systems. The results show that geothermal ventilation has advantages in terms of energy efficiency, economic feasibility, service life, and environmental safety due to its passive operating principle, lower capital and operating costs, simpler design, and the absence of refrigerants. At the same time, the ground-to-water heat pump demonstrates better performance in maintaining a stable temperature regime throughout the year and in controlling processes related to condensate formation and removal. It is substantiated that geothermal ventilation is the more appropriate solution for most livestock buildings because of its lower costs, operational simplicity, and greater environmental safety, whereas a ground-to-water heat pump should be considered a more efficient but also more capital-intensive alternative for facilities with higher requirements for guaranteed year-round temperature control.

Keywords: alternative energy supply, earth-to-air heat exchanger, microclimate, energy efficiency, economic efficiency, environmental safety.



Т. О. Кутковецька, канд. екон. наук, доцент
Уманський національний університет
e-mail: tanya_kut@ukr.net

ORCID: 0000-0002-4879-2954

ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ ВІБРАЦІЙНОГО ГРУНТООБРОБНОГО ЗНАРЯДДЯ ДЛЯ ОБРОБІТКУ ГРУНТУ

Анотація. В статті проведені дослідження щодо зменшення енерговитрат та підвищення якості обробітку ґрунту шляхом використання в ґрунтообробному знарядді робочих органів вібраційної дії з обґрунтуванням параметрів їх роботи. Наукову новизну становить установка додаткових елементів на стійках робочих органів, які будуть здійснювати їх коливальні рухи під час обробітку ґрунту і таким чином, краще його розпушувати. При цьому практична цінність полягає в тому, що вібраційне знаряддя дозволить зменшити тяговий опір та знизити енерговитрати до 20 % на виконання технологічної операції обробітку ґрунту. Отримані результати дослідження показали, що запропонована розробка, дозволить забезпечити якісні показники обробітку ґрунту, що відповідають агротехнічним вимогам. Крім того за результатами досліджень визначено, що конструктивне технічне рішення також забезпечить високу продуктивність роботи ґрунтообробного знаряддя вібраційної дії та може використовуватися для обробітку ґрунту на різних агрофонах при різній твердості ґрунту.

Ключові слова: ґрунтообробне знаряддя, обробіток ґрунту, параметри роботи, робочі органи, вібраційна дія, тяговий опір, енерговитрати, технічне рішення, розпушування ґрунту, технологічна операція.

Постановка проблеми. В результаті ситуації, яка на сьогодні склалася в нашій країні та в усьому світі, а саме подорожчання енергоресурсів, актуальним питанням є їх економія, і особливо в сільськогосподарському виробництві. В наш час розробляється багато шляхів вирішення цієї проблеми, одним із них є зниження енергоємності під час обробітку ґрунту, тому що ця операція є найбільш енерговитратною у вирощуванні сільськогосподарських культур.

Через швидкий розвиток науково-технічного прогресу економія ресурсів має супроводжуватися абсолютно новим поглядом, спрямованим на покращення якості обробітку ґрунту.

Із найперспективніших напрямків зниження енерговитрат є застосування ресурсозберігаючих технологій з використанням комбінованих агрегатів й комплексів машин, і таким чином, збільшення їх продуктивності за рахунок оптимізації в них конструктивно-режимних параметрів [4, с. 10].

У зв'язку з тим, що на технологічні операції з обробітку ґрунту, як правило, припадає до 40 % всіх виробничих витрат, удосконалення технології обробітку ґрунту є завданням значимим і першочерговим.

Аналіз останніх досліджень. Вирішенню питань, що пов'язані з конструкцією робочих органів знарядь для обробітку ґрунту присвячені роботи В. А. Бодрова [1, с. 25], А. С. Стеценка [1, с. 40], В. М. Булгакова [2, с. 51], О. М. Свірень [2, с. 58], О. І. Калениченка [5, с. 14], О. В. Поліщука [7, с. 440] та ін. Але, на сьогодні, існують ще питання, щодо конструктивних параметрів вібраційних ґрунтообробних знарядь, які будуть енергоємними та забезпечувати якісний обробіток ґрунту.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою статті є проведення дослідження відносно підвищення якості та зниження енерговитрат обробітку ґрунту шляхом

обґрунтуванням раціональних параметрів роботи вібраційного ґрунтообробного знаряддя для виконання даної технологічної операції.

Основна частина. У вітчизняному та зарубіжному науковому середовищі виділяються два основні напрямки вирішення проблеми енергоресурсозберігання при виконанні операцій з обробітку ґрунту – це зниження тягового опору та розробка широкозахватних комбінованих агрегатів [1, с. 12].

Найкращим вирішенням поставленого завдання вважається напрямок щодо зниження тягового опору ґрунтообробних машин, оскільки при створенні комбінованих широкозахватних машин неминучою проблемою є збільшення тягового опору агрегату.

Аналіз досліджень показав, що досягти зменшення тягового опору ґрунтообробних машин можна кількома способами [6, с. 69]:

- удосконаленням конструкції знаряддя та зменшення його ваги;
- удосконаленням геометрії робочих органів;
- зменшення сил тертя ґрунту по поверхні робочих органів.

Головним завданням удосконалення ґрунтообробних машин, у тому числі й комбінованих, є зниження їх тягового опору без значного ускладнення конструкції.

Використання вібраційної та імпульсної техніки у вирішенні поставленого завдання дозволяє по-новому розглянути процес концентрації енергії в часі та більш раціональної її витрати при виконанні технологічних операцій з обробітку ґрунту [3, с. 5].

На сьогодні існують різні коливальні контури, що відрізняються видами збурювачів коливань. Гідравлічні та пневматичні збурювачі коливань схильні до зміни характеристик при зміні параметрів рідини чи газу (наприклад, при зміні температури навколишнього повітря), що обумовлює ускладнення їх конструкції. Електричні збурювачі коливань вимагають достатньо потужного джерела енергії для забезпечення тривалої безперебійної роботи. Механічні – мають велику масу і швидко зношуються в процесі роботи.

Особливу увагу фахівці приділяють застосуванню вібрації при обробітку ґрунту, тому, що він є найбільш енергоємною операцією в сучасному сільськогосподарському виробництві [9].

На даний час спостерігається тенденція до використання широкозахватних комбінованих ґрунтообробних знарядь. В цьому випадку процес застосування вібрації в ґрунтообробних машинах для зниження тягового опору недостатньо вивчений і вимагає нових інженерних підходів.

На підставі аналізу існуючих технічних засобів [7, с. 441] для обробітку ґрунту нами пропонується новий технічний засіб вібраційної дії (рис. 1).

Новими елементами є стійка, що в нижній фронтальній частині має направляючу круглого перерізу, на якій встановлено долото [10, 11], при цьому на стійці закріплений гвинтами кожух, в який встановлено соленоїд, виконаний у вигляді котушки. Стрілчасті лапи закріплені нерухомо у горизонтальній площині за допомогою пазів у кронштейні з різьбовою віссю штифтом.

Сукупність нових елементів дозволяє долоту й стрілчастим лапам здійснювати коливальні рухи, при цьому ударник періодично взаємодіє з корпусом, забезпечуючи дрібно-амплітудні збурення, що забезпечує зниження енергоємності процесу та покращення якості обробітку ґрунту [8, с. 24].

Схема ґрунтообробного знаряддя з електронним збурювачем коливань напрямної дії показано на рис. 2.

Рухливість ґрунтообробного знаряддя забезпечується електронним збурювачем коливань напрямної дії. Стрижень соленоїда здійснює зворотно-поступальні рухи в різні боки й створює збурювальну силу $F_{зб}$. Таким чином, ґрунтообробне знаряддя здійснює коливання в горизонтальній та вертикальній площинах з амплітудами A_x і A_y [2, с. 55].

Нами виведено рівняння тягового опору пропонованого ґрунтообробного знаряддя з вібраційними робочими органами.

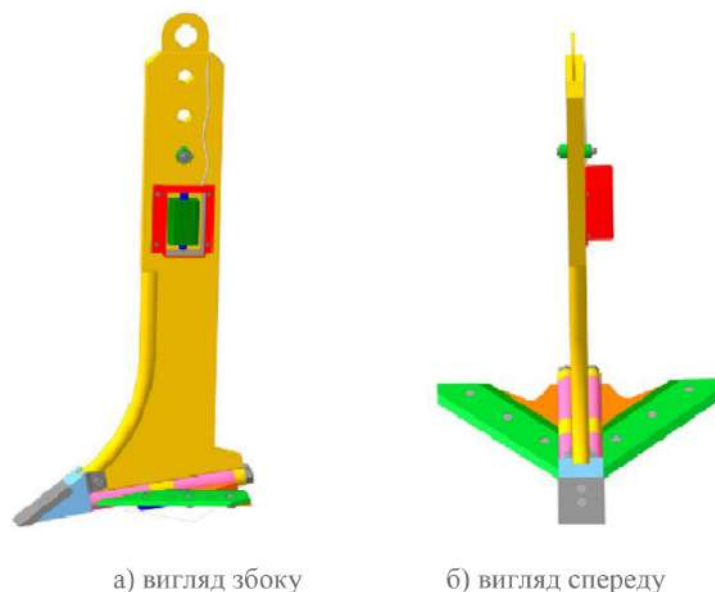


Рис. 1. Вібраційний робочий орган чизельного плуга

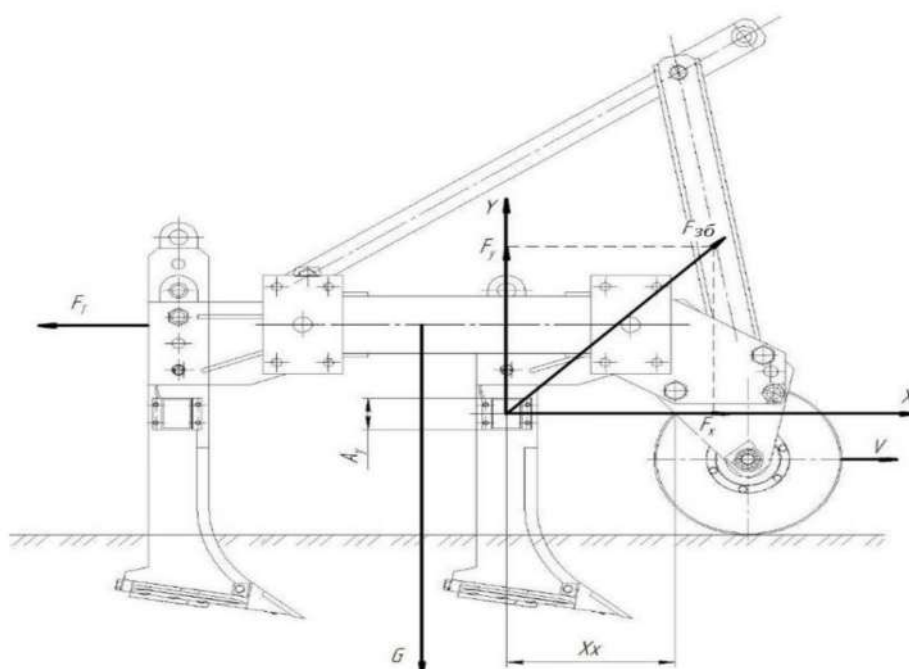


Рис. 2. Схема ґрунтообробного знаряддя з електронним збурювачем коливань:

F_{zb} – збурювальна сила; F_y – вертикальна складова збурювальної сили; F_x – горизонтальна складова збурювальної сили; R – сила впливу робочого органу; A_x , A_y – амплітуда коливань у горизонтальній та вертикальній площинах; G – вага знаряддя; V – напрямок швидкості руху

Для спрощення розрахунків приймалися такі обмеження:

- ґрунт є суцільним пружно-в'язким, ізотропним середовищем, пружність середовища проявляється у відновленні деформацій після розвантаження, в'язкість – в тому, що деформація розвивається із запізненням по відношенню до прикладеного напруження;
- власні коливання системи залежать від початкових умов і протягом деякого часу швидко загасають, тому розглядається вирішення тільки для встановлених примусових коливань;
- розглядається плоска, одновимірна задача;

- ґрунт активно взаємодіє з робочим органом по всій товщині оброблюваного шару;
- розушцілення відбувається внаслідок впливу нормальних навантажень, що виникають від робочого органу в горизонтальному та вертикальному напрямках, без врахування дотичного напруження у ґрунті; ґрунтообробне знаряддя не відривається від поверхні ґрунту, оскільки процес обробітку має відбуватися з найменшими енерговитратами;
- рама та стійки робочих органів ґрунтообробного знаряддя є жорсткою конструкцією, тобто деформації відсутні;
- кутовими коливаннями у поздовжній площині ґрунтообробного знаряддя нехтуємо, тобто знаряддя здійснює строго вертикальні та горизонтальні коливання;
- поверхню оброблюваного ґрунту приймаємо рівною, що виключає вертикальні коливання знаряддя через нерівномірність рельєфу поля [2, с. 58].

Таким чином, було визначено значення сили опору, використовуючи прийняту нами реологічну модель ґрунту. Для цього всі робочі органи ґрунтообробного знаряддя приведено до однієї точки O .

Робочий орган впливає на ґрунтовий об'єм V у горизонтальній і вертикальній площинах через точку O . При цьому сила впливу R робочого органу буде витрачатися на деформації пружного $C_{сп}$ і в'язкого $b_{сп}$ елементів. Тоді сила впливу, що викликає опір ґрунтового об'єму R_z і R_g , дорівнює:

$$R_z = n(F_1(t) + F_2(t)) + F_T - F_x, \quad (1)$$

$$R_g = n(F_3(t) + F_4(t)) - F_y, \quad (2)$$

- де F_1, F_3 – сила, що витрачається на подолання пружних опорів ґрунту, Н;
 F_2, F_4 – сила, що витрачається на подолання в'язких опорів ґрунту, Н;
 G – вага ґрунтообробного знаряддя, Н;
 F_x, F_y – амплітудне значення збурювальної сили відносно осей X та Y , Н;
 F_T – сила опору протягування ґрунтообробного знаряддя, Н;
 f – коефіцієнт опору пересування ґрунтообробного знаряддя;
 n – кількість робочих органів знаряддя, шт.

В результаті математичних перетворень було отримано рівняння тягового опору ґрунтообробного вібраційного знаряддя, яке має вигляд:

$$R = \sqrt{R_z^2 + R_g^2}, \quad (3)$$

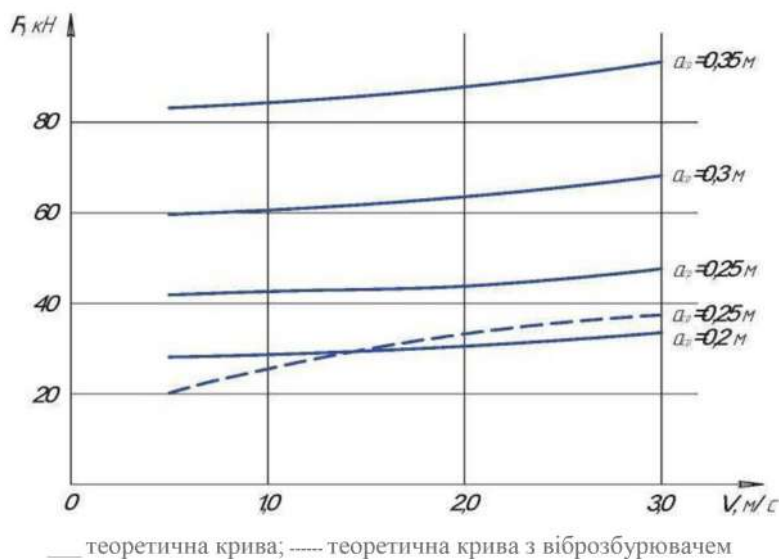


Рис. 3. Залежність тягового опору від швидкості руху при різній глибині обробітку

Графік зміни тягового опору ґрунтообробного знаряддя залежно від швидкості руху за різної глибини обробітку ґрунту показано на рис. 3.

Як видно з графіку, спостерігається помітне зниження теоретичного тягового опору знаряддя з вібраційними робочими органами для виконання обробітку ґрунту.

Висновки. Таким чином, нами проведені теоретичні дослідження щодо параметрів роботи вібраційного ґрунтообробного знаряддя з метою зниження енерговитрат, зменшення тягового опору та покращення обробітку ґрунту. За результатами досліджень наведено конструкцію вібраційного ґрунтообробного знаряддя та здійснено теоретичний аналіз запропонованого технічного рішення. При цьому визначено, що застосування нового технічного засобу вібраційної дії забезпечує зниження енергоємності процесу та покращення якості обробітку ґрунту. Вище викладене вказує на досягнення поставленого завдання в дослідженнях і є актуальним. Це дає передумови для подальших досліджень даної проблематики та впровадження у виробництво запропонованої розробки.

Список використаних джерел

1. Бодров В. А., Стеценко А. С., Харченко І. Ю. Модернізація сільськогосподарських машин: монографія. Київ : Аграрна наука, 2020. 176 с.
2. Булгаков В. М., Головач І. В., Горобей В. П., Свірень О. М. Побудова математичної моделі коливального руху у ґрунті. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник КНТУ*. 2015. Вип. 45. Ч.1. С. 50–62.
3. Булгаков В. М., Свірень О. М., Кісільов Р. В., Оріщенко С. Б., Лісовий І. О. Дослідження вібраційних процесів при основному обробітку ґрунту. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2015. Вип. 5, т.1. С. 3–13.
4. Глушенко В. В. Сучасні тенденції в розвитку ґрунтообробної техніки. *Інженерія сільськогосподарського виробництва*. 2022. № 2. С. 8–14.
5. Калениченко О. І. Вплив конструктивних параметрів робочих органів на якість обробітку ґрунту. *Техніка АПК*. 2020. № 3. С. 12–17.
6. Кутковецька Т. О., Мелентьев О. Б. Модернізація корпусу плуга з обґрунтуванням його конструктивних параметрів. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання*. / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. Запоріжжя : ТДАТУ, 2025. Вип. 15, т. 1. С. 68–74. DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-7>
7. Поліщук О. В., Загнітко Я. В. Вібраційний обробіток ґрунту: аналіз технологій та перспективи застосування. *Вісник Хмельницького національного університету*. Технічні науки. 2025. Вип. 35, № 3. С. 438–443.
8. Філімонов С. О., Яценко С. С. Вдосконалена конструкція віброплуга з п'єзокерамічним виконавчим механізмом. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. Технічні науки. 2023. № 1. 23–31.
9. Candea I., Popescu S. Theoretical and experimental study on soil vibrators used for the germinal layer preparation. *Agricultural and Food Sciences*. 2023.
10. Lipengcheng Wan, Yonglei Li, Jinyu Song, Xiang Ma, Xiangqian Dong, Chao Zhang, Jiannong Song. Vibration Response of Soil under Low-Frequency Vibration Using the Discrete Element Method. *Agriculture*. 2023, 13(10), 1958; <https://doi.org/10.3390/agriculture13101958>
11. Wang Y., Zhang D., Yang L., Cui T., Jing H., Zhong X.. Modeling the interaction of soil and a vibrating subsoiler using the discrete element method. *Computers and Electronics in Agriculture*. Volume 174, July 2020, Page 105518 <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105518>

Дата першого надходження статті до видання: 28.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)





T. Kutkovetska
Uman National University

JUSTIFICATION OF THE WORKING PARAMETERS OF A VIBRATORY LAND CULTIVATION TOOL FOR SOIL CULTIVATION

Summary

The article presents research on reducing energy consumption and improving the quality of soil cultivation by using vibrating working elements in soil cultivation implements with justification of their operating parameters. From the analysis of literary sources, it was found that existing vibration disruptors are classified into mechanical, electrical, hydraulic and pneumatic. One of the most promising areas of development and application of vibration sources for tillage tools is electrical exciters of mechanical vibrations, namely a solenoid with a metal core inside. Based on the analysis of existing technical means for soil cultivation, we propose a new technical means of vibration action for mound-free soil cultivation. The scientific novelty is the installation of additional elements on the racks of the working elements, which will perform their oscillatory movements during soil cultivation and thus better loosen it. A structural and technological scheme of a combined tillage implement with an electric vibration exciter and a device for automatic regulation of the technological process of the tillage machine have been developed. At the same time, the practical value lies in the fact that the vibrating tool will reduce traction resistance and reduce energy consumption by up to 20 % for performing the technological operation of soil cultivation. The obtained research results showed that the proposed development will ensure high-quality soil cultivation indicators that meet agrotechnical requirements. In addition, the results of the research determined that the proposed constructive technical solution will also ensure high performance of the soil tillage tool of vibration action and can be used for soil cultivation on different agro-backgrounds with different soil hardness.

Keywords: tillage implement, soil cultivation, operating parameters, working bodies, vibration action, traction resistance, energy consumption, technical solution, loosening the soil, technological operation.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-9>

УДК 514.18

О. Є. Мацулевич¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-5553-709X

Ю. В. Лазарчук-Воробйова², ст. викладач

ORCID: 0000-0002-7866-3299

¹ Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного² Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

e-mail: oleksandr.matsulevych.tsatu.edu.ua

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ НЕПЕРЕРВНОЇ ІНТЕРПОЛЯЦІЇ СПІРАЛЕПОДІБНОЇ ДПК ЗА ДОПОМОГОЮ СПЕЦІАЛЬНОЇ ФУНКЦІЇ

Анотація. Метою дослідження є аналіз можливостей використання неперервного геометричного моделювання на базі спеціальної функції. Визначенні дотичних у вузлових точках вихідної ДПК при використанні локальних методів згущення. Глобальному призначенні дотичних для алгоритмів згущення замкнених та спіралеподібних ліній.

Використання традиційної неперервної інтерполяції часто не дозволяє точно спрогнозувати форму кривої на межах заданого масиву точок, що призводить до необхідності перерахунку параметрів. Для уникнення надлишкових обчислень та акумуляції похибок пропонується впровадження локального методу моделювання з наступним трансформуванням координат у глобальну систему.

Запропонована у роботі методика дає можливість застосовувати локальні методи безперервної інтерполяції для ущільнення ДПК. Це реалізується через використання спеціальної інтерполюючої функції. Такий підхід гарантує відсутність небажаної осциляції, забезпечує неперервність перших похідних у місцях з'єднання сегментів моделюючої кривої, а також дозволяє здійснювати глобальне формування дотичних у вузлових точках.

Ключові слова: спіралеподібна дискретно представлена крива, супроводжуюча ламана лінія, дотична.

Постановка проблеми. У сучасному геометричному моделюванні виділяють два основні підходи: неперервний та дискретний. Неперервне моделювання є особливо ефективним при розв'язанні завдань, пов'язаних із побудовою траєкторій у системах ЧПК або пошуком екстремальних значень. У такому разі в пам'яті обчислювальної системи зберігаються лише базові опорні точки, а додаткові координати масиву розраховуються динамічно в міру потреби.

Проте наявні методи мають суттєві недоліки: вони не гарантують відсутності паразитної осциляції (хвилеподібних викривлень), а поведінка кривої на кінцевих сегментах точкового ряду часто є непередбачуваною. Це змушує дослідників постійно коригувати коефіцієнти та виконувати повторні розрахунки. Для мінімізації обчислювальної складності та зниження похибок раціонально використовувати локальні методи моделювання, що передбачають подальший перехід до загальної (глобальної) системи координат.

Аналіз останніх досліджень. Попередні наукові праці [1] присвячені вивченню спеціальних функцій як інструменту інтерполяції для формування та керування геометрією замкнених і спіралеподібних дискретних профільних кривих (ДПК). Такі дослідження орієнтовані на системи ЧПК, де доцільно застосовувати локальні наближення для кожної ланки супровідної ламаної лінії (СЛЛ). При такому підході створюється локальна система координат, де вісь абсцис збігається з відповідною ланкою, а початок координат встановлюється у її вихідній точці. Попри перспективність, практичне застосування таких функцій у згаданому напрямі ще не набуло достатнього розвитку.

Формулювання цілей статті. Метою дослідження є аналіз можливостей використання неперервного геометричного моделювання на базі спеціальної функції. Визначенні дотичних у вузлових точках вихідної ДПК при використанні локальних методів згущення. Глобальному призначенні дотичних для алгоритмів згущення замкнених та спіралеподібних ліній.

Основна частина. Використання традиційної неперервної інтерполяції часто не дозволяє точно спрогнозувати форму кривої на межах заданого масиву точок, що призводить до необхідності перерахунку параметрів. Для уникнення надлишкових обчислень та акумуляції похибок пропонується впровадження локального методу моделювання з наступним трансформуванням координат у глобальну систему.

Результати проведених досліджень підтверджують, що під час роботи зі спіралеподібними ДПК для систем ЧПК найбільш ефективним є локальне наближення на кожному сегменті СЛЛ. У цій схемі вісь координат спрямовується вздовж ланки, а точка відліку фіксується у вузлі (рис. 1). На нашу думку, саме використання спеціальної функції в такій локальній системі дозволяє найкращим чином вирішити проблему осциляції спіралеподібного контуру та забезпечити ідеальну гладкість з'єднання окремих сегментів у вузлах кривої.

$$\bar{y} = (a\bar{x} + b) \cdot \sin \frac{\bar{x}(l_i - \bar{x})}{l_i^2}. \quad (1)$$

Коефіцієнти a та b у наведених вираженнях призначені для забезпечення неперервності та гладкості при стикуванні окремих сегментів. Тут l_i позначає довжину $(i-1; i)$ ланки супровідної ламаної лінії (СЛЛ). Очевидно, що при значеннях координати $\bar{x} = 0$ і $\bar{x} = l_i$ $\bar{y} = 0$, функція набуває нульових значень, що підтверджує проходження кривої безпосередньо через початкову та кінцеву точки відрізка.

Щоб обчислити значення a та b , прийнемо за основу умову, що у вузлових точках дискретної профільної кривої (ДПК) уже задано певні вектори дотичних.

Кути, які формуються дотичними до обводу (рис. 1) у вузлових точках $i-1$ і i відносно локальної осі $0\bar{x}$, є

$$\bar{\beta}_{i-1} = \beta_{i-1} - \alpha_i; \quad \bar{\beta}_i = \beta_i - \alpha_i. \quad (2)$$

У цих виразах параметри α_i і β_i – позначають кути нахилу відповідних ланок супроводжуючої ламаної лінії (СЛЛ) та дотичних до осі $0x$ у загальній (глобальній) системі координат.

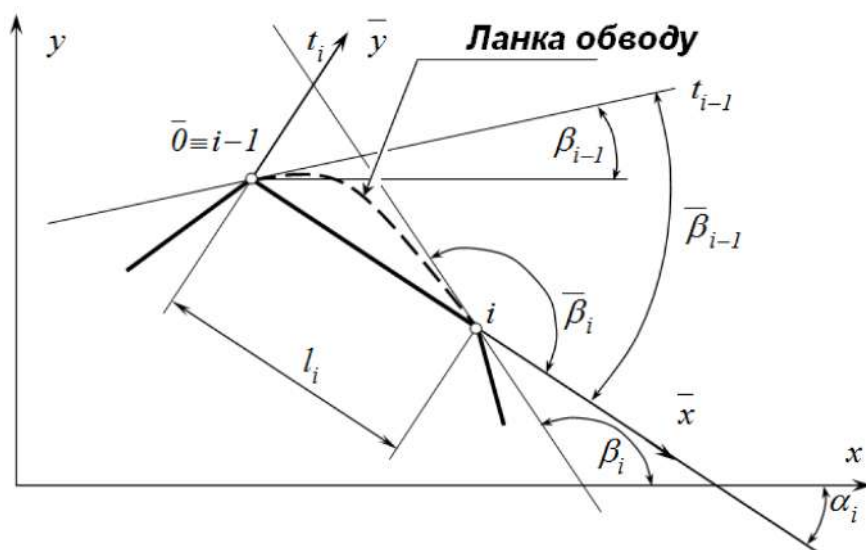


Рис. 1

Значення першої похідної $\bar{y}_{i-1}$ й $\bar{y}_i$ у локальній системі координат дорівнюють

$$\bar{y}'_{i-1} = \operatorname{tg} \bar{\beta}_{i-1}; \quad \bar{y}'_i = \operatorname{tg} \bar{\beta}_i. \quad (3)$$

Диференціюємо (1) по $\bar{x}$

$$\bar{y}' = a \cdot \sin \frac{\bar{x}(l_i - \bar{x})}{l_i^2} + (a\bar{x} + b) \frac{l_i - 2\bar{x}}{l_i^2} \cdot \cos \frac{\bar{x}(l_i - \bar{x})}{l_i^2} \quad (4)$$

при $\bar{x} = 0$:

$$\bar{y}'_{i-1} = \frac{b}{l_i} = \operatorname{tg} \bar{\beta}_{i-1}; \quad b = l_i \operatorname{tg} \bar{\beta}_{i-1}, \quad (5)$$

при $\bar{x} = l_i$: $\bar{y}'_i = \frac{al_i + b}{-l_i} = \operatorname{tg} \bar{\beta}_i$. З урахуванням (5) маємо

$$a = -(\operatorname{tg} \bar{\beta}_{i-1} + \operatorname{tg} \bar{\beta}_i). \quad (6)$$

Підставляючи (5) і (6) у (1) маємо рівняння інтерполяційної функції в локальній системі координат

$$\bar{y} = \{(l_i - \bar{x}) \operatorname{tg} \bar{\beta}_{i-1} - \bar{x} \operatorname{tg} \bar{\beta}_i\} \cdot \sin \frac{\bar{x}(l_i - \bar{x})}{l_i^2}. \quad (7)$$

Рівняння (4) описує першу похідну з урахуванням значень коефіцієнтів a і b визначених у виразах (6) та (5) відповідно..

Для запобігання виникненню осциляції кривої необхідно забезпечити таке просторове положення дотичної в i -ому вузлі повинна розташовуватися так, щоб її кут нахилу β_i задовольняв обмеженням $\alpha_{i+1} < \beta < \alpha_i$. Додатково функція (7) потребує дотримання ще одного обмеження, результати досліджень вказують на те, що її графік залишається стабільним і не зазнає осциляцій на розглянутому сегменті за умови $[0; l_i]$, коли $k = \operatorname{tg} \beta_{i-1} / \operatorname{tg} \beta_i$; $k \in [-2; -0.5]$.

Процес визначення дотичних у вузлах дискретної профільної кривої (ДПК) трансформується у задачу побудови гладкого (неосцилюючого) дискретного графіка β_i у межах визначеної допустимої смуги α_i (див. рисунок 3). При цьому обов'язково враховуються обмеження, що наклада-

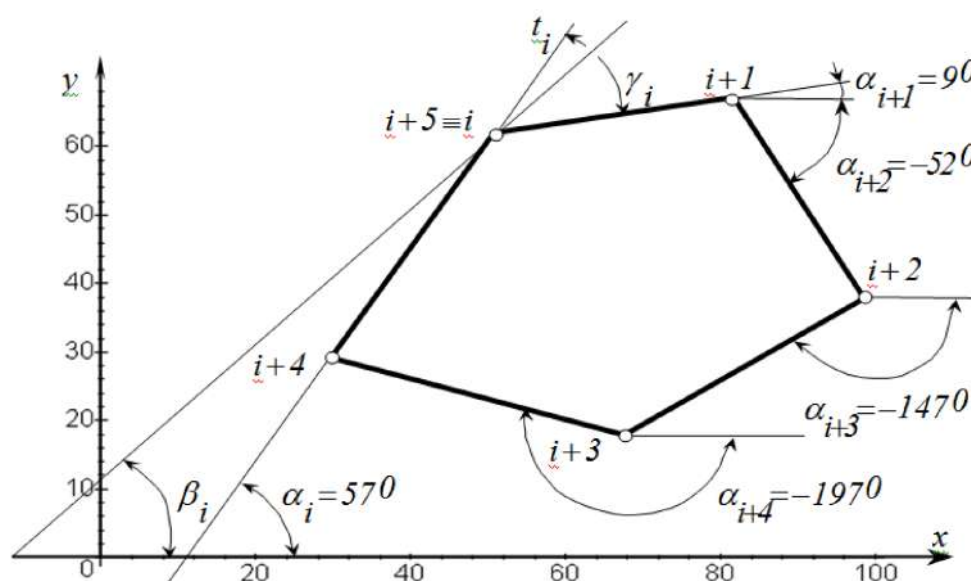


Рис. 2

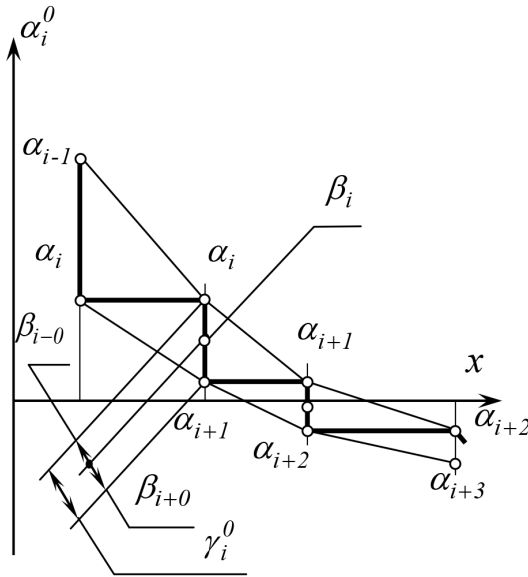


Рис. 3

ються на коефіцієнт k . Уздовж осі $0x$ відкладаємо довжини ланок $l_i = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}$. Фактично представлений процес є розгортанням дискретно представленної кривої (ДПК), що суміщається з віссю абсцис. При цьому вздовж осі ординат фіксуються значення кутів α_i які відповідають нахилу i -ї ланки відносно осі $0x$. Сформований на графіку діапазон дозволяє визначити параметри γ_i . Шляхом послідовного з'єднання верхніх та нижніх меж окремих ділянок утворюється смуга кутів суміжності γ_i для конкретної ДПК, що окреслює область для вибору та встановлення кутів β_i дотичних у вузлових точках. Спираючись на розроблений раніше алгоритм [2] формується з урахуванням обмежень на k формується опуклий графік β_i у межах визначеної смуги γ_i (рис. 3).

Дотична t_i у вузловій точці i як показано на рисунку 4 формує з віссю $0X$ кут β_i . Окрім цього, вона утворює специфічні кутові залежності з ланками супроводжуючої ламаної лінії, а саме: кут із попереднім сегментом $(i-1, i)$ СЛЛ – кут $\bar{\beta}_{i-0}$, з наступною – кут $\bar{\beta}_{i+0}$.

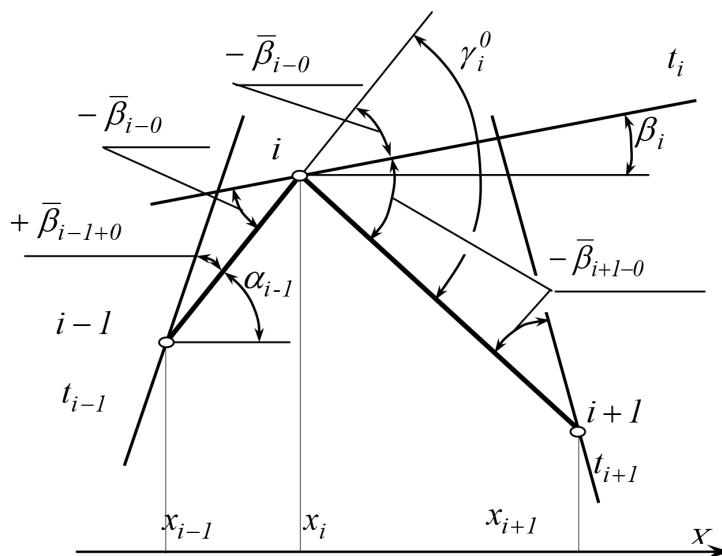


Рис. 4

Очевидно, що

$$\bar{\beta}_{i-0} = \beta_i - \alpha_{i-1}; \quad \bar{\beta}_{i+0} = \beta_i - \alpha_i. \quad (8)$$

Тангенс кутів $\bar{\beta}_{i-1+0}$ і $\bar{\beta}_{i-0}$ зв'язані співвідношенням

$$k_i = \frac{\operatorname{tg} \bar{\beta}_{i-1+0}}{\operatorname{tg} \bar{\beta}_{i-0}}; \quad \operatorname{tg} \bar{\beta}_{i-0} = \frac{1}{k_i} \cdot \operatorname{tg} \bar{\beta}_{i-1+0}. \quad (9)$$

Аналогічно

$$\operatorname{tg} \bar{\beta}_{i+1-0} = \frac{1}{k_{i+1}} \cdot \operatorname{tg} \bar{\beta}_{i+0}, \quad \operatorname{tg} \bar{\beta}_{i+2-0} = \frac{1}{k_{i+2}} \cdot \operatorname{tg} \bar{\beta}_{i+1+0}, \quad (10)$$

З огляду на те, що

$$\bar{\beta}_{i+0} = \gamma_i^0 + \bar{\beta}_{i-0}, \quad i = \overline{1; n-1} \quad (11)$$

з (10) з урахуванням (11) маємо

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \bar{\beta}_{1-0} &= \frac{1}{k_1} \cdot \operatorname{tg} \bar{\beta}_{0+0}; \quad \operatorname{tg} \bar{\beta}_{2-0} = \frac{1}{k_2} \cdot \operatorname{tg} \bar{\beta}_{1+0} = \frac{1}{k_2} \operatorname{tg}(\gamma_1^0 + \bar{\beta}_{1-0}); \\ \operatorname{tg} \bar{\beta}_{3-0} &= \frac{1}{k_3} \operatorname{tg}(\gamma_2^0 + \bar{\beta}_{2-0}) \dots \text{т.д.} \end{aligned} \quad (12)$$

Подальша стратегія визначення сукупності кутів $\bar{\beta}_{i-0}$ і $\bar{\beta}_{i+0}$, $i = \overline{1; n}$ складається в такім призначенні кутів β_i який би забезпечував одночасне виконання двох базових умов:

– положення точки β_i в смугі α_i , тобто на відрізок $\alpha_{i-1} \alpha_i$, а саме

$$\alpha_i < \beta_i < \alpha_{i-1}; \quad (13)$$

– значення кутів $\bar{\beta}_{i-0}$ і $\bar{\beta}_{i+0}$ повинні задовольняти умові (9).

Приведемо співвідношення (12) до кутів β_i на підставі (6). Ураховуючи, що $\gamma_i = \alpha_{i-1} - \alpha_i$, маємо

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}(\beta_1 - \alpha_0) &= \frac{1}{k_1} \operatorname{tg}(\beta_0 - \alpha_0); \quad \operatorname{tg}(\beta_2 - \alpha_1) = \frac{1}{k_2} \operatorname{tg}(\beta_1 - \alpha_1); \\ \operatorname{tg}(\beta_3 - \alpha_2) &= \frac{1}{k_3} \operatorname{tg}(\beta_2 - \alpha_2) \dots \text{і т.д.} \end{aligned} \quad (14)$$

Для того щоб об'єднати обмеження (13) та залежності (14) у межах спільної системи, потрібно трансформувати вирази, перейшовши від тангенсів кутів, наведених у (14), безпосередньо до значень самих кутів. Як відомо, для реалізації такого переходу функцію $\operatorname{tg} x$ доцільно представити у вигляді розкладу в ряд Тейлора

$$\operatorname{tg} x = x + \frac{1}{3}x^3 + \frac{2}{15}x^5 + \dots \quad (15)$$

Під час моделювання реальних ДПК величина x виражена в радіанах, зазвичай не перевищує одиниці, а з кожним новим етапом ущільнення вона поступово наближається до нульової позначки. Окрім цього, процес розв'язання об'єднаної системи (13)+(14) спрямований не на пошук одного прецизійного значення, а на виокремлення певного інтервалу, в межах якого обирається шуканий результат, що відповідає встановленим критеріям. З огляду на це, у математичному розкладанні (15) стає цілком припустимим обмежитися лише першим членом ряду, а саме $\operatorname{tg} x \approx x$

Тоді з (14) маємо

$$\beta_1 - \alpha_0 = \frac{1}{k_1}(\beta_0 - \alpha_0); \quad \beta_2 - \alpha_1 = \frac{1}{k_2}(\beta_1 - \alpha_1); \quad \beta_3 - \alpha_2 = \frac{1}{k_3}(\beta_2 - \alpha_2) \dots \quad (16)$$

Перетворимо з урахуванням (13)

$$\begin{aligned} \alpha_1 < \beta_1 = \frac{\beta_0}{k_1} + \alpha_0 \left(1 - \frac{1}{k_1}\right) < \alpha_0; \quad \alpha_2 < \beta_2 = \frac{\beta_1}{k_2} + \alpha_1 \left(1 - \frac{1}{k_2}\right) < \alpha_1; \\ \alpha_3 < \beta_3 = \frac{\beta_2}{k_3} + \alpha_2 \left(1 - \frac{1}{k_3}\right) < \alpha_2 \dots \end{aligned} \quad (17)$$

З огляду на те, що $k_i < 0$, а саме $-2 < k_i < -\frac{1}{2}$, (див. [1]), остаточно маємо

$$\begin{aligned} \alpha_0 < \beta_0 < (1 - k_1)\alpha_0 + k_1\alpha_1; \quad \alpha_1 < \beta_1 < (1 - k_2)\alpha_1 + k_2\alpha_2; \\ \alpha_2 < \beta_2 < (1 - k_3)\alpha_2 + k_3\alpha_3 \dots \quad \alpha_{n-2} < \beta_{n-2} < (1 - k_{n-1})\alpha_{n-2} + k_{n-1}\alpha_{n-1} \dots \end{aligned} \quad (18)$$

Для того, щоб підключити в систему (17) нерівності, що містять β_{n-1} і β_n , перетворимо ліву частину останньої нерівності з (16)

$$\beta_{n-1} = \beta_n \cdot k_n + \alpha_{n-1}(1 - k_n). \quad (19)$$

З умови $\alpha_{n-1} < \beta_{n-1} < \alpha_{n-2}$ маємо ($k_n < 0$) $\alpha_{n-1} < \beta_n \cdot k_n + \alpha_{n-1}(1 - k_n) < \alpha_{n-2}$, або

$$\frac{\alpha_{n-2}}{k_n} + \alpha_{n-1} \left(1 - \frac{1}{k_n}\right) < \beta_n < \alpha_{n-1}. \quad (20)$$

Аналогічно

$$\frac{\alpha_{n-3}}{k_{n-1}} + \alpha_{n-2} \left(1 - \frac{1}{k_{n-1}}\right) < \beta_{n-1} < \alpha_{n-2} \quad (21)$$

Сукупність нерівностей (18) + (20) + (21) охоплює вичерпний перелік кутів β_i ($i = \overline{0; n}$) нахилу дотичних. Для спрощення подальших розрахунків доцільно звести всі наявні обмеження до вигляду з однією невідомою змінною за допомогою виразу (17). Для цього кожен параметр β_0 , для чого виразимо всі β_i , $i = \overline{1; n}$, через β_0 , який у цій математичній моделі виконує роль базового керуючого параметра.

$$\begin{aligned} \alpha_0 < \beta_0 < (1 - k_1)\alpha_0 + k_1\alpha_1; \quad \alpha_1 < \beta_1 = \frac{\beta_0}{k_1} + \alpha_0 \left(1 - \frac{1}{k_1}\right) < (1 - k_2)\alpha_1 + k_2\alpha_2; \\ \frac{\alpha_{n-2}}{k_n} + \alpha_{n-1} \left(1 - \frac{1}{k_n}\right) < \beta_{n-1} = \frac{\beta_0}{k_1 k_2 \dots k_n} + \frac{\alpha_0}{k_2 k_3 \dots k_n} \left(1 - \frac{1}{k_1}\right) + \frac{\alpha_1}{k_3 k_4 \dots k_n} \left(1 - \frac{1}{k_2}\right) + \dots + \alpha_{n-1} \left(1 - \frac{1}{k_n}\right) < \alpha_{n-1}, \end{aligned} \quad (22)$$

або

$$\begin{aligned} \alpha_0 < \beta_0 < (1 - k_1)\alpha_0 + k_1\alpha_1; \\ \alpha_0(1 - k_1) + k_1\alpha_1 > \beta_0 > \alpha_0(1 - k_1) + k_1\alpha_1(1 - k_2) + k_1k_2\alpha_2; \dots \\ \alpha_0(1 - k_1) + k_1\alpha_1(1 - k_2) + \dots + k_1k_2 \dots k_{n-2}\alpha_{n-2} \lesssim \beta_0 \lesssim \alpha_0(1 - k_1) + \\ + k_1\alpha_1(1 - k_2) + k_1k_2\alpha_2(1 - k_3) + \dots + k_1k_2 \dots k_{n-1}\alpha_{n-1}. \end{aligned} \quad (23)$$

У фінальних трьох нерівностях характер знака – у порівнянні з аналогічними виразами з (16) – залишається незмінним, якщо індекс n є парним, і змінюється на протилежний, якщо n є непарним.

Система (23) відіграє ключову роль у процесі визначення параметра β_0 . Вона структурована як дві сукупності знакочергових обмежень, оскільки виконується умова $k_i < 0$. Якщо вона має розв'язок, то існує відрізок вибору значення $\beta_0 = \beta'_0$, що забезпечує рішення. Після вибору β'_0 розраховується β_i з (16) при $\beta_0 = \beta'_0$, потім $\bar{\beta}_{i-0}$ і $\bar{\beta}_{i+0}$, $i = \overline{1; n-2}$ що дозволяє розрахувати інтерполяційні функції для кожної окремої ланки згідно з методикою [3] за формулою (18):

$$\bar{y} = \{(l_i - \bar{x}) \operatorname{tg} \bar{\beta}_{i-1} - \bar{x} \operatorname{tg} \beta_i\} \cdot \sin \frac{\bar{x}(l_i - \bar{x})}{l_i^2}. \quad (24)$$

Варто зауважити, що як базовий керуючий параметр замість β_0 можна із системи (22) з урахуванням співвідношень (21) вибрати будь-який інший параметр β_s , $s \in [1; n-1]$, розрахувати залежність інших β_i , $i = \overline{0; n}$, $i \neq s$, від β_s і одержати обмеження (23), з якого вибрати шукане $\beta_s = \beta'_s$, що забезпечує рішення. Практика показує, що такий підхід найбільш ефективний тоді, коли діапазон допустимих значень для обраного β_s є мінімальним.

При розв'язанні системи (23) основна складність полягає в коректному підборі параметрів $k_i \in [-2; -0,5]$. Процес пошуку рішення доцільно розпочинати з умови $k_i = k = -1$, що забезпечує геометричну симетрію кривої відносно центральної точки сегмента $\bar{x} \in [0; l_i]$. Якщо за такого підходу виконуються всі нерівності системи (23) і визначається допустимий інтервал для вибору β_0 , то як моделюючи криву можна використовувати обвідну, сформовану з таких симетричних ділянок. У разі порушення будь-якої з нерівностей слід скоригувати значення $-2 < k_i < -0,5$ насамперед тих коефіцієнтів, що входять до складу некоректних виразів. Шляхом ітераційного підбору цих параметрів можна досягти виконання всіх обмежень і знайти остаточне розв'язання.

Висновки. Запропонована методика дає можливість застосовувати локальні методи безперервної інтерполяції для ущільнення ДПК. Це реалізується через використання спеціальної інтерполуючої функції та призначення дотичних у вузлах у межах сформованої смуги кутів суміжності γ_i . Такий підхід гарантує відсутність небажаної осциляції, забезпечує неперервність перших похідних у місцях з'єднання сегментів моделюючої кривої, а також дозволяє здійснювати глобальне формування дотичних у вузлових точках.

Список використаних джерел

1. Найдиш В. М., Щербина В. М. Неперервна інтерполяція спіралеподібних ДПК спеціальною функцією. *Прикл. геом. і інж. графіка: Праці Таврійська державна агротехнічна академія*. Вип. 4, т. 19 – Мелітополь : ТДАТА 2003, С. 3–6.
2. Найдиш В. М., Щербина В. М. Згущення однозначних дискретно представлених кривих. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Вип. 72. К., КНУБА, 2003, С. 22–27.
3. Мацулевич О. Є., Найдиш А. В. Моделювання спіралеподібних ДПК у полярній системі координат на основі кутів нахилу ланок СЛЛ. *Прикл. геом. та інж. графіка: Праці ТДАТА*. Вип. 4. Т. 16. Мелітополь : ТДАТА, 2002. С. 31–35.
4. Найдиш В. М., Щербина В. М. Згущення однозначних дискретно представлених кривих. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Київ, 2003. Вип. 27. С. 22–27.
5. Найдиш В. М., Щербина В. М. Формування обводів другого порядку гладкості на основі спеціальної функції. *Сучасні проблеми геометричного моделювання: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф.* Львів, 2003. С. 83–85.
6. Alrefo I. F., Matsulevych O., Vershkov O., Halko S., Suprun, O., Miroshnyk, O. Designing the working surfaces of rotary planetary mechanisms. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2023. 4, 82–88. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-4/082>
7. Havrylenko Y., Cortez J. I., Kholodniak Y., Garcia G. T.. *Modelling of surfaces of engineering products on the basis of array of points* *Tekhnicheskii vjesnik* 27, 6(2020), 2034–2043. DOI: <https://doi.org/10.17559/TV-20190720081227>

8. Havrylenko Y., Kholodniak Y. Formation of geometric model of the impeller of the turbocharger. *Proceedings of the Tavria State Agrotechnological University*, 2014. 14, 48–53.
9. Havrylenko Y., Kholodniak Y., Halko S., Vershkov O., Miroshnyk O., Suprun O., Dereza O., Shshur T., Śrutek. M. Representation of a monotone curve by a contour with regular change in curvature. *Entropy*, 2021. 23(7), 923, 1–14. DOI: <https://doi.org/10.3390/e23070923> Праці ТДАТУ Випуск 25. Том 2 110 Proceedings TSATU. 2025. 25.
10. Havrylenko Y., Kholodniak Y., Halko S., Vershkov O., Bondarenko L., Suprun, O., Miroshnyk, O., Shshur, T., Śrutek, M., & Gackowska M. (2021). Interpolation with specified error of a point series belonging to a monotone curve. *Entropy*, 23(5), 493, 1–13. DOI: <https://doi.org/10.3390/e23050493>
11. Холодняк Ю. В., Гавриленко Є. А. Розв'язання позиційних задач при моделюванні монотонних кривих ліній. *Сучасні проблеми моделювання*. 2022. Вип. 24. С. 173–181.
12. Холодняк Ю. В., Гавриленко Є. А. Моделирование каркаса динамических поверхностей. Інноваційні технології в агропромисловому комплексі : матеріали II всеукраїн. наук.-практ. Інтернет-конференції. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. С. 21–24.
13. Холодняк Ю. В., Гавриленко Є. А. Моделювання кривих ліній із заданою точністю. Інноваційні технології в агропромисловому комплексі : матеріали II всеукраїн. наук.-практ. Інтернет-конференції. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. С. 28–31.
14. Мацулевич О. Є., Щербина В. М. Використання пакету прикладних програм NETCRACKER. Фундаментальна підготовка фахівців у природничо-математичній, технічній, агротехнологічній та економічній галузях : матеріали Всеукраїнської наук.-практ. конференції з міжнар. участю, м. Мелітополь, присвяченої 85-річчю кафедри вищої математики і фізики ТДАТУ, 11–13 вересня 2017 р. Мелітополь, 2017. С. 107–108.

Дата першого надходження статті до видання: 19.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



O. Matsulevych¹, Yu. Lazarchuk-Vorobiova²

¹ Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

² National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

A MATHEMATICAL MODEL OF CONTINUOUS INTERPOLATION OF A SPIRAL-SHAPED DPC USING A SPECIAL FUNCTION

Summary

Continuous modeling is particularly effective for solving problems related to trajectory generation in CNC systems or the search for extreme values. In this case, only the basic reference points are stored in the computer's memory, while the additional coordinates of the array are calculated dynamically as needed.

However, existing methods have significant drawbacks: they do not guarantee the absence of parasitic oscillation (wave-like distortions), and the behavior of the curve on the end segments of the point sequence is often unpredictable. This forces researchers to constantly adjust coefficients and perform repeated calculations. To minimize computational complexity and reduce errors, it is rational to use local modeling methods that involve a subsequent transition to a general (global) coordinate system.

The use of traditional continuous interpolation often fails to accurately predict the shape of the curve at the boundaries of a given set of points, which necessitates recalculating the parameters. To avoid excessive computations and the accumulation of errors, we propose the implementation of a local modeling method followed by the transformation of coordinates into a global system.

The methodology proposed in this work makes it possible to apply local continuous interpolation methods for DPC densification. This is achieved through the use of a special interpolation function. This approach guarantees the absence of unwanted oscillation, ensures the continuity of first derivatives at the junctions of the modeling curve segments, and also allows for the global formation of tangents at nodal points.

Keywords: spiral-shaped discretely represented curve, accompanying broken line, tangent.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-10>

УДК 664.65:339.13; 664.65:640.43 664.65:339.138

Р. В. Миронов, винахідник

ORCID: 0009-0009-5323-0962

Л. Л. Веспер, директор

ORCID: 0000-0002-4448-9851

Інформаційно-дослідницький Центр «Український інтелект»

e-mail: mironov.promo@gmail.com

МАРКЕТИНГОВЕ ОБГРУНТУВАННЯ ІНТЕГРОВАНОГО МЕТОДУ ТЕРМО-АЕРОДИНАМІЧНОЇ РЕЦИРКУЛЯЦІЇ ДЛЯ ВИСОКОЕФЕКТИВНИХ ПЕЧЕЙ З ВИРОБНИЦТВА ПІЦИ

Анотація. У статті обгрунтовано ринкову доцільність впровадження технологічної інновації у виробництві піци, що базується на інтегрованому методі термо-аеродинамічної рециркуляції для вискоєфективних печей. Досліджено вплив гібридних та дров'яних печей на інтенсифікацію процесу випікання, зниження операційних витрат і формування споживчої цінності продукту.

Проаналізовано сучасні тенденції розвитку міжнародного ринку піци, зокрема зростання сегменту «ремісничої піци, випеченої у дров'яній печі», що характеризується підвищеним попитом і преміалізацією продукту. Встановлено, що технологія випікання є ключовим фактором формування органолептичних характеристик продукції (смак, аромат, текстура) та впливає на поведінкові моделі споживачів. Проаналізовано сегмент ринку B2B, а саме, виробництво дров'яних та гібридних печей. Обгрунтовано доцільність впровадження методу термо-аеродинамічної рециркуляції у виробництво печей. Запропонований інтегрований метод термо-аеродинамічної рециркуляції забезпечує підвищення щільності теплового потоку за рахунок оптимізації конвективної та радіаційної складових теплообміну, що дозволяє реалізувати високотемпературний режим випікання (до 500°C) із скороченням тривалості процесу до 60 с без втрати якості продукції.

Доведено, що впровадження зазначеної технології сприяє підвищенню енергоефективності, стабілізації температурного режиму, покращенню повторюваності якості продукції та оптимізації виробничих процесів. З маркетингової точки зору, використання дров'яних та гібридних печей формує додану споживчу цінність продукту, підвищує довіру споживачів та забезпечує конкурентні переваги у сегментах artisanal / wood-fired, premium та fast-casual.

Ключові слова: технологія приготування піци, інновації у харчовій галузі, дров'яна піч, реміснична піца, піца на дровах, «піца у неаполітанському стилі», преміум сегмент ринку піци, wood-fired / artisanal, «Neapolitan-style pizza», open kitchen, street food.

Постановка проблеми. Сучасний ринок харчування динамічно розвивається, щоразу пропонуючи нові концепти, технології, переосмислення традицій. Піца, як готовий продукт споживання, залишається у списку найулюбленіших страв у всьому світі. Високий попит створює сприятливі умови для конкуренції та технологічних інновацій у даному секторі. Інженери і технологи невпинно працюють над зниженням операційних витрат, підвищенням якості кінцевого продукту та збільшенням продажів.

У сучасних умовах споживач дедалі більше орієнтується не лише на смак, але й на досвід споживання, включаючи аромат, візуальне сприйняття та емоційний контекст приготування їжі. Використання дров'яних печей сприяє формуванню поведінкових моделей споживача завдяки створенню більш інтенсивного ароматичного профілю, відкритому процесу приготування («theatre cooking effect») та підвищує привабливість продукту завдяки поєднанню сенсорних факторів.

Динаміка ринку піци обумовлює також зміни на ринку B2B, де зростає і стабілізується попит у сегменті виробництва печей. Особливу увагу привертають гібридні, і, зокрема, дров'яні печі, що перетворюються на маркер якості кінцевого продукту.

Запропонована методологія «Інтегрований метод термо-аеродинамічної рециркуляції для високоефективних печей», що лежить в основі розробленої печі для випікання піци, базується на комплексному інженерному підході, що поєднує термодинаміку, аеродинаміку та оптимізацію теплопередачі для підвищення ефективності, стабільності температури та якості продукції.

Розроблена технологічна інновація має прикладне значення для харчової промисловості, особливо для оптимізації процесів випікання, забезпечення стабільної якості продукції, підвищення енергоефективності та рентабельності виробництва, та, як результат – збільшення прибутків.

Аналіз останніх досліджень. У період після COVID спостерігалася зміна споживчої поведінки сегменту ринку «піца» як на локальних, так і на міжнародному ринках. Відповідно до загального росту споживання піци у світі, зріс і попит на вироби, які вирізняються за такими ознаками як: автентичність; ремісниче виробництво; піца випечена на дровах.

За даними Euromonitor International [1], сегмент «реміснича піца» (artisanal pizza), включаючи продукцію, випечену у дров'яних печах, демонструє стабільне зростання на рівні 6–8 % щорічно.

Динаміка ринку піци на дровах. За останні 5 років (2021–2025) глобальний ринок піци демонструє стабільне зростання загального тренду +5–8 % CAGR (Compound Annual Growth Rate) та вибуховий ріст сегменту «реміснича піца, випечена у дров'яній печі / піца преміум класу» «artisan / wood-fired / premium pizza» [1].

Згідно Euromonitor International [1] загальна динаміка споживання піци у різних країнах демонструє:

У США ринок піци перевищує \$45 млрд/рік – понад 350 скибок піци споживається щосекунди. Цікаво, що у США, де дров'яна піца традиційно позиціонувалась як нішевий продукт преміум сегменту (premium niche), постійно зростаючий попит на неї сформував новий сегмент ринку: дров'яна піца, як масовий продукт.

На найбільш зрілому ринку – батьківщині піци – у Європі, структура ринку продукту дещо трансформувалася. Так, наприклад, за останні 4 роки ринки Італії, Франції, Іспанії, Німеччини демонструють різкий ріст преміального сегменту закладів швидкого харчування (premium casual dining).

Сегмент «реміснича піца», включаючи «випечена у дров'яній печі» у великих містах Європи зростав на +6–8 % щорічно, а до 30–40 % новостворених піцерій позиціонують себе як «реміснича піца, випечена у дров'яній печі».

Піца зайняла свою нішу у галузі гастрономічного туризму, а зв'язок між піцою та культурною спадщиною став окремим предметом наукових досліджень [5, 6]. Широко відома Неаполітанська піца, еталонна технологія виробництва якої вимагає випікання в дров'яних печах згідно TSG (Traditional Speciality Guaranteed), тобто, «Гарантована традиційна особливість» [7]. За останні 5 років локальний тренд «Неаполітанська піца» (Pizza Napoletana) [5, 7] з її невід'ємним концептом «піца на дровах», стає драйвером ринку, розкриваючи двері модернізованому продукту «піца у неаполітанському стилі» («Neapolitan-style pizza»), як масовому стандарту. За даними Euromonitor International [1], найбільш динамічний ріст демонструють ринки Азії. Тут піца міцно тримається у ключовому тренді як «західний lifestyle продукт». Разом з тим, динамічно формується і новий преміум сегмент «реміснича піца на дровах», що впевнено займає побуває ознак «преміум продукту для масового ринку».

За даними звітів [1, 2, 9], азійський ринок піци – Китай, Японія, Південна Корея, Сінгапур у сегменті «реміснича піца на дровах» демонструє середньорічний темп зростання (CAGR) на рівні 10–15 %.

Специфіка формування сегменту «преміум – піца на дровах» ринку у різних країнах Азії:

Японія – дуже високий попит на автентичну неаполітанську піцу. Це обумовлює попит на сертифікованих майстрів та виробництво/модернізацію печей.

Китай – швидкий ріст преміум ресторанів, де дров'яна піч перетворюється на елемент статусу.

За даними Technomic [10], сегмент преміального та ремісничого виробництва піци у всьому світі демонструє стабільне зростання, зокрема у форматі концепції «реміснича піца, випечена у дров'яній печі», рис. 1.

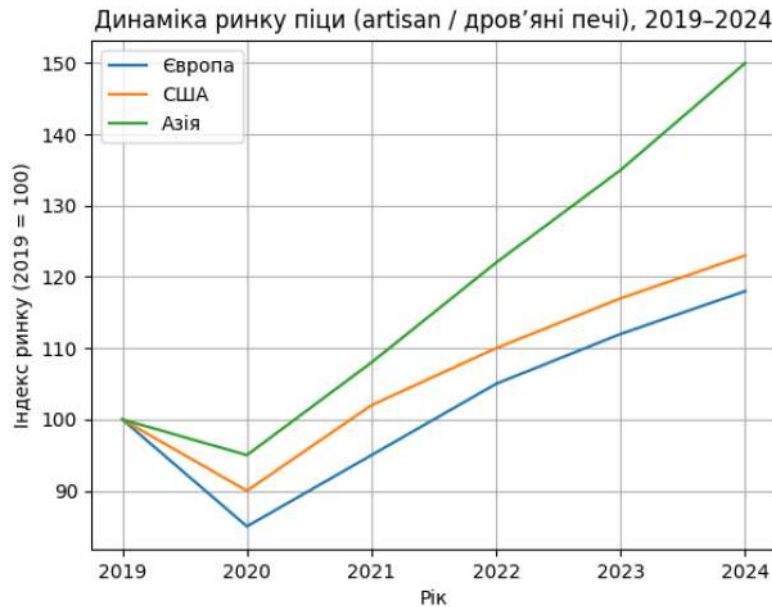


Рис. 1. Динаміка ринку ремісничої піци (на дровах)

Дослідження споживацьких симпатій [9] показують, що близько 63 % опитаних вважають піцу з дров'яної печі більш смачною, а 58 % асоціюють її з вищою якістю. Крім того, за даними Mintel [11], понад 54 % споживачів позитивно сприймають характерний «запах димку» («smoky flavor»), що формується під час дров'яного випікання. Що характерно, серед молодшої аудиторії (18–34) цей показник зростає до ~65 %.

Візуальний ефект відкритого приготування (візуал + процес) також відіграє важливу роль у формуванні поведінкової моделі споживача. Так, згідно з NPD Group [12], це підвищує ймовірність покупки та збільшує середній чек на 15–20 %.

Згідно з Euromonitor International [1] «реміснича піца на дровах» сприймається як продукт преміум сегменту, за який споживачі готові платити на 20–30 % більше, ніж за стандартну піцу.

Науково-практичний висновок. Протягом останніх п'яти років глобальний ринок піци демонструє стабільне зростання, при цьому сегмент продукції преміум класу – «реміснича піца на дровах» розвивається швидшими темпами порівняно із загальним ринком. Найбільш динамічний розвиток спостерігається в країнах Азії, тоді як у США та Європі відбувається трансформація ринку у напрямку підвищення якості та інтенсифікації виробництва.

Динаміка тренду тягне за собою підвищення стандартів виробництва: сертифікацію TSG, активний розвиток локальних піцерій, франшиз, та, як результат, ріст попиту на виробництво печей: дров'яних та гібридних.

Аналіз існуючих технологій.

Порівняльний аналіз відомих конструкцій печей, включаючи традиційні дров'яні печі, модульні багатофункціональні печі та печі з газовим охолодженням, виявив ключові обмеження існуючих технологій, а саме:



- низька теплова ефективність [14];
- тривалий час нагрівання [15];
- нестабільність потоку повітря під впливом зовнішнього середовища [14];
- недостатня температура або нерівномірний розподіл тепла [17];
- відсутність бажаних органолептичних якостей кінцевого продукту [16, 17].

Мета дослідження: обґрунтувати ринкову доцільність технологічної інновації у конструкції печі для випікання піци.

Завдання дослідження:

1. Вивчити стан та перспективи трансформації традиційних методів виробництва піци до сучасних умов ринку.
2. Дослідити технологічні інновації та методи в конструкціях печей для виробництва піци на міжнародному ринку.
3. Запропонувати методологію виробництва піци, що поєднує термодинаміку, аеродинаміку та оптимізацію теплопередачі.

Основна частина.

Всебічний аналіз сучасного ринку піци, його трендів і тенденцій, а також, наявних технологій та методів в конструкціях печей для виробництва піци, дозволив обґрунтувати доцільність впровадження технологічної інновації виробництва піци – «Інтегрований метод термо-аеродинамічної рециркуляції для високоефективних печей». Ґрунтуючись на практичному досвіді ведення бізнесу, маркетингових дослідженнях та результатах науково-технічного експерименту (модельна конструкція печі), автор винаходу Р. В. Миронов, розробив вдосконалену методологію виробництва піци. Запропонована методологія поєднує термодинаміку, аеродинаміку та оптимізацію теплопередачі в печі, що суттєво підвищує продуктивність виробництва, оптимізує операційні витрати та задовольняє сучасні очікування споживачів. Дана методологія зареєстрована в Українському національному офісі інтелектуальної власності та інновацій (УКРНОІВІ) під назвою «Інтегрований метод термо-аеродинамічної рециркуляції для високоефективних печей», номер заявки u202601606.

Дана конструкцію печі забезпечує:

- швидкий нагрів до високих температур (до 500 °C);
- покращене збереження тепла (підвищення ефективності);
- рівномірний розподіл тепла всередині пекарної камери;
- захист від зовнішніх збурень потоку повітря;
- поєднання переваг газового та дров'яного опалення.
- інтенсивне перемішування гарячих газів;
- сприяють рівномірному розподілу температури по всій камері та поду.

Методологія винаходу застосовує принципи динаміки вихрових потоків та контрольованої турбулентності для покращення теплопередачі.

Запропонований «Інтегрований метод термо-аеродинамічної рециркуляції для високоефективних печей» є допустим стандартом TSG [7] для «піци на дровах». Таким чином, винахід дозволяє випікати піцу у дров'яній печі при температурі 500 °C за 60 сек., що інтенсифікує процес виробництва без втрати якості та дає суттєві конкурентні переваги. Інтенсифікація процесу випікання при вказаних параметрах пояснюється зростанням щільності теплового потоку, який визначається сумою конвективної та радіаційної складових за формулою:

$$q = h(T_{air} - T_{surface}) + \varepsilon\sigma(T_{wall}^4 - T_{surface}^4).$$

Рис. 2. Формула теплового потоку

Розшифрування параметрів: q – щільність теплового потоку, Вт/м²; h – коефіцієнт тепловіддачі (конвекції), Вт/(м² · К); T_{air} – температура повітря у печі, К; $T_{surface}$ – температура поверхні піци, К; Різниця ($T_{air} - T_{surface}$) визначає конвективний тепловий потік; ε – ступінь чорноти (емісійна здатність – показує, наскільки добре поверхня випромінює/поглинає тепло); σ – стала Стефана–Больцмана, значення: $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ Вт/(м² · К⁴); T_{wall} – температура стінок печі, К; $T_{wall}^4 - T_{surface}^4$ – радіаційний теплообмін.

Таким чином, щільність теплового потоку, що надходить до поверхні продукту, визначається сумою конвективної та радіаційної складових. Конвективна складова залежить від різниці температур між повітрям у печі та поверхнею виробу, тоді як радіаційна складова визначається температурою стінок печі та описується законом Стефана–Больцмана. При температурах близько 500 °С домінує радіаційний теплообмін, що забезпечує різке зростання інтенсивності нагріву та дозволяє скоротити час випікання до 60 с.

Висновки. Традиційні методи виробництва піци співіснують з новими технологічними рішеннями. З точки зору маркетингу, технологічні інновації у виробництві піци дозволяють зменшити собівартість продукту та підвищити продажі, дотримуючись стандартів та зберігаючи якість виробу. Це досягається через:

- оптимізацію витрат на виробництво
- збільшення енергоефективності
- збільшення клієнтського потоку за рахунок зменшення часу очікування клієнта, та швидший оборот замовлень
- збільшення ефективності використання простору кухні

Запровадження методу дає суттєві маркетингові переваги, особливо у сегменті «ремісничка / дров'яна / преміум піца». З точки зору маркетингу, дров'яна піч відтворює емоції домашнього тепла, сімейних традицій, підвищує довіру клієнтів, і, як результат – збільшує середній чек. Це ефективно майже для усіх сегментів ринку – як для open kitchen та street food, так і для преміум сегменту.

Запропонована методологія «Інтегрований метод термо-аеродинамічної рециркуляції для високоефективних печей», дозволяє використання високотемпературних режимів випікання (500 °С, 60 с), що задовольняє стандарт TSG та зберігає сенсорні характеристики продукції.

Розробка може бути з успіхом застосована для оптимізації бізнес процесів: зменшення операційних витрат, збільшення обороту, підсилення позицій на конкурентному ринку.

Завдяки підвищенню повторюваності результатів у серійному виробництві, технологія сприяє розвитку бізнесу, надаючи важливі переваги для стартапів, брендування, масштабування, франчайзингу, мульти-локацій та розвитку мереж на локальному та міжнародному ринках.

Список використаних джерел

1. Euromonitor International. URL: <https://www.euromonitor.com> (дата звернення: 02.02.2026)
2. Statista. URL: <https://www.statista.com/outlook/cmo/food/pizza/worldwide> (дата звернення: 09.02.2026)
3. Pagliarini E. et al. Sensory evaluation of pizza baked in different ovens. LWT. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2009.10.018>
4. Le-Bail A. et al. Modeling heat and mass transfer in pizza baking. Journal of Food Engineering. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.05.031>
5. Stazio M. Verace Glocal Pizza. Localized globalism and globalized localism in the Neapolitan artisan pizza. Food Culture and Society. 2021. 24(3). P. 406–430. DOI: <https://doi.org/10.1080/15528014.2021.1884400>
6. Falciano A., Masi P., Moresi M. Performance characterization of a traditional wood-fired pizza oven. Journal of Food Science. 2022. 87. P. 4107–4118. DOI: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16268>
7. European Commission. Commission Regulation (EU) No 97/2010. Official Journal of the European Union. 2010. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32010R0097> (дата звернення: 15.03.2026)



8. CNA. Pizza un business che lievita anno per anno. URL: <https://www.cna.it/pizza-un-business-che-lievita-anno-per-anno/> (дата звернення: 14.02.2026)
9. Grand View Research. Pizza Market Report. URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/pizza-market> (дата звернення: 18.02.2026)
10. Technomic. Pizza search. URL: <https://www.technomic.com/search?search=pizza> (дата звернення: 27.02.2026).
11. Mintel. Pizza and Italian Restaurants – Global Trends. 2023. URL: <https://www.mintel.com/search?query=pizza> (дата звернення: 18.03.2026)
12. Circana (formerly NPD Group). Foodservice pizza consumption trends. 2023. URL: <https://www.circana.com/insights/foodservice/pizza/> (дата звернення: 06.03.2026).
13. Fellows P. Food Processing Technology. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2014-0-03586-2>
14. Mansour Y. et al. Thermal characterization of a high-temperature industrial bread-baking oven. Applied Thermal Engineering. 2024. 236(A). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121467>
15. Taylor and Francis. Modeling heat and mass transfer in bakery ovens. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1581729>
16. Nicoli M. C. et al. Influence of processing on food properties. Trends in Food Science and Technology. 1997. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(97\)01028-6](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(97)01028-6)
17. Pugliese A. et al. Influence of high-temperature baking on pizza quality. LWT. 2021. 147. P. 111565. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111565>
18. Incropera F.P., DeWitt D.P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119320425>

Дата першого надходження статті до видання: 19.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



R. Myronov, L. Vesper
Information and Research Center “Ukrainian Intellect”

MARKET-BASED JUSTIFICATION OF AN INTEGRATED THERMO-AERODYNAMIC RECIRCULATION METHOD FOR HIGH-EFFICIENCY PIZZA OVENS

Summary

This study substantiates the market feasibility and technological effectiveness of an innovative approach to pizza production based on an integrated thermo-aerodynamic recirculation method for high-efficiency ovens. The research focuses on the impact of hybrid and wood-fired baking technologies on process intensification, reduction of operational costs, and enhancement of consumer value.

Current trends in the global pizza market are analyzed, with particular emphasis on the rapid growth of the artisanal and wood-fired pizza segment, which demonstrates increasing demand and product premiumization. It is shown that baking technology plays a crucial role in determining the organoleptic properties of pizza, including taste, aroma, texture, and visual appearance, and significantly influences consumer behavior patterns.

The proposed thermo-aerodynamic recirculation method improves heat transfer efficiency by optimizing the balance between convective and radiative heat flux components. This enables high-temperature baking (up to 500 °C) with a reduced processing time (approximately 60 s) while maintaining product quality and sensory characteristics.

The results demonstrate that the implementation of this technological solution contributes to improved energy efficiency, stabilization of thermal conditions, enhanced product consistency, and optimization of production processes. From a marketing perspective, the use of wood-fired and hybrid ovens increases perceived product quality, strengthens brand positioning, and provides competitive advantages in artisanal, premium, and fast-casual market segments.

Keywords: pizza baking; wood-fired oven; heat transfer; energy efficiency; sensory quality; consumer behavior; food innovation; premium food segment.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-11>

УДК 631.371

В. Т. Надикто, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-1770-8297

І. О. Жокін, аспірант

ORCID: 0009-0007-4711-1540

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: volodymyr.nadykto@tsatu.edu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВОРОТКОСТІ ТРАКТОРА У СКЛАДІ ТРИМАШИННОГО ПОСІВНОГО АГРЕГАТУ

Анотація. У даній статті розглянуто динаміку повороткості реверсивно налаштованого трактора у агрегаті з напівнавісною зчіпкою і трьома причіпними зерновими сівалками, дві із яких є боковими, а одна – центральною. Проблемою такого машинно-тракторного агрегату (МТА) є можливість фізичного зіткнення внутрішніх коліс бокових посівних машин із рушіями енергетичного засобу. В напрямку унеможливлення такого перебігу подій слід мати на увазі і враховувати наступне. За збільшення кута повороту керованих коліс трактора у 5 разів (з 5 до 25°) значення кута уводу їх шин зростає у 6 разів. При збільшенні значення коефіцієнта опору коченню з 0,12 до 0,20 (у 1,67 рази) кут уводу шин зростає з 0,26 до 0,44 град., тобто у 1,69 рази. Для зменшення кута уводу шин керованих коліс трактора тиск повітря в них ($p_{ш}$) має бути якомога меншим. Причому, за більших значень параметра $p_{ш}$ інтенсивність його впливу на величину кута уводу шин керованих коліс енергетичного засобу є меншою. Центральна причіпна сівалка приєднується до мосту керованих коліс трактора на відстані b від нього. Чим більша значина цього параметра, тим меншим є кут уводу шин керованих коліс трактора. За збільшення кута повороту від 5 до 11° зменшення значення радіуса повороту МТА здійснюється більш інтенсивно, ніж за збільшення параметра α від 11 до 25°. З огляду на це, зменшення радіуса повороту МТА кут повороту керованих коліс має бути більшим за 11°.

Ключові слова: сівалка, зчіпка, кут повороту керованих коліс, кут уводу шин, тиск повітря в шинах.

Постановка проблеми. За даними наукових досліджень непродуктивні витрати часу тим чи іншим агрегатом на здійснення поворотів можуть займати до 20 % часу його роботи [1]. Цілком зрозуміло, що це негативно відбивається на експлуатаційно-технологічних показниках функціонування МТА.

З огляду на це пошуки шляхів покращення повороткості того чи іншого МТА були, є і у оглядовому майбутньому залишатимуться досить актуальною проблемою. При цьому, гострота останньої тим більша, чим потенційно вища продуктивність роботи машинно-тракторного агрегату. Значення цього показника суттєво залежить від робочої ширини захвату [2]. І чим вона більша, тим актуальніше вимальовується потреба підвищення повороткості (маневрності) широкозахватних МТА, до яких відноситься розроблений нами тримашинний (тримодульний) посівний агрегат на основі трактора з реверсивною схемою робочого руху [3].

Аналіз останніх досліджень. Науковій практиці відомі спроби отримання експериментальних факторних статичних математичних моделей у вигляді аналітичних залежностей, які визначають дійсну траєкторію руху колісної машини по деформованій поверхні поворотної смуги поля [4–8]. Ці моделі дають можливість оцінити кінематичні та динамічні характеристики посівного МТА у залежності від таких конструктивних і експлуатаційних параметрів, як швидкість руху, поздовжня база трактора, ширина колії використовуваного енергетичного засобу, кут повороту керованих коліс трактора та ін.

У роботі [9] репрезентований тримодульний посівний комплекс, у якого дві сівалки займають бокове положення, певною мірою наближене до фронтального. Проте, автори описують лише конструкцію посівного машинно-тракторного агрегату. Ні кінематику, ні динаміку його плоско-паралельного руху на поворотній смузі вони не розглядають.

Серед теоретичних розробок практично відсутні ті, які можна застосувати до МТА з можливим набіганням його причіпних машин на колеса трактора під час маневрування на поворотній смузі. Тим більше не розглядався варіант використання реверсивного руху трактора у складі посівного МТА.

Мета дослідження – аналіз впливу конструктивних параметрів тримашинного посівного агрегату на динаміку його поворотності.

Основна частина. Фізичним об'єктом досліджень є машинно-тракторний агрегат у складі орно-просапного трактора, налаштованого на реверсивний хід, напівнавісної зчіпки і трьох причіпних зернових сівалок (рис. 1).

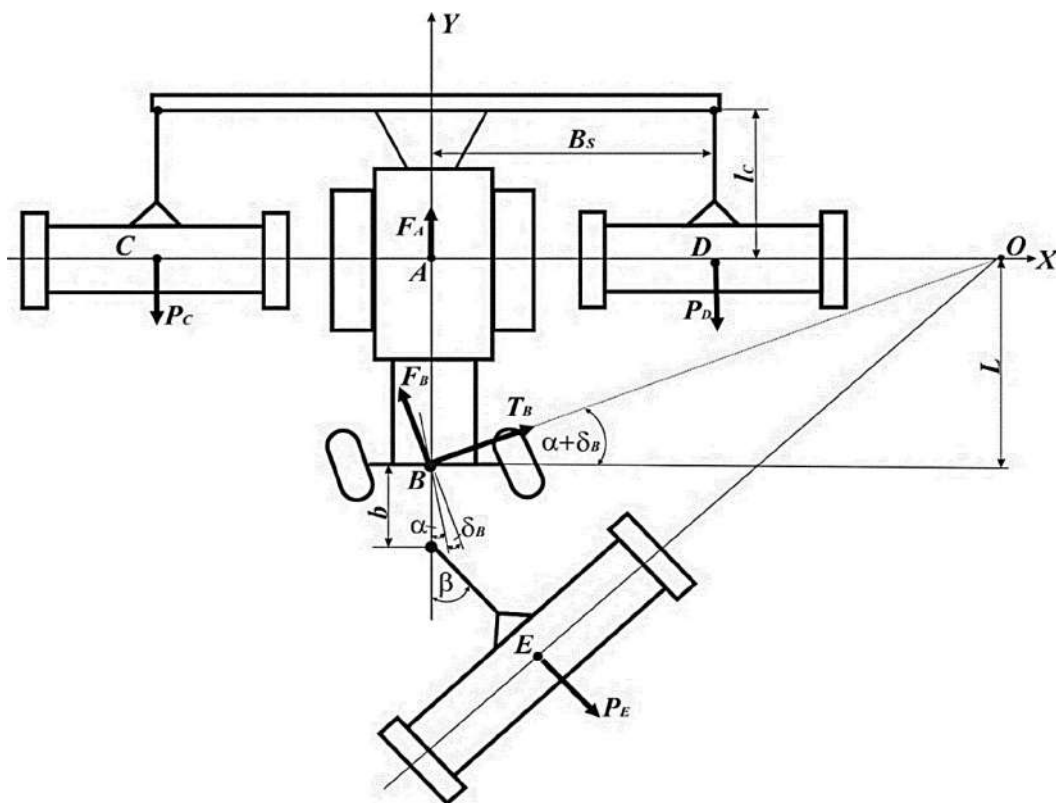


Рис. 1. Схема сил, які діють на МТА у процесі його повороту

У горизонтальній площині проєкцій на досліджуваний МТА під час його повороту відносно центру O діють наступні сили (рис. 1): рушійна (тягова) сила F_A , прикладена в середині переднього мосту трактора (т. A), Н; сила опору коченню лівої сівалки P_C , прикладена в т. C , Н; сила опору коченню правої сівалки P_D , прикладена у т. D , Н; рушійна сила F_B (Н), яка прикладена в середині заднього мосту трактора (т. B) і відхилена від повздовжньої осі трактора на суму кутів уводу шин цього ж моста (δ_B , град.) і повороту його коліс (α , град.); бокова сила T_B , прикладена до середини заднього мосту енергетичного засобу у т. B , Н; сила опору коченню центральної сівалки P_E (Н), яка прикладена у т. E і відхилена від осі симетрії трактора на кут β .

У підсумку система рівнянь рівноваги даного МТА є наступною:

$$\left. \begin{aligned}
 &F_A + F_B \cdot \cos(\alpha + \delta_B) + k_B \cdot \delta_B \cdot \sin(\alpha + \delta_B) - P_E \cdot \cos \beta - P_C - P_D = 0; \\
 &L \cdot [F_B \cdot \sin(\alpha + \delta_B) - k_B \cdot \delta_B \cdot \cos(\alpha + \delta_B)] - P_E \cdot \sin \beta \cdot (L + b) = 0; \\
 &P_C = f \cdot G_C; \\
 &P_D = f \cdot G_C; \\
 &P_E = f \cdot G_C; \\
 &F_A = P_C + P_D + f \cdot N_A; \\
 &F_B = P_E + f \cdot N_B; \\
 &k_B = 58 \cdot N_B \sqrt{\left(\frac{B_K}{D_K}\right)^3} \cdot \left(1.75 - 2.54 \cdot \frac{N_B}{\rho_{ш} \cdot \sqrt{B_K \cdot D_K^3}}\right).
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

У системі рівнянь (1) додатково позначені: f – коефіцієнт опору коченню; G_c – сила ваги сівалки, Н; N_A, N_B – вертикальні навантаження мостів трактора, Н; k_B – коефіцієнт опору уводу керованих коліс трактора, Н/рад.; B_K, D_K – ширина шини і діаметр керованих коліс трактор, м; $\rho_{ш}$ тиск повітря в шинах керованих коліс трактора, Па.

Отримана система рівнянь (1) дозволяє установити динаміку кута уводу шин керованих коліс трактора в залежності від кута їх повороту (α), а також від інших конструктивних параметрів посівного МТА. Першою чергою розглянемо природу впливу параметра α на кут уводу шин коліс трактора (рис. 2).

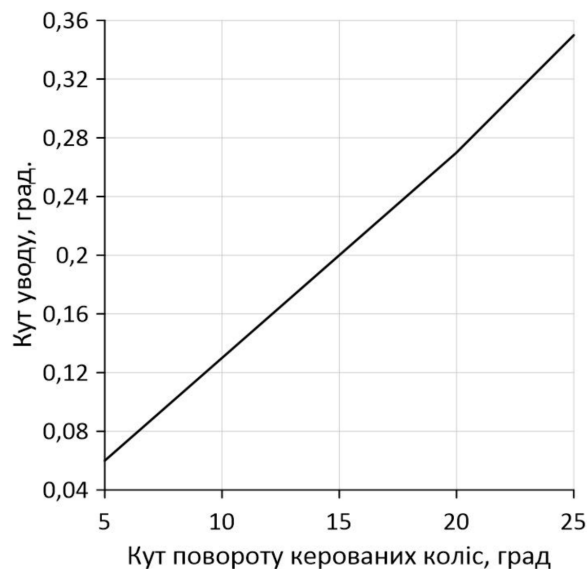


Рис. 2. Залежність кута уводу керованих коліс трактора від кута їх повороту

Як бачимо, збільшення параметра α бумовлює зростання значення кута δ_B , що у принципі є фактом цілком логічним. Так, за збільшення кута повороту керованих коліс трактора у 5 разів (з 5 до 25°) значення кута уводу їх шин зростає у 6 разів. Залежність $\delta_B = f(\alpha)$ у цьому випадку є лінійною і апроксимується рівнянням виду $\delta_B = 0,014 \cdot \alpha - 0,014$.

Далі розглянемо вплив інших параметрів агрегату на динаміку кута уводу шин керованих коліс трактора. Першою чергою це стосується тиску повітря в шинах керованих коліс трактора (рис. 3).

За даними теоретичних розрахунків збільшення параметра $\rho_{ш}$ бумовлює зменшення кута уводу δ_B . Логіка такого результату полягає у наступному. Як впливає із аналізу останнього

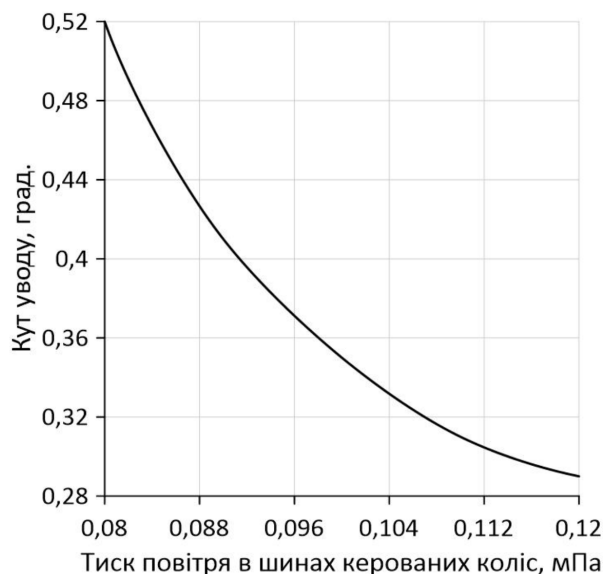


Рис. 3. Залежність кута уводу керованих коліс трактора від тиску повітря в їх шинах

рівняння системи (1), чим більший тиск повітря в шинах керованих коліс трактора, тим більшим є коефіцієнт опору їх уводу k_B . У цьому випадку незмінне значення бокової сили $T_B = k_B \cdot \delta_B$ можна забезпечити за меншого значення кута уводу δ_B . У підсумку отримуємо, що для зменшення кута уводу шин керованих коліс трактора тиск повітря в них має бути якомога меншим. При цьому слід мати на увазі, що при більших значеннях параметра $\rho_{ш}$ інтенсивність його впливу на величину кута уводу шин керованих коліс енергозасобу є меншою.

Дуже цікавим є той факт, що за збільшення значення коефіцієнту опору коченню кут уводу шин керованих коліс трактора теж збільшується (рис. 4).

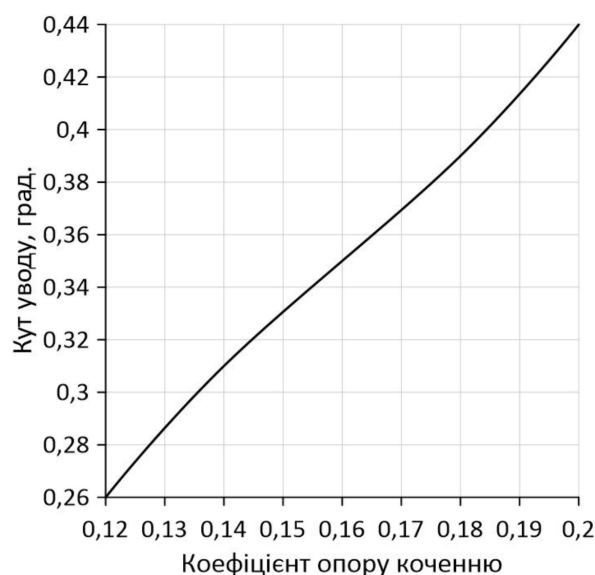


Рис. 4. Залежність кута уводу керованих коліс трактора від значення коефіцієнта опору коченню

Причому, за інтенсивністю – практично прямопропорційно. У кількісному вираженні це виглядає так: при збільшенні параметра f з 0,12 до 0,20 (у 1,67 рази) кут уводу шин зростає з 0,26 до 0,44 град., тобто у 1,69 рази. Причину цього явища пояснює той факт, що більш твердіший агротехнічний фон характеризується більшою величиною коефіцієнту опору коченню (f) по ньому колісного рушія. А чим твердіший опорний фон, тим менше він деформується під

дією бокової сили (у даному випадку це T_B). Шина поводить себе у цьому випадку навпаки – її деформація у вигляді кута уводу збільшується, що відповідним чином і відображено на рис. 4.

Зазначимо, що центральна сівалка приєднується до мосту керованих коліс трактора на відстані b від нього (рис. 1). Розрахунки показують: чим більша значина цього параметра, тим меншим є кут уводу шин керованих коліс трактора (рис. 5).

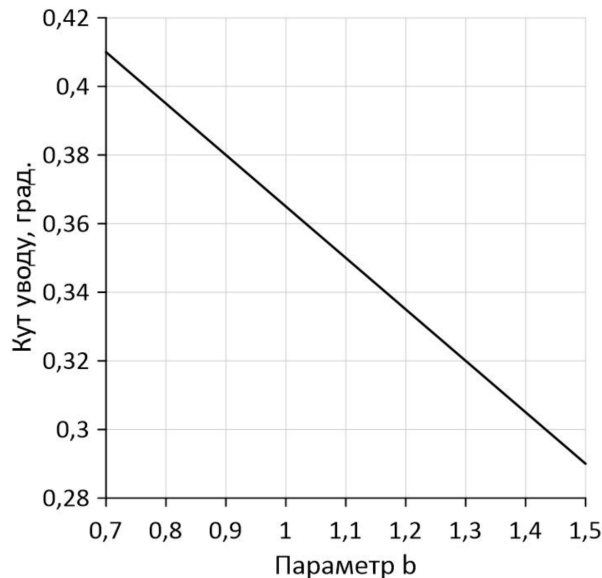


Рис. 5. Залежність кута уводу керованих коліс трактора від конструктивного параметра b

Справа у тому, що параметр b – це те плече, на якому сила опору коченню посівної машини P_E створює момент відносно точки B . Дія останнього направлена проти напрямку повороту МТА. А це, як впливає із другого рівняння системи (1), зменшує сумарний поворотний момент, зменшуючи при цьому його вплив на формування бокової сили T_B . У підсумку саме це приводить до того, що зі збільшенням значення параметра b кут уводу шин керованих коліс трактора зменшується.

Одним із найбільш важливих конструктивних параметрів будь-якого МТА, як уже підкреслювалося у першому розділі даної роботи, є радіус його повороту. Як засвідчують результати теоретичних досліджень, збільшення значення параметра α обумовлює зменшення параметра R_a (рис. 6). У принципі такий результат є цілком логічним. Хоча інтенсивність цього процесу не однакова у діапазоні змін значень кута повороту керованих коліс трактора. З допомогою методики, викладеної у [10], установлено, що за збільшення кута повороту від 5° до 11° (точка A , рис. 6) зменшення радіуса повороту МТА здійснюється більш інтенсивно, ніж за збільшення параметра α від 11° до 25° .

З огляду на це можна дійти до висновку, що під час руху агрегату на поворотній смузі кут повороту керованих коліс має бути більшим за 11° . Такий режим його повороту буде здійснюватися з меншим радіусом, що є результатом бажаним.

Висновки. За збільшення кута повороту керованих коліс трактора у 5 разів (з 5° до 25°) значення кута уводу їх шин зростає у 6 разів. Залежність $\delta_B = f(\alpha)$ у цьому випадку є лінійною і апроксимується рівнянням виду: $\delta_B = 0,014 \cdot \alpha - 0,014$.

При збільшенні значення коефіцієнта опору коченню з 0,12 до 0,20 (у 1,67 рази) кут уводу шин зростає з 0,26 до 0,44 град., тобто у 1,69 рази. Причина цього явища полягає в тому, що чим твердіший опорний фон, тим менше він деформується під дією бокової сили і тим більше це здійснює шина.

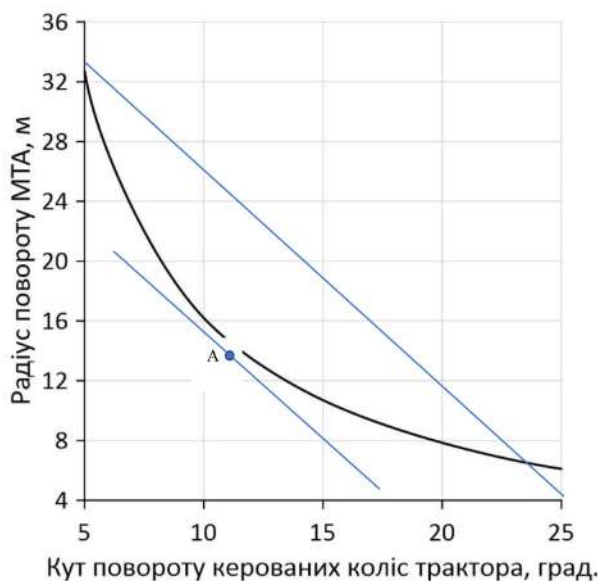


Рис. 6. Залежність радіуса повороту МТА від кута повороту керованих коліс трактора

Доведено, що для зменшення кута уводу шин керованих коліс трактора тиск повітря в них ($\rho_{ш}$) має бути якомога меншим. При цьому слід мати на увазі, що за більших значень параметра $\rho_{ш}$ інтенсивність його впливу на величину кута уводу шин керованих коліс енергетичного засобу є меншою.

Центральна сівалка приєднується до мосту керованих коліс трактора на відстані b від нього. Розрахунки показують, що чим більша значина цього параметра, тим меншим є кут уводу шин керованих коліс трактора.

За збільшення кута повороту від 5 до 11° зменшення значення радіуса повороту МТА здійснюється більш інтенсивно, ніж за збільшення параметра α від 11 до 25°. З огляду на це можна дійти до висновку, що під час руху агрегату на поворотній смузі кут повороту керованих коліс має бути більшим за 11°. Такий режим повороту буде здійснюватися з меншим радіусом.

Список використаних джерел

1. Yatskul A., Lemiére J.-P., Delion C. On an automated headland turn of wide width air seeders. *RHEA-2014 (Robotics and associated High-technologies and Equipment for Agriculture and forestry)*. Madrid, 2014. № 1. P. 2–9.
2. Надикто В., Кюрчев В. Перспективи зростання продуктивності роботи машинно-тракторного агрегата. *Техніка і технології АПК*, 2018. № 7. С. 26–31.
3. Findura P., Kolarova K., Nadykto V. et al. Turning research of a sowing unit based on reversible tractor. *Acta Technologica Agriculturae*, 2024. V. 4. P. 194–202.
4. Oksanen T., Visala A. Optimal Control of Tractor-Trailer System in Headlands. *ASAE International Conference of Automation Technology for Off-road Equipment*. Kyoto, Japan, 2004. P. 255–263.
5. Oksanen T. Path Planning Algorithms for Agricultural Field Machines. *Helsinki University of Technology*, 2007. P. 1–112.
6. Bochtis D. D., Vougioukas S. G. Minimising the non-working distance travelled by machines operating in a headland field pattern. *Biosystem Engineering*, 2008. Vol. 101, № 1. P. 1–12.
7. Boryga M. Trajectory Planning for Tractor Turning Using the Trigonometric Transition Curve. *Agric. Eng.* 2023. Vol. 27, № 1. P. 203–212.
8. Trendafilov K. Theoretical determination and analysis of the length of the non-working move and of the width of the headland when performing a fishtail turn with a curvilinear reverse move by a machine-tractor unit with a mounted machine in an irregularly shaped field. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2021. Vol. 1031, 1.
9. Krasovskikh B. C. et al. Seeding combine as a means of increasing the efficiency of sowing grain crops. *Bull. Altai State Agrarian University*, 2012. Vol. 7, № 93. P. 74–79.



10. Надикто В. Т., Величко О. В. Означення точки оптимуму кривої та спосіб її визначення. *Техніка і технології АПК*, 2014, № 2. С. 16–18.

Дата першого надходження статті до видання: 09.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 29.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



V. Nadykto, I. Zhokin

Dmytro Motornyi Tavria State Agrrotechnological University

STUDY OF TRACTOR TURNABILITY IN A THREE-MACHINE SEEDING UNIT

Summary

This article examines the maneuverability of a reversible tractor in a unit with a semi-mounted hitch and three trailed grain seeders, two of which are side-mounted and one is central-mounted. The problem of such a machine-tractor unit (MTU) is the possibility of physical collision of the inner wheels of the side seeders with the engines of the power tool. To prevent such a course, the following should be kept in mind. With an increase in the angle of rotation of the steered wheels of the tractor by 5 times (from 5 to 25°), the value of the angle of entry of their tires increases by 6 times. With the rolling resistance coefficient increasing from 0.12 to 0.20 (by 1.67 times), the tire entry angle increases from 0.26 to 0.44 grad (by 1.69 times). To reduce the angle of entry of the tires of the steered wheels of the tractor, the air pressure in them (p_w) should be as small as possible. Moreover, with larger values of the parameter p_w , the intensity of its influence on the angle of entry of the tires of the steered wheels of the power tool is smaller. The central trailed seeder is connected to the tractor's steered wheels at a distance b from the axle. The greater the value of this parameter, the smaller the angle of entry of the tires of the steered wheels of the tractor. With an increase in the angle of rotation from 5 to 11°, the decrease in the value of the turning radius of the MTA is carried out more intensively than with an increase in the parameter α from 11 to 25°. Given this decrease in the turning radius of the MTA, the angle of rotation of the steered wheels should be greater than 11°.

Keywords: seeder, hitch, angle of rotation of the steered wheels, angle of entry of tires, air pressure in tires.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-12>

УДК 66.047.3.085.1; 66.047-912

О. А. Новохат, канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0002-1198-6675

Ю. А. Злоба, аспірантка

ORCID: 0009-0002-6391-2712

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

e-mail: tyshkojulia287@gmail.com

УЛЬТРАЗВУКОВА ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ КАРОТИНОВМІСНОЇ СИРОВИНИ: АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

Анотація. У статті узагальнено літературні дані щодо інтенсифікації сушіння каротиновмісної рослинної сировини з урахуванням термолабільності β -каротину. Показано, що традиційні високотемпературні способи сушіння можуть знижувати вміст каротиноїдів і погіршувати якість продукту. Обґрунтовано доцільність застосування комбінованих технологій з ультразвуковою інтенсифікацією, які можуть підвищувати інтенсивність масопереносу без істотного зростання температури процесу. Запропоновано фізичну модель, що враховує взаємопов'язані теплові й масообмінні явища та вплив ультразвуку на структуру матеріалу. Показано перспективність використання ультразвуку для скорочення тривалості сушіння, зниження енерговитрат і збереження біологічної цінності каротиновмісної сировини.

Ключові слова: сушіння, конвективне сушіння, каротиновмісна сировина, β -каротин, ультразвук, масоперенос, ефективний коефіцієнт дифузії, енергоефективність, кінетика сушіння.

Постановка проблеми. Каротиновмісна рослинна сировина, до якої належать морква, гарбуз, батат, абрикос, обліпіха, томати та інші плоди й овочі з жовто-оранжевим або червоним забарвленням, є важливим джерелом каротиноїдів, передусім β -каротину. Останній належить до провітамінів А і в організмі людини перетворюється на активний вітамін А; крім того, каротиноїди виконують антиоксидантні функції та беруть участь у формуванні функціональної цінності харчових продуктів [1; 2]. Саме тому каротиновмісна сировина розглядається не лише як традиційний компонент харчування, а і як перспективна база для виробництва функціональних продуктів, натуральних барвників, порошків, концентратів та добавок оздоровчого призначення [2; 5].

Водночас така сировина характеризується високою вологістю, сезонністю надходження, значною чутливістю до мікробіологічного псування та обмеженим строком зберігання у свіжому вигляді. Тому одним із ключових технологічних способів її консервування є сушіння, яке дає змогу зменшити вміст води, масу й об'єм продукту, спростити логістику, знизити витрати на зберігання та створити стабільну за якістю сировинну основу для подальшого використання в харчових технологіях [3–5]. Українські дослідники також відзначають доцільність переробки каротиновмісної сировини у сухі порошки та добавки саме через труднощі тривалого зберігання свіжих овочів і плодів та потребу збереження β -каротину в перероблених продуктах [3–5].

Однак сушіння каротиновмісної сировини пов'язане з низкою технологічних проблем. Каротиноїди належать до термолабільних і окиснюваних сполук; вони чутливі до підвищеної температури, кисню у повітрі, тривалого теплового впливу та світла. Під час зневоднення можливі ізомеризація, термоокиснювальна деструкція та зміна кольорових характеристик матеріалу, що призводить до зниження біологічної цінності, погіршення споживчих властивостей і втрати



технологічної привабливості готового продукту [1; 9; 10]. Для моркви та спорідненої сировини показано, що навіть за використання сучасних способів сушіння вміст каротиноїдів істотно залежить від режиму обробки, а надмірний термічний вплив знижує їх збереженість [9; 10].

На практиці найпоширенішим способом сушіння є конвективний. Його перевагами є конструктивна простота та відносна доступність обладнання. При цьому як теплоносії зазвичай використовується повітря. Однак для конвективного способу характерні значна тривалість процесу, високі питомі енерговитрати, тривалий контакт продукту з нагрітим повітрям і киснем, а відтак і підвищений ризик руйнування каротиноїдів, потемніння та небажані структурні зміни [3; 4; 6; 12]. Наукові праці в українських виданнях із сушіння морквяних вичавок і каротиновмісної сировини також підкреслюють, що вибір режиму повинен узгоджуватися не лише з продуктивністю процесу, а і зі збереженням β -каротину як цільового показника якості [3–6].

Сучасний розвиток сушильних технологій спрямований на розв'язання суперечності між двома вимогами: з одного боку, необхідно інтенсифікувати масообмін, скоротити тривалість сушіння і зменшити енергоспоживання; з іншого – забезпечити максимальне збереження термолабільних біологічно активних речовин, насамперед каротиноїдів. Саме тому актуальним напрямом є застосування комбінованих та енергетично керованих способів сушіння – вакуумного, мікрохвильового, інфрачервоного, сублімаційного та ультразвукового [9; 14–16].

За сучасними даними, перспективним засобом інтенсифікації зневоднення є ультразвук, який може прискорювати перенесення вологи, знижувати внутрішній дифузійний опір і, в окремих випадках, сприяти кращому збереженню кольору, текстури та каротиноїдів у висушеній сировині [11–15].

Отже, наукова проблема полягає в обґрунтованому виборі таких режимів і способів сушіння каротиновмісної сировини, які забезпечували б одночасно високу інтенсивність вологовидалення, енергоощадність процесу та максимальне збереження β -каротину й інших цінних компонентів. Практичне значення цієї проблеми пов'язане з необхідністю створення стабільної високоякісної сушеної сировини для харчової, дієтичної та переробної промисловості [3; 5; 10–15].

Аналіз досліджень. У сучасних дослідженнях сушіння рослинної сировини простежуються дві головні тенденції: по-перше, пошук способів скорочення тривалості процесу та зниження енерговитрат; по-друге, забезпечення вищої збереженості біологічно активних речовин і природного кольору продукту.

Для каротиновмісної сировини ця проблема є особливо важливою, оскільки саме каротиноїди визначають не лише харчову, а й функціонально-технологічну цінність готового продукту [1; 9; 10]. Огляди літературних джерел показують, що вплив способу сушіння на якість моркви та інших каротиновмісних об'єктів є дуже суттєвим: різні технології по-різному змінюють вміст каротиноїдів, активність антиоксидантів, колір, текстуру та здатність до регідrataції [9; 10].

У традиційному конвективному сушінні переважає теплопередача від нагрітого повітря до поверхні матеріалу з подальшим внутрішнім перенесенням вологи. Незважаючи на технологічну простоту, цей спосіб характеризується тривалим перебуванням сировини в зоні підвищених температур і контактом з киснем, що посилює деградацію пігментів [3; 4; 9; 15]. Вітчизняні дослідження морквяних вичавок показали, що при виборі режимів сушіння одним із визначальних показників якості виступає саме вміст β -каротину в кінцевому продукті [3; 4]. У працях українських науковців також наголошено, що для каротиновмісної сировини важливо уникати надмірного теплового навантаження та карамелізації цукрів, а температурний режим повинен бути компромісом між швидкістю процесу та стабільністю пігментів [4; 5; 15].

Порівняльні дослідження сучасних способів сушіння свідчать, що вакуумні, мікрохвильові, мікрохвильово-вакуумні та сублімаційні методи часто дають кращі результати щодо якості, ніж звичайне конвективне сушіння. Зокрема, для сушеної моркви було показано, що ліофілі-



зація забезпечує дуже низьку активність води та високу суху речовину, а мікрохвильово-вакуумне сушіння може забезпечувати підвищений вміст каротиноїдів і високу антиоксидантну активність порівняно з іншими режимами [9; 10; 16]. Разом із тим ліофілізація залишається дорогою та тривалою, а мікрохвильові методи потребують ретельного керування режимами через ризик локального перегріву та нерівномірного висушування [9; 10].

Зважаючи на це дедалі більшу увагу привертає застосування ультразвукового впливу під час сушіння або ультразвукова попередня обробка сировини перед сушінням. Механізм дії ультразвуку пов'язують з кавітаційними явищами, мікроструменями, періодичним стисканням і розрідженням середовища, а також із так званим «губчастим ефектом», завдяки якому структура рослинної тканини частково розкривається, а всередині матеріалу формуються додаткові шляхи для переносу вологи. Наслідком цього є зменшення внутрішнього дифузійного опору, прискорення масопереносу та скорочення тривалості сушіння [11–14]. Саме така фізична природа процесу пояснює, чому ультразвук здебільшого розглядають не як самостійний спосіб зневоднення, а як інструмент інтенсифікації вже наявних сушильних технологій [11; 14].

Позитивні результати застосування ультразвуку для каротиновмісної сировини нині підтверджені низкою робіт. У дослідженні гібридного ротаційного сушіння моркви показано, що додавання ультразвуку підвищувало швидкість сушіння приблизно на 13 %, а комбінація мікрохвиль та ультразвуку – до 140 % порівняно з базовим конвективним режимом. Крім того, ультразвук зменшував різницю кольору висушеного продукту, тобто сприяв кращому збереженню зовнішнього вигляду [11].

У роботі щодо поєднання ультразвукової попередньої обробки з електрогідродинамічним сушінням моркви встановлено істотне прискорення сушіння, покращення регідраційної здатності та найкраще збереження кольору за оптимального рівня ультразвукової потужності. Важливо, що за цих умов фіксували менше 6-метил-5-гептен-2-ону – продукту деградації каротиноїдів, що опосередковано свідчить про кращу їх збереженість. [12].

Отримано результати і в більш ранніх фундаментальних роботах. Для моркви показано, що сушіння з використанням потужного ультразвуку забезпечувало вищу збереженість вітаміну С та β -каротину, ніж звичайне конвективне сушіння. Для окремих режимів збереженість β -каротину сягала 96–98 %, що є одним із найвагоміших аргументів на користь цієї технології [13]. Новіші дослідження також демонструють, що оптимізація частоти, потужності й тривалості ультразвукової обробки може підвищувати утримання β -каротину, фенольних речовин і флавоноїдів на 10–50 % залежно від виду сировини та умов сушіння [14]. У науковій публікації 2025 року, присвяченій сушінню моркви після ультразвукової попередньої обробки, зафіксовано підвищений вміст β -каротину в порівнянні із сушінням гарячим повітрям і сонячним сушінням, а також поліпшення фізичних властивостей продукту [16].

Окрему цінність ультразвуку становить те, що він дає змогу інтенсифікувати сушіння без пропорційного підвищення температури процесу. Саме це є критично важливим для каротиновмісної сировини, де підвищення температури хоч і пришвидшує видалення вологи, але одночасно активізує руйнування пігментів. Тому ультразвук може виконувати роль «м'якого» інтенсифікатора масопереносу: прискорення сушіння досягається не стільки за рахунок сильнішого термічного впливу, скільки через структурні зміни тканини та посилення внутрішньої дифузії [11–14]. Це робить технологію особливо перспективною для моркви, гарбуза, абрикоса, томатів та іншої сировини, де збереження природного забарвлення прямо пов'язане зі збереженням каротиноїдного комплексу [6–9; 14].

Водночас результати літературного аналізу показують, що універсального режиму ультразвукового сушіння не існує. Ефект залежить від виду сировини, геометрії частинок, початкової вологості, наявності попередньої обробки, потужності та частоти ультразвуку, а також від

поєднання з іншими способами підведення енергії. Для частини систем ультразвук дає помірне прискорення процесу, а найбільший ефект спостерігається в комбінованих схемах: поєднання впливу ультразвуку та мікрохвиль, ультразвуку та вакууму, ультразвуку та електрогідродинамічного сушіння [11; 12; 16]. Тому необхідні подальші дослідження для вибору оптимальних комбінованих режимів для конкретних видів каротиновмісної сировини з урахуванням критеріїв тривалості, енергоємності, кольору та вмісту β -каротину [13–16].

Отже, аналіз сучасних міжнародних та українських досліджень дає підстави стверджувати, що найперспективнішим напрямом удосконалення технології сушіння каротиновмісної сировини є використання комбінованих енергоощадних методів з ультразвуковою інтенсифікацією. Такий підхід дозволяє скоротити тривалість зневоднення, поліпшити масоперенос, знизити ризик перегріву продукту, краще зберегти колір, регідратаційні властивості та β -каротин. Саме тому розроблення та наукове обґрунтування режимів ультразвукового сушіння каротиновмісної сировини є актуальним завданням сучасної харчової технології [3; 4; 14–16].

Формулювання мети статті. Метою статті є узагальнення літературних даних щодо застосування ультразвуку для інтенсифікації сушіння каротиновмісної сировини та формування фізичної моделі процесу, що враховує взаємопов'язані теплові й масообмінні явища.

Для досягнення поставленої мети проаналізовано літературні дані щодо впливу ультразвуку на кінетику сушіння, інтенсивність масопереносу, питомі енерговитрати та збереження каротиноїдів у готовому продукті.

Основна частина.

1. Теоретичні основи тепломасопереносу з урахуванням ультразвукового впливу:

Процес сушіння описується як взаємодія теплопереносу та масопереносу. Теоретичною базою є рівняння теплопровідності та другий закон Фіка [2; 10].

Рівняння теплового балансу матеріалу має вигляд:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \nabla^2 T - \rho r_v \left| \frac{\partial W}{\partial \tau} \right| + q_{us}, \quad (1)$$

де ρ – густина матеріалу, кг/м^3 ; c – теплоємність, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; T – температура, К ; τ – час, с ; λ – теплопровідність, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; r_v – теплота випаровування, Дж/кг ; W – вологовміст, кг/кг ; q_{us} – додаткове джерело тепла від ультразвуку, Вт .

У рівнянні (1) член q_{us} враховує тепловий ефект від впливу ультразвуку, пов'язаний із кавітаційними процесами [11; 14].

Гранична умова теплообміну:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_{eff} (T_s - T_{\infty}), \quad (2)$$

де α_{eff} – ефективний коефіцієнт тепловіддачі, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; T_s – температура поверхні, К ; T_{∞} – температура середовища, К .

Ефективний коефіцієнт тепловіддачі визначається залежністю:

$$\alpha_{eff} = \alpha (1 + k_{\alpha} I_{us}), \quad (3)$$

де α – базовий коефіцієнт тепловіддачі, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; k_{α} – емпіричний коефіцієнт впливу ультразвуку, $\text{м}^2/\text{Вт}$; I_{us} – інтенсивність ультразвуку, Вт/м^2 .

Згідно з формулою (3) ультразвуковий вплив сприяє зменшенню опору пограничного шару та підвищенню інтенсивності теплообміну [11; 13; 14].

Рівняння дифузії:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \nabla \cdot (D_{eff} \nabla W), \quad (4)$$



де W – вологовміст матеріалу, кг/кг; τ – час, с; ∇ – диференціальний оператор просторової зміни величини, 1/м; D_{eff} – ефективний коефіцієнт дифузії, м²/с.

Ефективний коефіцієнт дифузії визначається залежністю (5):

$$D_{eff} = D_0(1 + k_D I_{us}), \quad (5)$$

де D_0 – базовий коефіцієнт дифузії без ультразвукового впливу, м²/с; k_D – коефіцієнт впливу ультразвуку, м²/Вт; I_{us} – інтенсивність ультразвуку, Вт/м².

Згідно з формулою (5) ультразвуковий вплив може сприяти збільшенню ефективного коефіцієнта дифузії D_{eff} , що спричинене зменшенням внутрішнього дифузійного опору [11; 13; 14; 17]. Тоді для тонкого шару:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} \tau}{4L^2}\right), \quad (6)$$

де D_{eff} – ефективний коефіцієнт дифузії, м²/с; τ – час, с; L – характерний розмір матеріалу, який для плоского шару дорівнює половині товщини зразка, м;

Безрозмірний вологовміст визначається як:

$$MR = \frac{W - W_{eq}}{W_0 - W_{eq}}, \quad (7)$$

де W – поточний вологовміст, кг/кг; W_0 – початковий вологовміст, кг/кг; W_{eq} – рівноважний вологовміст, кг/кг.

Інтенсивність процесу характеризується числом Фур'є:

$$Fo = \frac{D_{eff} \tau}{L^2}, \quad (8)$$

де D_{eff} – ефективний коефіцієнт дифузії, м²/с; τ – час, с; L – характерний розмір матеріалу, який для плоского шару дорівнює половині товщини зразка, м.

Зростання числа Фур'є Fo свідчить про інтенсифікацію внутрішнього масопереносу [2; 10; 11].

2. Кінетика сушіння та збереження каротиноїдів

Для опису кінетики використовується модель Пейджа:

$$MR = \exp(-k\tau^n), \quad (9)$$

де MR – безрозмірний вологовміст; k – емпіричний коефіцієнт швидкості сушіння, с⁻¹; τ – час, с; n – безрозмірний емпіричний показник.

Коефіцієнт швидкості сушіння k у формулі (9) на практиці зростає при використанні ультразвуку, що свідчить про інтенсифікацію процесу [11; 14; 16; 17].

Швидкість сушіння визначається рівнянням:

$$v_d = -\frac{dW}{d\tau}, \quad (10)$$

де W – поточний вологовміст, кг/кг; τ – час, с.

Зменшення тривалості процесу знижує сумарне теплове навантаження на матеріал, що може сприяти кращому збереженню β -каротину. Це узгоджується з даними експериментальних досліджень [13; 14; 16].

3. Аналіз енергоефективності процесу

Енергоефективність процесу сушіння є одним із визначальних критеріїв вибору технології переробки каротиномісної сировини. Аналіз сучасних досліджень показує, що різні способи сушіння суттєво відрізняються за питомими витратами енергії на видалення 1 кг вологи [9; 12; 16].

Найбільш енергоємним є сублімаційне сушіння, питомі витрати якого досягають 7–10 кВт · год/кг через необхідність підтримання глибокого вакууму та реалізації процесу сублімації [9; 16].

Вакуумне та мікрохвильово-вакуумне сушіння характеризуються витратами на рівні 3–5 кВт · год/кг, що пояснюється зниженням температури кипіння води, але супроводжується додатковими витратами на створення вакууму [9; 11; 16].

Конвективне сушіння є найбільш поширеним і характеризується питомими витратами 2–3 кВт · год/кг, однак тривалий тепловий вплив призводить до деградації каротиноїдів і погіршення якості продукту [3; 4; 9; 15].

Застосування ультразвуку дозволяє знизити енерговитрати до 1,8–2,5 кВт·год/кг завдяки інтенсифікації внутрішнього масопереносу та скороченню тривалості процесу [11; 13; 16]. Таким чином, ультразвукове сушіння поєднує енергоефективність і високу інтенсивність процесу.

Загальні витрати енергії конвективного способу сушіння із застосуванням впливу ультразвуку визначаються:

$$Q_{tot} = Q_{conv} + Q_{us}, \quad (11)$$

де Q_{tot} – загальні витрати енергії, Дж; Q_{conv} – енергія, підведена газоподібним теплоносієм, Дж; Q_{us} – енергія, підведена ультразвуком, Дж;

Енергія ультразвуку:

$$Q_{us} = P_{us} \tau, \quad (12)$$

де P_{us} – потужність ультразвукового впливу, Вт; τ – час, с.

Питомі енерговитрати:

$$q = \frac{Q_{tot}}{m_w}, \quad (13)$$

де q – питомі енерговитрати, Дж/кг; Q_{tot} – загальні витрати енергії, Дж; m_w – маса видаленої вологи, кг.

Як випливає з рівнянь (11)–(13), скорочення часу сушіння τ внаслідок збільшення ефективного коефіцієнту дифузії D_{eff} (5) призводить до зменшення енерговитрат на конвективну складову та підвищення загальної енергоефективності процесу сушіння [11; 14; 16], зокрема каротиновмісної сировини.

4. Вплив ультразвуку на клітинну структуру каротиновмісної сировини

Ефективність ультразвукового сушіння значною мірою визначається його впливом на мікроструктуру рослинної тканини. Каротиновмісна сировина (морква, гарбуз, томати) (рисунк 1) характеризується клітинною будовою, в якій β -каротин локалізується переважно у хромопластах та клітинних мембранах. Цілісність клітинних структур істотно впливає на швидкість масопереносу та стабільність біологічно активних речовин [2; 9; 10; 14].

Під дією ультразвукових хвиль у рідкому середовищі виникають кавітаційні явища – утворення, ріст і колапс мікробульбашок. Це супроводжується локальними мікроударами, утворенням мікроструменів і періодичними механічними напруженнями, які впливають на клітинні стінки [11; 14].

На рис. 1 наведено узагальнену схему впливу ультразвуку на мікроструктуру каротиновмісної сировини.

У результаті цього відбуваються такі структурні зміни як часткове руйнування клітинних оболонок, утворення мікроканалів та пор у тканині, підвищення проникності мембран, зменшення капілярного опору руху вологи [11; 14].

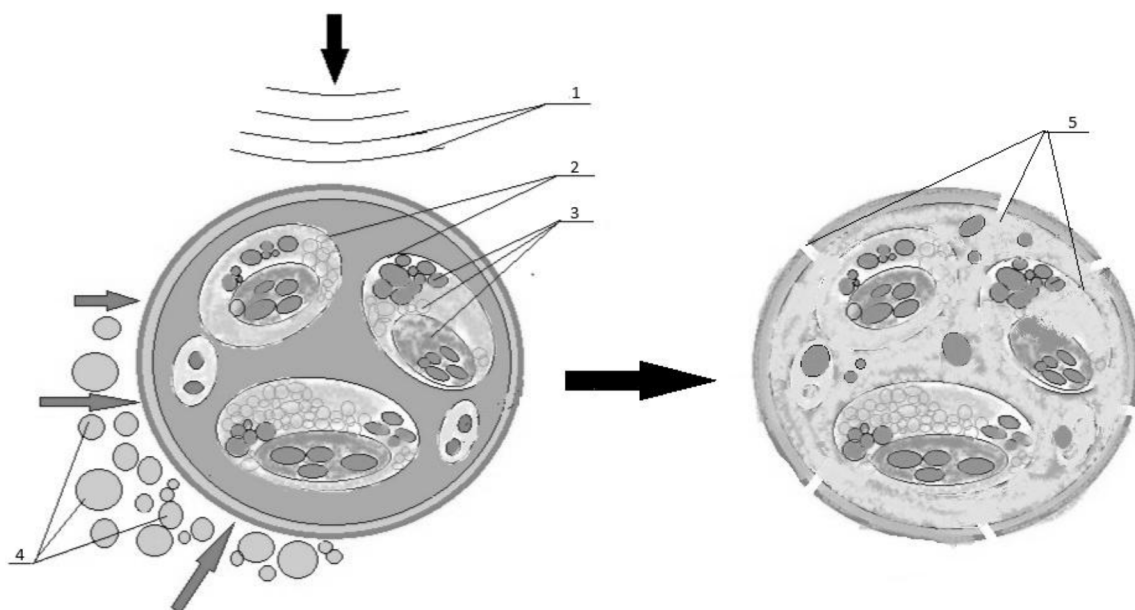


Рис. 1. Схема впливу ультразвукового сушіння на каротиновмісну сировину:

1 – ультразвукові хвилі; 2 – клітинні мембрани; 3 – хлоропласти та β -каротин; 4 – кавітаційні бульбашки; 5 – руйнування клітинних стінок, утворення мікроканалів та пор

Зазначені явища формують так званий «губчастий ефект», який сприяє інтенсифікації внутрішнього масопереносу. Саме цим пояснюється зростання ефективного коефіцієнта дифузії D_{eff} у рівнянні (5) та прискорення сушіння, що узгоджується з рівняннями (6)–(8).

Водночас важливо, що ультразвук забезпечує інтенсифікацію процесу без істотного підвищення температури, що має принципове значення для збереження каротиноїдів. Скорочення тривалості і величини теплового впливу зменшує термоокиснювальну деградацію β -каротину, що підтверджено експериментально [11; 13; 14].

Разом із тим надмірна інтенсивність ультразвуку може призводити до руйнування клітинної структури та окиснення каротиноїдів. Тому важливим є оптимальний вибір параметрів ультразвукових коливань (частоти, потужності, тривалості впливу) [11; 14; 16].

Висновки

У результаті узагальнення теоретичних положень і сучасних літературних даних щодо сушіння каротиновмісної сировини можна сформулювати такі висновки.

Традиційні способи сушіння характеризуються або високою енергоємністю, або значними втратами термолабільних компонентів, що обмежує їх ефективність для каротиновмісної сировини.

Запропонована фізична модель дає змогу, за прийнятих припущень, описати взаємозв'язок теплових і масообмінних процесів та врахувати вплив ультразвуку через зміну коефіцієнтів тепло- і масопереносу.

Узагальнення літературних даних дає підстави вважати, що одним із ключових чинників інтенсифікації конвективного сушіння за ультразвукового впливу є підвищення ефективного коефіцієнта дифузії D_{eff} , що супроводжується зростанням числа Фур'є та прискоренням видалення вологи.

Скорочення тривалості сушіння внаслідок інтенсифікації масопереносу може сприяти зменшенню теплового навантаження на термолабільну каротиновмісну сировину, що є важливою передумовою збереження β -каротину та інших біологічно активних речовин.

Узагальнення літературних джерел і запропонована схема енергетичного опису процесу свідчать, що за раціонального вибору режимів ультразвуковий вплив може забезпечувати

зниження питомих енерговитрат завдяки скороченню часу сушіння при помірних додаткових витратах енергії на генерацію ультразвуку.

Отже, комбіноване сушіння з ультразвуковою інтенсифікацією слід розглядати як перспективний напрям удосконалення процесу зневоднення каротиновмісної сировини, який потенційно поєднує підвищення енергоефективності, скорочення тривалості сушіння та поліпшення якості готового продукту.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на експериментальне встановлення кінетичних закономірностей сушіння за різних режимів ультразвукового впливу, уточнення коефіцієнтів математичної моделі та розроблення конструкцій сушарок для реалізації таких режимів.

Список використаних джерел

1. Vitamin A and Carotenoids – Health Professional Fact Sheet / National Institutes of Health, Office of Dietary Supplements. URL: <https://ods.od.nih.gov/factsheets/VitaminA-HealthProfessional/>
2. Біохімія плодів та овочів : навч. посіб. / В. В. Євлаш, О. П. Прісс, М. Є. Сердюк [та ін.]. Мелітополь : Люкс, 2019. 206 с.
3. Малежик І. Ф., Бессараб О. С., Бандуренко Г. М., Левківська Т. М. Дослідження процесу сушіння морквяних вичавок при одержанні сухої каротиновмісної добавки. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2014. Вип. 152. С. 150–156. URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/items/ecb297e0-1286-4e5f-b4f2-8bc509636e7f>
4. Косоголова Л. О., Левківська Т. М. Стабільність β -каротину при одержанні порошку з морквяних вичавок. *Збірник наукових праць Вінницького державного аграрного університету*. Серія: Технічні науки. 2006. Вип. 1. С. 54. URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/items/168177b1-7b20-40d3-863a-d5c43b0267ad>.
5. Снежкін Ю. Ф., Петрова Ж. О. Харчові порошки з рослинної сировини. Класифікація, методи отримання, аналіз ринку. *Біотехнологія*. 2010. Т. 3, № 5. С. 31–42. URL: <https://biotechnology.kiev.ua/index.php/uk/arkhiv-zhurnaliv/2010-ua/2010-no-5-ua/harcovi-poroski-z-roslinnoi-sirovini-klasifikacia-metodi-otrimanna-analiz-rinku-u-f-snezkin-z-o-petrova>
6. Марчевський В. М., Новохат О. А., Воронін Л. Г., Татарчук О. О. Сушіння санітарно-гігієнічного паперу з використанням інфрачервоного випромінювання. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». 2015. № 1 (14). С. 29–31. DOI: <https://doi.org/10.20535/2306-1626.1.2015.52235>
7. Karvatskii A., Marchevsky V., Novokhat O. Numerical modelling of physical fields in the process of drying of paper for corrugating by the infrared radiation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. № 2/5 (86). P. 14–22. URL: <https://media.neliti.com/media/publications/307084-numerical-modeling-of-physical-fields-in-256dc303.pdf>
8. Kushniruk V., Novokhat O. Analysis of intensification of zeolite drying on a vibrating conveyor dryer with infrared emitters. *Technology Audit and Production Reserves*. 2023. Vol. 2, No. 1 (70). P. 6–9. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.279032>
9. Ignaczak A., Mierzwa D., Sitkiewicz I. Influence of pre-treatment and drying methods on the quality of dried carrot properties as snacks. *Foods*. 2023. Vol. 12, no. 10. Art. 2045. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12102045>
10. Motegaonkar S., Shankar A., Tazeen H., Gunjal M., Payyanad S. A comprehensive review on carrot (*Daucus carota* L.): the effect of different drying methods on nutritional properties and its processing as value-added foods. *Sustainable Food Technology*. 2024. Vol. 2. P. 667–688. DOI: <https://doi.org/10.1039/D3FB00162H>
11. Mierzwa D., Musielak G. Microwave and ultrasound assisted rotary drying of carrot: analysis of process kinetics and energy intensity. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, no. 22. Art. 10676. DOI: <https://doi.org/10.3390/app142210676>
12. Duan S., Ding C., Lu J., Bai W., Guan P., Liu J., Song Z., Chen H., Jia Y. Study the effect of ultrasonic pretreatment combined with electrohydrodynamics on drying characteristics and volatile components of carrots. *Applied Food Research*. 2024. Vol. 4. Art. 100634. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.afres.2024.100634>
13. Frias J., Peñas E., Ullate M., Vidal-Valverde C. Influence of drying by convective air dryer or power ultrasound on the vitamin C and β -carotene content of carrots. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2010. Vol. 58, no. 19. P. 10539–10544. DOI: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jf102797y>



14. Zhou S., Chen W., Chitrakar B., Fan K. Ultrasound technology for enhancing drying efficiency and quality of fruits and vegetables: a review. *Food and Bioprocess Technology*. 2024. Vol. 17, no. 12. P. 4506–4536. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-024-03379-z>

15. Назаренко К. М., Снежкін Ю. Ф., Зубрій О. Г., Петрова Ж. О. Конвективне сушіння каротиновмісної сировини. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2009. № 659 : Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація. С. 172–175. URL: <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/7780>

16. Mondal M. H. T., Ahmmed R., Khan M. J. Ultrasound pretreated freeze-drying of carrot: effect on nutritional value, bioactive compounds and microstructure. *Applied Food Research*. 2025. Vol. 5, no. 1. Art. 100966. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.100966>

17. Galipothula R., Sharma P. D., Kotwaliwale N. Ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment enhances drying kinetics, quality attributes, bioactive compounds, microstructure, FTIR profiles, and sensory properties of Litchi. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Article number 45205. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-30051-z>

Дата першого надходження статті до видання: 15.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 08.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



O. Novokhat, Yu. Zloba

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

ULTRASOUND-ASSISTED INTENSIFICATION OF DRYING OF CAROTENE-CONTAINING RAW MATERIALS: AN ANALYTICAL REVIEW

Summary

The article summarizes current literature data on the use of ultrasound for intensifying the drying process of carotene-containing plant raw materials, including carrots, pumpkins, sweet potatoes, apricots, tomatoes, and other materials rich in β -carotene. The relevance of the topic is due to the need to combine two requirements: increasing dehydration intensity and reducing energy consumption, on the one hand, and ensuring maximum preservation of thermolabile carotenoids, color, and functional value of the product, on the other. It is shown that conventional convective drying, despite its simple implementation, is often accompanied by prolonged thermal exposure, contact with atmospheric oxygen, and an increased risk of pigment degradation. The advantages and limitations of modern drying methods are analyzed, and it is established that ultrasound should be considered not as an independent dehydration method, but as an effective tool for intensifying heat and mass transfer in combined technologies. The physical mechanisms of ultrasound action associated with cavitation phenomena, microstreaming, periodic compression and rarefaction of the medium, as well as the so-called “sponge effect”, which promotes the formation of additional pathways for moisture migration, reduces internal diffusion resistance, and accelerates drying, are considered. A physical model of the process is proposed, taking into account the interconnected heat and mass transfer phenomena, the influence of ultrasound on the heat transfer coefficient and effective diffusivity, as well as on the cellular structure of the material. The generalization of the results reported in the literature indicates that ultrasonic intensification can potentially reduce drying time, lower specific energy consumption, and improve β -carotene retention. It is concluded that combined ultrasound-assisted drying of carotene-containing raw materials is a promising direction and that further experimental studies are advisable to refine kinetic relationships, model parameters, and optimal process conditions.

Keywords: drying, convective drying, carotene-containing raw materials, β -carotene, ultrasound, mass transfer, effective diffusion coefficient, energy efficiency, drying kinetics.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-13>

УДК 664 (075.8)

І. Ю. Повар¹, аспірант

ORCID: 0009-0000-1984-8894

Б. В. Болтянський², канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0003-2072-4025

¹ Полтавський державний аграрний університет² Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: didur.vv@gmail.com

АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ЦЕНТРИФУГУВАННЯ РИЦИНОВОЇ ОЛІЇ В КОНІЧНІЙ ЦЕНТРИФУЗІ

Анотація. У роботі розглянуто особливості процесу центрифугування рицинової олії в конічній фільтрувальній центрифугі. Проаналізовано умови формування вільної поверхні рідини в обертовому конічному об'ємі та визначено параметри, за яких виникає критичний профіль поверхні. Встановлено, що за перевищення критичної кутової швидкості обертання відбувається переміщення частинок олії вздовж конічної поверхні, що впливає на характер розподілу механічних домішок і ефективність очищення продукту. Також досліджено рух твердих частинок у в'язкому середовищі з урахуванням сили тяжіння, нормальної реакції поверхні, сил тертя, в'язкого опору, а також інерційних сил у неінерціальній системі відліку. На підставі отриманих залежностей охарактеризовано зони можливого перебування та руху домішок на конічній поверхні центрифуги. Результати дослідження можуть бути використані для обґрунтування раціональних режимів роботи конічних центрифуг при очищенні рицинової олії від механічних включень.

Ключові слова: рицинова олія, конічна центрифуга, центрифугування, механічні домішки, фільтрування, вільна поверхня рідини, кутова швидкість, критичний режим, очищення олії, рух частинок.

Постановка проблеми. У процесі виробництва та первинного очищення рицинової олії важливим завданням є ефективне видалення механічних, колоїдних і завислих домішок, які погіршують якість готового продукту, ускладнюють подальші технологічні операції та знижують стабільність зберігання олії [1–3]. Одним із перспективних способів інтенсифікації очищення є застосування конічних фільтрувальних центрифуг, у яких розподіл фаз відбувається під дією відцентрових сил [4–10].

Разом із тим ефективність роботи таких апаратів суттєво залежить від геометрії робочого органу, фізико-механічних властивостей рідини та домішок, а також від режимних параметрів, насамперед кутової швидкості обертання [11–13]. За певних умов у конічній центрифугі змінюється форма вільної поверхні олії, що впливає на траєкторію руху частинок, їх осадження або переміщення вздовж стінок. У зв'язку з цим виникає необхідність дослідження закономірностей формування критичного профілю вільної поверхні та аналізу руху частинок у полі відцентрових сил. Розв'язання цієї задачі є важливим для підвищення якості очищення рицинової олії та оптимізації параметрів роботи конічної центрифуги.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання очищення рослинних олій за допомогою відцентрових апаратів привертає увагу багатьох дослідників, оскільки центрифугування належить до найбільш ефективних способів розділення неоднорідних рідких систем. У наукових працях, присвячених гідромеханічним процесам, розглянуто загальні закономірності руху в'язких рідин і дисперсних частинок у полі відцентрових сил, а також наведено підходи до опису рівноважних і нерівноважних режимів у ротаційних апаратах [14–19].

Окрему увагу в літературі приділено дослідженню профілю вільної поверхні рідини в обертових системах, оскільки саме форма цієї поверхні визначає характер розподілу тиску, умови стабільності потоку та межі переходу до критичних режимів роботи. У працях, присвячених центрифугуванню рослинних олій, розглядаються також процеси осадження та переміщення механічних домішок, вплив геометрії ротора, кутової швидкості, в'язкості середовища та розмірів частинок на ефективність очищення [20–22].

Проте, незважаючи на наявність значної кількості досліджень з теорії центрифугування, недостатньо висвітленими залишаються питання руху механічних домішок саме на конічній поверхні фільтрувальної центрифуги для рицинової олії. Потребують уточнення умови виникнення критичної кутової швидкості, межі зон утримання або ковзання частинок та вплив цих факторів на інтенсивність очищення. Це й зумовлює актуальність подальшого дослідження даного процесу.

Формулювання мети статті. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати геометричні та кінематичні особливості конічної центрифуги;
- визначити рівняння вільної поверхні рицинової олії в обертовому конічному об'ємі;
- встановити умови виникнення критичного профілю вільної поверхні;
- дослідити сили, що діють на механічні домішки в неінерціальній системі відліку;
- описати можливі режими руху частинок на конічній поверхні;
- визначити зони утримання, спокою та ковзання частинок у центрифугу.

Основна частина. Робочий елемент конічної центрифуги являє собою посудину у формі круглого конуса, повернутого вершиною донизу та такого, що обертається навколо власної осі симетрії. Через верхню частину фільтрувальна конічна центрифуга заповнюється рициновою олією, у якій містяться механічні, колоїдні домішки, а також зважені залишки подрібненого рицинового зерна. Через перфоровані отвори, розташовані в нижній частині конуса, рицинова олія відводиться між двома обичайками. Далі під дією перепаду тиску та відцентрових сил інерції вона проходить крізь фільтрувальний матеріал – целюлозу – і через отвори перфорації верхньої частини другої обичайки виводиться у вигляді очищеного продукту.

Для рицинової олії, що заповнює внутрішній об'єм конуса з кутом 20° при вершині, можливий розрив вільної поверхні у верхній зоні, коли частинки олії під дією відцентрових сил інерції за достатньо великої кутової швидкості обертання починають відриватися від вільної поверхні та ковзати вгору по похилій конічній стінці. У зв'язку з цим потрібно визначити критичний профіль вільної поверхні та відповідну йому критичну кутову швидкість ω^* . Позначимо $l^2 = x^2 + y^2$ як квадрат відстані елементарного об'єму рідини до осі обертання Oz , а v – як об'єм рицинової олії, що заповнює конус, $\text{м}^3/\text{с}$; z_0 – координата вершини параболоїда. Тоді рівняння вільної поверхні рідини матиме вигляд:

$$z = z_0 + \frac{\omega^2}{2g} l^2, \quad (1)$$

а рівняння внутрішньої поверхні конуса:

$$z = l \operatorname{ctg} \theta_0. \quad (2)$$

Координати крайніх точок вільної поверхні знаходять із сумісного розв'язання двох останніх рівнянь і вони відповідають меншому з коренів квадратного рівняння:

$$\frac{\omega^2}{2g} l_k^2 - \operatorname{ctg} \theta_0 l_k + z_0 = 0. \quad (3)$$

Більший корінь визначає на поверхні конуса горизонтальну межу, нижче якої частинки рідини стягуються до краю вільної поверхні, а вище відкидаються догори відцентровими силами. Якщо дискримінант дорівнює нулю:

$$D = \operatorname{ctg}^2 \theta_0 - 2 \frac{\omega^2}{g} z_0 = 0, \quad (4)$$

то єдиний корінь рівняння:

$$l_k^* = \frac{g}{\omega^2} \operatorname{ctg} \theta_0, \quad (5)$$

визначає критичний профіль поверхні, за якого параболоїд дотикається до внутрішньої поверхні конуса (рис. 1).

Використовуючи властивість нестисливості всього об'єму ріцинової олії v м³/с), одержуємо при $l_k = l_k^*$

$$v = \frac{\pi (l_k^*)^3 \operatorname{ctg} \theta_0}{12}. \quad (6)$$

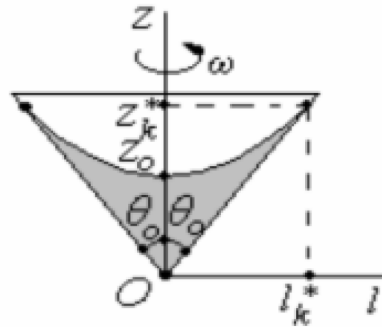


Рис. 1. Критичний профіль вільної поверхні ріцинової олії

Звідси для зазначеного об'єму ріцинової олії маємо:

$$v = \frac{\pi}{12} (l_k^*)^3 \operatorname{ctg} \theta_0; \quad l_k^* = \sqrt[3]{\frac{12v}{\pi \operatorname{ctg} \theta_0}}. \quad (7)$$

Якщо задана кутова швидкість ω перевищує критичне значення ω^* , то під дією відцентрового відкидання ріцинова олія починає переміщуватися вгору вздовж конічної поверхні, унаслідок чого початковий об'єм рідини зменшується, а відповідна кутова швидкість змінюється згідно з новим значенням об'єму.

Відомо, що інерційне фракціонування зважених твердих частинок у рідині, яка обертається, ґрунтується на тому, що частинки з більшою густиною, ніж у рідкого середовища, відтискаються до периферії, тоді як частинки з меншою густиною, навпаки, спливають і зміщуються до осі обертання. Коли вільний об'єм ріцинової олії змінюється, змінюється і характер центрифугування зважених частинок. Для побудови кількісного опису цього процесу доцільно скористатися диференціальними рівняннями руху частинки в обертovому середовищі. Відповідно до загальної теорії відносного руху до сил, що діють на частинку, необхідно додати переносну силу Френа і коріолісову силу інерції [4, 5].

Диференціальні рівняння відносного руху матеріальної частинки сформулюються на основі закону:

$$ma = \sum_{k=1}^n F_k + \Phi_{\text{пер}} + \Phi_{\text{кор}}, \quad (8)$$

де a відносно прискорення частинки;

$$F_{1r} = -fN \frac{\dot{r}}{\sqrt{\dot{r}^2 + r^2 \dot{\varphi}^2 \sin^2 \theta_0}}; \quad (9)$$

$$F_{2r} = -\mu \dot{r}, \quad (10)$$

$\sum_{k=1}^n F_k$ – сума всіх сил, що прикладені до частинки.

У цьому випадку: $\sum_{k=1}^n F_k = G + N + F$. На частинку діють: сила тяжіння G , нормальна реакція N а сила опору рухові F (рис. 2).

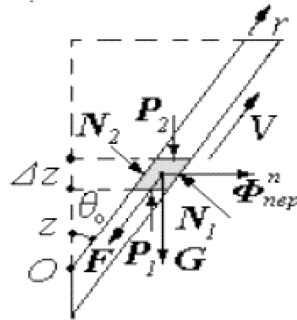


Рис. 2. Схема сил, що діють на частинку

Рух матеріальної частинки по конічній поверхні фільтрувальної центрифуги доцільно описувати в циліндричній системі координат, а самі рівняння руху записати у проекціях на осі цієї системи $M_r \theta_\varphi$ [6]:

$$m\ddot{r} = -mg \cos \theta_0 + mr(\dot{\varphi} + \omega)^2 \sin^2 \theta_0 + F_r; \quad (11)$$

$$mr \sin \theta_0 \ddot{\varphi} = -2m\dot{r}(\dot{\varphi} + \omega) \sin \theta_0 + F_\varphi; \quad (12)$$

$$N = mg \sin \theta_0 + mr(\dot{\varphi} + \omega)^2 \sin \theta_0 \cos \theta_0. \quad (13)$$

Сила опору визначається залежно від контакту частинки з поверхнею: якщо частинка переміщується по стінці, то сила тертя F при $\rho = \text{const}$ характеризується коефіцієнтом тертя, який залежить від форми частинки та умов її дотику до конічної поверхні, а також враховує вплив відносної швидкості, обертання, в'язкого опору середовища [7]. Крім того, можливе урахування сили лобового опору, пропорційної квадрату швидкості, а також сили в'язкого опору, пропорційної першому степеню швидкості [8, 9] (де μ – коефіцієнт, що визначається формою частинки та в'язкістю середовища).

Тоді:

$$F_{1\varphi} = -fN \frac{r\dot{\varphi} \sin \theta_0}{\sqrt{\dot{r}^2 + r^2 \dot{\varphi}^2 \sin^2 \theta_0}}. \quad (14)$$

Рівняння (11), (12) з урахуванням співвідношень (13), (14) задають диференціальні рівняння руху механічних домішок рицинової олії по конічній поверхні у фільтрувальній центрифугі. Це система двох диференціальних рівнянь другого порядку відносно невідомих функцій $r(t)$ та $\varphi(t)$, які визначають положення частинки на конічній поверхні в будь-який момент часу. Початкові умови вигляду $r(t_0) = r_0$, $\varphi(t_0) = \varphi_0$, $\dot{r}(t_0) = V_0$, $\dot{\varphi}(t_0) = 0$ задають єдиний розв'язок системи, якщо при цьому нормальна реакція залишається додатною, тобто $N > 0$, а початкова відносна швидкість V_0 не дорівнює нулю.

У механічній суміші рицинової олії можуть бути частинки, які певний час перебувають у стані відносного спокою відносно обертової конічної поверхні, тобто в момент t виконуються умови:

$$V = 0, \quad |F_1| < fN. \quad (15)$$

Остання нерівність з урахуванням співвідношення (11) дає:

$$-f(mg \sin \theta_0 + mr\omega^2 \sin \theta_0 \cos \theta_0) < -mg \cos \theta_0 + mr\omega^2 \sin^2 \theta_0 < f(mg \sin \theta_0 + mr\omega^2 \sin \theta_0 \cos \theta_0), \quad (16)$$

або систему двох нерівностей:

$$g(\cos \theta_0 - f \sin \theta_0) < r\omega^2 \sin \theta_0 (\sin \theta_0 + f \cos \theta_0), \quad (17)$$

$$r\omega^2 \sin \theta_0 (\sin \theta_0 - f \cos \theta_0) < g(\cos \theta_0 + f \sin \theta_0). \quad (18)$$

Аналіз нерівності (16) показує, що при $f \tan \theta_0 < 1$ ковзання частинок по конічній поверхні неможливе за жодних значень $r\omega$. Якщо ж $f \tan \theta_0 > 1$, то стан спокою на конусі можливий лише в деякому діапазоні радіусів та кутових швидкостей, а саме за умови:

$$r \sin \theta_0 > \frac{g}{\omega^2} \frac{\operatorname{ctg} \theta_0 - f}{1 + f \operatorname{ctg} \theta_0}. \quad (19)$$

Дослідження нерівності (17) свідчить, що при $f \tan \theta_0 > 1$ ковзання частинок угору з конічної поверхні неможливе ні за яких r та ω . Якщо ж $f \tan \theta_0 < 1$, стан спокою відносно конуса може спостерігатися лише поблизу осі обертання за умови :

$$r \sin \theta_0 < \frac{g}{\omega^2} \frac{\operatorname{ctg} \theta_0 + f}{1 - f \operatorname{ctg} \theta_0}. \quad (20)$$

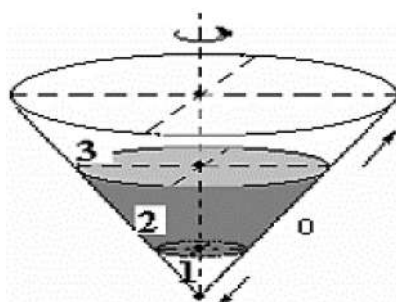


Рис. 3. Зони конічної поверхні рицинової олії у фільтрувальній центрифугі

Отже, у загальному випадку конічна поверхня може бути поділена на три характерні зони. У першій зоні механічна домішка, перебуваючи у відносному спокої щодо обертової конічної поверхні, не здатна рухатися в напрямку до вершини конуса. У другій зоні стан відносного спокою зберігається лише поблизу горизонтального дна. У третій зоні домішка може лише ковзати вгору по напрямку до вершини конуса. Наявність цих зон, а також їх розміри, визначаються нерівностями (7), (8) і залежать від механічних та динамічних характеристик частинок, параметрів конічної поверхні та властивостей в'язкого середовища.

Зокрема, вважаємо, що перша зона відповідає області, повністю заповненій соєвою олією та її механічними домішками. Друга зона утворюється як проміжний шар перед додатковим фільтрувальним матеріалом. Третя зона є областю, де механічні домішки інтенсивно прилипають до вільної поверхні рицинової олії. Аналіз руху частинок у конічній центрифугі та дослідження усталеного профілю вільної поверхні рідини дають змогу визначити критичну кутову швидкість обертання, за якої центрифуга починає очищати рицинову олію від механічних включень, що проникають у конічну частину апарата.



Висновки. У результаті проведеного аналізу встановлено, що процес центрифугування рицинової олії в конічній фільтрувальній центрифугі визначається взаємодією гідродинамічних, інерційних і контактних сил, які діють як на рідину, так і на механічні домішки.

Визначено, що форма вільної поверхні олії в умовах обертання описується параболоїдом, а її положення залежить від кутової швидкості обертання та геометричних параметрів конуса.

Показано, що існує критичне значення кутової швидкості, за якого параболоїд вільної поверхні дотикається до внутрішньої поверхні конуса. Перевищення цього значення призводить до зміни характеру руху рідини та частинок, зокрема до переміщення олії та домішок уздовж конічної поверхні у напрямку до верхньої частини апарата. Це суттєво впливає на умови очищення та розподіл механічних включень у робочому об'ємі центрифуги.

На підставі аналізу рівнянь руху частинок установлено, що на конічній поверхні можуть існувати різні зони їх поведінки: зона відносного спокою, проміжна зона та зона ковзання. Межі між цими зонами визначаються співвідношенням між відцентровими силами, силою тяжіння, силами тертя та в'язкого опору. Отже, ефективність очищення рицинової олії в конічній центрифугі безпосередньо залежить від правильного вибору конструктивних параметрів апарата та режиму його роботи.

Отримані результати мають практичне значення для вдосконалення процесів очищення рослинних олій і можуть бути використані при проектуванні та оптимізації конічних центрифуг з метою підвищення якості кінцевого продукту та зменшення вмісту механічних домішок.

Список використаних джерел

1. Smith J. Centrifugal separation technologies in vegetable oil refining. *Journal of Food Engineering*, 2020, 285, 110107.
2. Petrova N. Energy efficiency of centrifugal filtration systems. *Food Engineering Reviews*, 2021, 13(4), 456–469.
3. Yamamoto H. Mathematical modeling of centrifugal separation processes. *Chemical Engineering Science*, 2020, 227, 115–128.
4. Ivanov D. Optimization of filter layer porosity in conical centrifuges. *Journal of Industrial Technology*, 2023, 61(3), 78–91.
5. Janson H. *Castor oil production and processing*. New York: United Nations, 1974. 23 p.
6. Patel V. R., Dumancas G. G., Kasi Viswanath L. C., Maples R., Subong B. J. J. Castor Oil: Properties, Uses, and Optimization of Processing Parameters in Commercial Production. *Lipid Insights*. 2016. Vol. 9. P. 1–12. DOI: 10.4137/LPI.S40233
7. Yeboah A., Ying S., Lu J., Xie Y., Amoanimaa-Dede H., Boateng K. G. A., Chen M., Yin X. Castor oil (*Ricinus communis*): a review on the chemical composition and physicochemical properties. *Food Science and Technology*. 2021. Vol. 41, suppl. 2. P. 399–413. DOI: 10.1590/fst.19620
8. Ogunniyi D. S. Castor oil: a vital industrial raw material. *Bioresource Technology*. 2006. Vol. 97, issue 9. P. 1086–1091. DOI: 10.1016/j.biortech.2005.03.028
9. Gupta M. *Practical Guide to Vegetable Oil Processing*. 2nd ed. Urbana, IL : AOCS Press ; London : Academic Press, 2017. 508 p.
10. Журавель Д. П., Дідур В. В. Обґрунтування технологічної схеми детоксикації рицинової макухи для потреб кормовиробництва. Збірник тез доповідей XIII-ї Науково-технічної конференції «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві», смт. Глеваха Київської області. м. Київ, Україна, (01–17 жовтня 2025 року): матеріали конференції. Глеваха-Київ. 2025. С. 76–80.
11. Журавель Д. П., Дідур В. В. Обґрунтування технологічного процесу збирання рицини. Збірник тез доповідей XXVI Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (17–18 жовтня 2025 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2025. 717 с. С. 147–150.
12. Дідур В. В., Журавель Д. П., Повар І.Ю., Петриченко Є. А. Теоретичні основи розрахунку конструкційно-технологічних параметрів конічної центрифуги для очищення рослинних олій. *Праці Таврійського*



державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. Запоріжжя : ТДАТУ, 2025. Вип. 25, т. 3. С. 118–124. DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-3-16>.

13. Журавель Д. П. Технології переробки насіння ріпичи дворазовим пресуванням. Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі», Запоріжжя, 2022. С. 32–34.

14. Дідур В. В., Журавель Д. П., Повар І. Ю., Петриченко Є. А. Наукові основи очищення рослинних олій у конічних центрифугах. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання / ТДАТУ*; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. Запоріжжя : ТДАТУ, 2025. Вип. 25, т. 3. С. 125–130. DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-3-17>

15. Журавель Д. П., Дідур В. В., Шевчук М. В. Обґрунтування триботехнічних властивостей біологічних олив для гідросистем сільськогосподарської техніки. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання / ТДАТУ*; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. Запоріжжя : ТДАТУ, 2025. Вип. 15, т. 2. С. 45–53. DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-6>

16. Дідур В. В., Журавель Д. П., Колесніченко І. А., Петриченко Є. А. Моделювання теплової обробки насіння олійних культур високотемпературним теплоносієм. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання / ТДАТУ*; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. Запоріжжя: ТДАТУ, 2025. Вип. 15, т. 2. С. 37–44. DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-5>.

17. Дідур В. В., Журавель Д. П., Колесніченко І. А., Петриченко Є. А. Моделювання тепломасоперенесення в поверхневих капілярно-пористих середовищах. Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції. «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі» (01–25 листопада 2025 року). Запоріжжя, 2025. С. 46–49.

18. Дідур В. В., Журавель Д. П. Аналіз технологічного процесу механізованого збирання ріпичи в умовах Південного Лісостепу України. Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції. «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі» (01–25 листопада 2025 року). Запоріжжя, 2025. С. 56–61.

19. Журавель Д. П., Дідур В. В. Механіко-технологічні основи глибокої переробки насіння ріпичи на енергетичну біосировину: монографія. Запоріжжя : ТДАТУ, 2025. 275 с., іл.

20. Дідур В. В., Журавель Д. П. Аналіз технологій отримання олій з олійних культур. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання. Мелітополь: ТДАТУ, 2022. Вип. 12, том 3. 10 с. DOI: 10.31388/2220-8674-2022-3-18*

21. Журавель Д. П. Обґрунтування методу очищення біологічних олій в електричному полі. Збірник тез доповідей XIII-ї Науково-технічної конференції «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві», смт Глеваха Київської області – м. Київ, Україна, (01–18 жовтня 2024 року): матеріали конференції. Глеваха-Київ. 2024. С. 68–72.

22. Журавель Д. П., Дідур В. В. Моделювання процесу очищення ріпичової олії в електричному полі. Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі» (01–25 листопада 2024 року). Запоріжжя, 2024. С. 98–104.

Дата першого надходження статті до видання: 07.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 29.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



**I. Povar¹, B. Boltianskyi²****¹ Poltava State Agrarian University****² Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University****ANALYSIS OF THE CENTRIFUGATION PROCESS OF RETINO OIL
IN A CONICAL CENTRIFUGE*****Summary***

In the process of production and primary purification of castor oil, an important task is the effective removal of mechanical, colloidal and suspended impurities that deteriorate the quality of the finished product, complicate further technological operations and reduce the stability of oil storage. One of the promising methods of intensification of purification is the use of conical filtering centrifuges, in which phase separation occurs under the action of centrifugal forces.

The paper considers the features of the centrifugation process of castor oil in a conical filtering centrifuge. The conditions for the formation of the free surface of the liquid in a rotating conical volume are analyzed and the parameters under which a critical surface profile occurs are determined. It was established that when the critical angular velocity of rotation is exceeded, oil particles move along the conical surface, which affects the nature of the distribution of mechanical impurities and the efficiency of product purification. The motion of solid particles in a viscous medium was also investigated, taking into account the force of gravity, the normal reaction of the surface, friction forces, viscous drag, and inertial forces in a non-inertial reference frame. Based on the obtained dependencies, the zones of possible residence and movement of impurities on the conical surface of the centrifuge were characterized. The results of the study can be used to substantiate rational operating modes of conical centrifuges when purifying castor oil from mechanical inclusions.

Keywords: castor oil, conical centrifuge, centrifugation, mechanical impurities, filtration, free surface of the liquid, angular velocity, critical mode, oil purification, particle motion.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-14>

УДК 621.548:004.738.5:004.89

С. В. Сиротюк¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-9966-6299

О. Г. Скляр², канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-0456-2479

В. В. Пташник¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-1018-1138

В. В. Климчук¹, аспірант

ORCID: 0009-0000-6332-7869

Г. Валовські³, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-0866-4368

¹ Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С. Гжицького² Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного³ Інститут технологій і наук про життя – Національний науково-дослідний інститут

e-mail: ptashnykproject@gmail.com

ЧОТИРИРІВНЕВА АРХІТЕКТУРА ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ ДЛЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ: МОНІТОРИНГ, ОПТИМІЗАЦІЯ ТА ІНТЕГРАЦІЯ З МЕРЕЖЕЮ

Анотація. У статті розглянуто, що таке Інтернет речей, як функціонують вітрові електростанції та чому доцільно інтегрувати IoT із відновлюваною енергетикою. Висвітлено моніторинг робочих параметрів вітрових турбін, автоматизацію й оптимізацію процесів, а також прогнозування відмов і предиктивне технічне обслуговування. Наведено приклади систем вітрових електростанцій, у яких використовується Інтернет речей, а також технології та платформи, що застосовуються для моніторингу. На основі визначення викликів і обмежень, пов'язаних з управлінням даними, окреслено перспективи розвитку Інтернету речей у вітроенергетиці.

Ключові слова: IoT, відновлювана енергетика, турбіна, вітрові електростанції, штучний інтелект, офшорна енергетика.

Постановка проблеми. Інтернет речей (Internet of Things, IoT) передбачає інтеграцію фізичних пристроїв – таких як датчики, машини та системи керування – з інформаційно-телекомунікаційними мережами з метою збирання, обміну та аналізу даних, а також реагування на них у режимі реального часу. Завдяки мініатюризації датчиків, розвитку бездротового зв'язку та штучного інтелекту IoT забезпечує створення інтелектуальних систем, здатних до самодіагностики, прогнозування подій і оптимізації процесів.

Вітрові електростанції являють собою сукупність вітрових турбін, розміщених на одній території, які перетворюють кінетичну енергію вітру на електричну енергію. Окрема вітрова турбіна складається, зокрема, з ротора з лопатями, редуктора, генератора, системи керування та вежі. Вироблена електроенергія передається до електричної мережі та становить вагомую частку енергетичного балансу як на локальному, так і на глобальному рівнях [1].

Інтеграція технологій IoT з відновлюваними джерелами енергії, зокрема з вітроенергетичними установками, відкриває нові перспективи технологічного розвитку. Застосування IoT забезпечує безперервний моніторинг експлуатаційних параметрів турбін, раннє виявлення відмов і впровадження предиктивного технічного обслуговування, що дає змогу суттєво знизити експлуатаційні витрати та подовжити термін служби обладнання. Крім того, IoT сприяє кращій інтеграції вітрових електростанцій із розумними електромережами, підвищуючи стабільність мережі та ефективність використання відновлюваних джерел енергії.

Формулювання мети статті. Метою статті є розгляд інтеграції технологій Інтернету речей у вітроенергетичні системи з позицій уніфікованої чотирирівневої архітектури та висвітлення її можливостей для моніторингу, оптимізації роботи турбін, технічного обслуговування й інтеграції з електромережею.

У межах даного дослідження інтеграція технологій IoT у вітроенергетичні системи розглядається з позицій уніфікованої чотирирівневої архітектури, сформованої на основі зростання складності керування, часових горизонтів ухвалення рішень і масштабу інтеграції з фізичною енергетичною системою. Запропоновані рівні відображають послідовний перехід від моніторингу й реактивного керування в режимі реального часу (рівень 1) до адаптивного та предиктивного керування (рівень 2), далі – до системної оптимізації на рівні парку вітрових турбін (рівень 3) і, зрештою, до стратегічної інтелектуальності, орієнтованої на життєвий цикл активів, кіберфізичну безпеку та довгостроковий вплив (рівень 4). Така декомпозиція дозволяє чітко відокремити якісно різні класи задач і водночас застосувати єдину концептуальну рамку до аналізу експлуатаційної продуктивності, технічного обслуговування та інтеграції вітроенергетичних систем у ширшу енергетичну та екологічну екосистему. Подальший виклад матеріалу структуровано відповідно до цієї чотирирівневої логіки, що дозволяє послідовно простежити еволюцію IoT-орієнтованих рішень – від базового збору даних до стратегічного керування вітроенергетичними активами.

Аналіз останніх досліджень. У сучасних вітрових електростанціях кожна турбіна оснащується багатосенсорними вимірювальними системами [2]. Типовий набір датчиків (табл. 1) включає:

- акселерометри, які контролюють вібрації та відхилення ротора, ідентифікують механічні резонанси, фіксують аномальні коливання та забезпечують прогнозування відмов підшипників і валів;
- тензодатчики, що вимірюють напруження в лопатях і вежі турбіни та дають змогу виявляти структурні пошкодження;
- датчики температури та вологості, призначені для моніторингу генератора, підшипників і систем охолодження, а також для захисту електронних компонентів і лопатей;
- анемометри, системи LiDAR та SODAR, які вимірюють швидкість і напрямок вітру, впливаючи на оптимізацію кута атаки лопатей і прогнозування режимів роботи вітрової турбіни.

Таблиця 1

Типовий набір сенсорів, що використовується в сучасних вітрових турбінах

Тип датчика	Вимірюваний параметр	Призначення
Акселерометри	Вібрації	Прогнозування відмов підшипників і валів
Тензодатчики	Деформація, напруження	Моніторинг лопатей і вежі, виявлення структурних пошкоджень
Анемометри	Швидкість і напрямок вітру	Оптимізація кута атаки лопатей
Термопари	Температура	Контроль перегріву компонентів
Датчики вологості	Атмосферна вологість	Захист електроніки та лопатей
LiDAR / SODAR	Профілювання вітру та турбулентність	Прогнозування режимів роботи вітрової турбіни

Зібрані дані в режимі реального часу передаються до локальних або хмарних систем для подальшого аналізу. Інтеграція технологій IoT із системами керування SCADA забезпечує повну автоматизацію роботи вітрових турбін і сприяє адаптації системи до змінних погодних умов. На практиці така інтеграція підтримує динамічне регулювання кута повороту лопатей і частоти обертання ротора залежно від варіабельності вітрового потоку. Вона також дає змогу автоматично перемикаєти режими роботи (наприклад, запуск або зупинку турбіни) з урахуван-

ням метеорологічних умов і технічного стану обладнання, що сприяє оптимізації виробництва електроенергії та мінімізації зношування компонентів. Крім того, реалізується віддалене керування та діагностика: оператор може дистанційно контролювати й коригувати експлуатаційні параметри, тоді як автоматизовані системи здатні виявляти аномалії та забезпечувати швидше визначення потенційних несправностей.

Удосконалені алгоритми машинного навчання та штучного інтелекту дедалі частіше застосовуються для аналізу даних, отриманих від вітрових турбін, з метою оптимізації їхньої роботи. Такі моделі опрацьовують дані з датчиків, прогнози вітрових умов і історичні експлуатаційні дані, що дає змогу прогнозувати обсяги виробництва електроенергії, виявляти зниження ефективності та завчасно передбачати необхідність виконання ремонтних робіт.

З використанням сучасних моделей машинного навчання стає можливим прогнозування залишкового ресурсу ключових компонентів турбіни, зокрема підшипників і редукторів. На основі аналізу попередніх і поточних даних сенсорів такі моделі здатні ідентифікувати характерні закономірності, що свідчать про наближення відмов.

Крім того, поєднання цифрових двійників із технологіями IoT забезпечує створення віртуальних моделей вітрових турбін, які відтворюють їхню поведінку в режимі реального часу. Інтеграція даних від IoT-датчиків із такими моделями дає змогу здійснювати прогнозування відмов, оптимізувати експлуатаційні параметри та планувати технічне обслуговування.

Основна частина. Інтеграція технологій IoT у вітрові турбіни забезпечує вагомі технічні та економічні переваги, які доцільно поділити на три основні групи:

- експлуатаційна продуктивність та енергоефективність;
- технічне обслуговування, надійність і безпека;
- координація з електромережею та екологічна аналітика.

На рис. 1 показано ключові напрями, у яких технології IoT сприяють розвитку та підвищенню ефективності вітрових електростанцій.

Експлуатаційна продуктивність та енергоефективність становлять базову категорію переваг, що забезпечуються впровадженням технологій IoT у системах вітроенергетики. У межах уніфікованої багаторівневої архітектури ці переваги реалізуються через послідовне впровадження дедалі більш розвинених рівнів вимірювання, адаптації, системної оптимізації та стратегічного керування. Головною метою на всіх рівнях є максимізація виробництва електроенер-

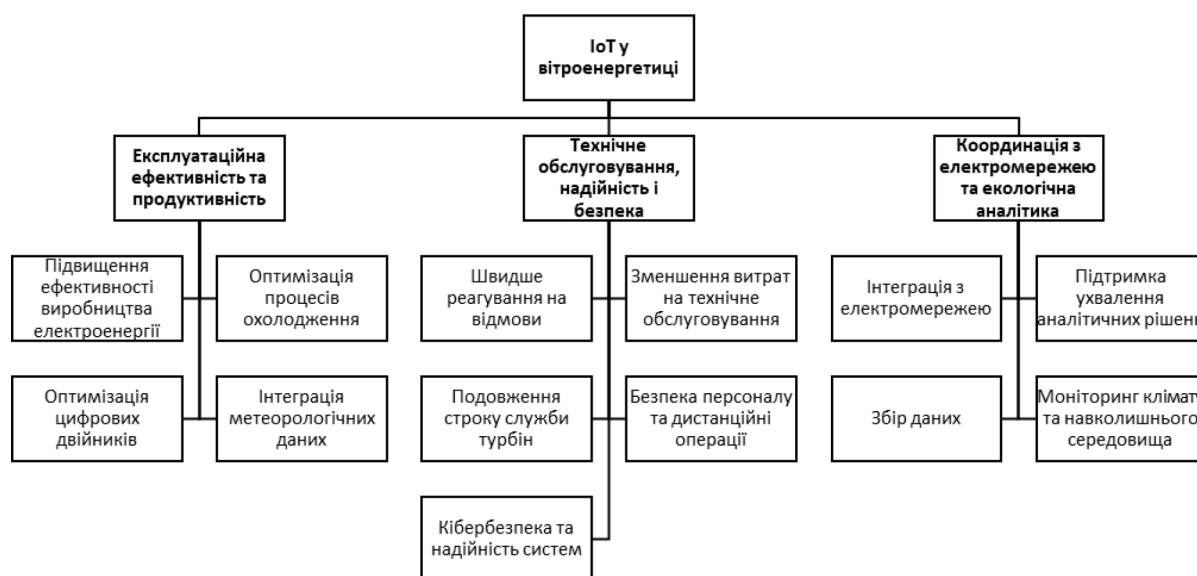


Рис. 1. Основні напрями застосування IoT у системах вітроенергетики

гії за умови забезпечення стабільної роботи турбін в умовах постійно змінного навколишнього середовища.

На базовому рівні (рівень 1) IoT-системи забезпечують безперервний контроль ключових експлуатаційних параметрів, зокрема швидкості вітру, кута повороту лопатей, частоти обертання ротора, рівня вібрацій та внутрішніх температур. Оперативний збір даних у режимі реального часу уможливорює реалізацію зворотного зв'язку, що дозволяє турбінам динамічно регулювати кут установки лопатей, орієнтацію по вітру (yaw-керування) та активацію систем охолодження у відповідь на короткочасні коливання вітрових умов. Такий замкнений контур керування забезпечує роботу поблизу оптимальних точок енергоефективності за одночасного зменшення механічних навантажень.

Подальший розвиток IoT-орієнтованого керування (рівень 2) пов'язаний з урахуванням впливу навколишнього середовища та переходом від реактивних до адаптивних і предиктивних стратегій. Якщо для малопотужних наземних турбін із номінальною потужністю до 1 МВт пасивне охолодження залишається достатнім, то для більш потужних установок – особливо морських вітрових електростанцій, що працюють у вологих кліматичних умовах, – необхідним є застосування активних систем охолодження [3]. Системи охолодження, підсилені технологіями IoT, використовують безперервні вимірювання температури та вологості для динамічного регулювання інтенсивності охолодження, що дає змогу зменшити допоміжне енергоспоживання та обмежити зношування компонентів, спричинене термічними циклами. Стратегії керування з урахуванням погодних умов додатково підтримують адаптивну поведінку турбін, дозволяючи прогнозувати зміни середовища, а не лише реагувати на них.

На етапі системної оптимізації (рівень 3) ключову роль відіграють цифрові двійники, які забезпечують створення віртуального представлення окремих вітрових турбін або цілих вітрових електростанцій. Завдяки використанню безперервно оновлюваних даних від сенсорів цифрові двійники уможливають високоточне моделювання поведінки турбін за різних стратегій керування. Оператори можуть оцінювати вплив змін кута повороту лопатей, кута орієнтації по вітру або частоти обертання ротора на вироблення електроенергії, навантаження на компоненти та накопичення втомних пошкоджень без ризику для фізичного обладнання. Цей рівень забезпечує узгоджену оптимізацію взаємодії кількох підсистем, на відміну від ізольованого налаштування окремих параметрів.

На найвищому рівні абстракції (рівень 4) IoT-орієнтовані системи зосереджуються на забезпеченні довготривалої енергоефективності та керуванні, орієнтованому на повний життєвий цикл обладнання. Поєднуючи результати моніторингу в режимі реального часу, адаптивного керування та моделювання на основі цифрових двійників, IoT-системи підтримують стратегічне ухвалення рішень, спрямоване на збереження високої ефективності протягом усього терміну експлуатації турбін. На цьому рівні цілі оптимізації зміщуються від миттєвих показників продуктивності до забезпечення довгострокового енергетичного виходу, надійності та збереження вартості активів.

Категорія технічного обслуговування, надійності та безпеки ґрунтується на експлуатаційних рівнях і розширює функціональні можливості IoT у напрямі проактивного зниження ризиків, подовження життєвого циклу обладнання та підвищення безпеки персоналу. У межах тієї самої чотирирівневої архітектури IoT-системи трансформують вітрові турбіни з об'єктів, що обслуговуються реактивно, у стійкі кіберфізичні системи, здатні завчасно прогнозувати відмови та мінімізувати експлуатаційні ризики.

На першому рівні системи контролю технічного стану на базі IoT здійснюють безперервне відстеження механічних і електричних показників, таких як рівень вібрацій, температура, стан мастильних матеріалів і стабільність електричної потужності. Алгоритми виявлення аномалій

аналізують ці потоки даних з метою раннього визначення відхилень від нормального режиму роботи. У відповідь системи керування можуть автоматично коригувати параметри турбіни – наприклад, змінювати кут атаки лопатей за наявності надмірних вібрацій – або повідомляти операторів про необхідність ручного втручання. Така здатність до швидкого реагування суттєво знижує ймовірність розвитку аварійних ситуацій.

Подальший розвиток IoT-орієнтованих підходів до технічного обслуговування пов'язаний із впровадженням предиктивних стратегій (рівень 2), що ґрунтуються на фактичному стані обладнання, а не на фіксованих регламентних інтервалах. Завдяки виявленню ранніх ознак зношування або деградації IoT-системи дозволяють планувати обслуговування лише за необхідності, зменшуючи непродуктивні простої та оптимізуючи розподіл ресурсів. Зокрема, безперервний контроль рівня та якості мастила забезпечує раннє виявлення витоків, запобігаючи вторинним пошкодженням критично важливих компонентів. Такий підхід, орієнтований на фактичний стан, безпосередньо знижує витрати на технічне обслуговування та водночас підвищує коефіцієнт готовності вітрових турбін.

Із переходом до аналізу на рівні вітрової електростанції (рівень 3) технічний стан обладнання розглядається в системному контексті, охоплюючи весь парк турбін і пов'язані з ним процеси технічного обслуговування. Агреговані дані, зібрані з кількох установок, забезпечують можливість порівняльного аналізу надійності, виявлення системних закономірностей відмов і узгодженого планування сервісних робіт. Одночасно технології IoT сприяють підвищенню рівня безпеки персоналу, зменшуючи контакт із небезпечними умовами завдяки впровадженню предиктивного технічного обслуговування [4], а також забезпечуючи можливість дистанційних оглядів і супроводжуваних ремонтних операцій із використанням інтерфейсів доповненої реальності. Такі можливості є особливо важливими для морських вітрових електростанцій і об'єктів, розташованих на значній висоті.

У довгостроковій перспективі (рівень 4) IoT-орієнтовані підходи до технічного обслуговування зосереджуються на забезпеченні стійкості системи та її кіберфізичної безпеки. Хоча механізми шифрування й автентифікації забезпечують захист каналів зв'язку IoT, фізична інфраструктура залишається вразливою до зовнішніх втручань. Додатковий рівень захисту формується завдяки сенсорно-орієнтованим методам виявлення аномалій, які дозволяють ідентифікувати нетипові режими вібрацій, температури або споживання енергії, що можуть свідчити про несанкціоноване втручання, крадіжку енергії або пошкодження обладнання. Кореляція даних від різних сенсорів дає змогу формувати ранні попередження та підвищувати загальний рівень кіберфізичної безпеки вітроенергетичних установок.

Категорія координації з електромережею та екологічної аналітики розширює багаторівневу IoT-архітектуру за межі окремих вітрових турбін і вітрових електростанцій у напрямі масштабних енергетичних систем та моніторингу навколишнього середовища. На цьому рівні вітрові електростанції, оснащені IoT-технологіями, функціонують як узгоджені елементи електроенергетичної мережі, водночас роблячи внесок у формування довгострокової екологічної аналітики.

IoT-системи агрегують експлуатаційні дані (рівень 1) від усіх вітрових турбін і пов'язаних з ними систем накопичення енергії в межах вітрової електростанції, забезпечуючи цілісне уявлення про поточні режими генерації та споживання. Об'єднання кількох генерувальних і накопичувальних активів в єдину IoT-мережу дозволяє передавати сенсорні дані до хмарних або периферійних платформ для колективного опрацювання. Така агрегація даних у реальному часі формує основу для узгодженого енергетичного керування та підвищує керованість процесів на рівні всієї електростанції.

Подальший розвиток цих підходів пов'язаний із використанням інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень для адаптивного диспетчерського керування енергопотоками

(рівень 2). Алгоритми машинного навчання та штучного інтелекту аналізують агреговані масиви даних з метою динамічного регулювання потужності турбін, активації ємностей систем накопичення або перенаправлення згенерованої електроенергії до регіонів із підвищеним попитом [5]. Завдяки автоматизованим сповіщенням і показникам достовірності рішень процесу ухвалення управлінських рішень, які раніше вимагали тривалого ручного аналізу, можуть виконуватися протягом лічених хвилин.

За умов масштабної інтеграції вітрової генерації аналітичне та статистичне опрацювання безперервних потоків даних (рівень 3) від сотень або тисяч турбін набуває системного характеру. Показники швидкості вітру, кута повороту лопатей, рівня вібрацій і вироблюваної потужності створюють підґрунтя для координації процесів на рівні електромережі, виявлення довготривалих тенденцій і розпізнавання закономірностей, недоступних для аналізу на рівні окремої турбіни [6]. Отримані результати використовуються для порівняльної оцінки ефективності, ідентифікації системних неефективностей та впровадження удосконалень у конструкцію турбін і стратегії їх керування на основі даних.

У ширшій перспективі функціональність IoT-орієнтованих рішень виходить за межі оперативного керування електричною енергією та доповнюється екологічною й кліматичною аналітикою (рівень 4). Окрім мінімізації втрат електроенергії та подовження терміну служби вітрових турбін [7], вітрові електростанції з підтримкою IoT можуть функціонувати як розподілені платформи екологічного моніторингу. Дані щодо локальних кліматичних умов, якості повітря та динаміки екосистем використовуються для підтримки екологічних досліджень і формування політик у сфері охорони довкілля, посилюючи роль вітроенергетичної інфраструктури як елемента ширших систем кліматичного спостереження.

У табл. 2 наведено уніфіковану чотирирівневу IoT-архітектуру, застосовану до трьох функціональних доменів: експлуатаційної продуктивності та енергоефективності, технічного обслуговування, надійності й безпеки, а також координації з електромережею та екологічної аналітики. Кожен рівень відображає поступове підвищення рівня абстракції – від моніторингу й керування в режимі реального часу до стратегічної інтелектуальності та довгострокового системного впливу.

Промислові застосування IoT у вітроенергетиці. Наведені нижче промислові приклади ілюструють практичну реалізацію запропонованої чотирирівневої IoT-архітектури в реальних системах вітроенергетики. Ці кейси демонструють впровадження моніторингу та керування в режимі реального часу, адаптивного й предиктивного керування, системної оптимізації та стратегічної інтелектуальності на рівні масштабних вітрових електростанцій. Представлені платформи відрізняються архітектурними підходами та масштабом реалізації, проте в сукупності підтверджують життєздатність і ефективність IoT-орієнтованих рішень у сучасній вітроенергетичній інфраструктурі.

Компанія Siemens Gamesa експлуатує мережу глобальних центрів дистанційної діагностики, які здійснюють збирання та аналіз даних IoT-датчиків з понад 30 000 вітрових турбін у всьому світі. Основною метою цієї системи є забезпечення високого коефіцієнта готовності турбін і раннє виявлення механічної деградації шляхом безперервного моніторингу технічного стану та застосування розширених аналітичних методів.

На першому рівні датчики, встановлені на ключових компонентах турбіни – зокрема в гондолі, редукторі, генераторі та на лопатях, – безперервно вимірюють рівень вібрацій, температуру та електричну потужність. Збирання даних здійснюється з частотами дискретизації від часток герца до кількох герц залежно від типу контролюваного сигналу. Обмін даними між польовими пристроями та системами вищого рівня відповідає стандарту IEC 61400-25-1, який визначає моделі даних та інтерфейси для моніторингу й керування вітровими електростанціями, та реалізується з використанням протоколів Modbus і OPC UA.

Таблиця 2

Уніфікована чотирирівнева IoT-архітектура для систем вітроенергетики

Рівень	Експлуатаційна продуктивність та енергоефективність	Технічне обслуговування, надійність і безпека	Координація з електромережею та екологічна аналітика
Рівень 1. Моніторинг і керування в режимі реального часу	Моніторинг і керування кутом повороту лопатей, орієнтацією по вітру та системами охолодження на основі даних сенсорів окремої турбіни	Безперервний контроль технічного стану та швидке виявлення механічних або електричних аномалій з автоматичними механізмами реагування	Агрегація в режимі реального часу експлуатаційних даних з усіх турбін і систем накопичення енергії в межах вітрової електростанції
Рівень 2. Адаптивне та предиктивне керування	Стратегії керування з урахуванням погодних умов і адаптивне теплове керування на основі даних про навколишнє середовище	Предиктивне технічне обслуговування та обслуговування за фактичним станом, ініційоване ранніми індикаторами відмов	Підтримка прийняття рішень на основі штучного інтелекту для адаптивного диспетчерського керування та розподілу потужності
Рівень 3. Системна оптимізація та координація	Оптимізація роботи турбін і вітрових електростанцій на основі цифрових двійників із використанням віртуального моделювання	Оцінка надійності на рівні парку турбін, узгоджене планування технічного обслуговування та підтримка безпеки персоналу	Аналітика на рівні електромережі, масштабна оцінка ефективності та узгоджена взаємодія з електроенергетичною мережею
Рівень 4. Стратегічна інтелектуальність і довгостроковий вплив	Оптимізація енергоефективності, орієнтована на життєвий цикл, та максимізація довгострокового енергетичного виходу	Кіберфізична безпека, довготривала стійкість системи та зниження ризиків	Екологічна та кліматична аналітика, сформована на основі довгострокового збору екологічних даних

Другий рівень забезпечує адаптивне та предиктивне керування завдяки передаванню даних у режимі реального часу до центрів дистанційної діагностики через супутникові канали зв'язку, мережі 4G/5G або волоконно-оптичні лінії. На цьому етапі застосовуються аналітичні методи на основі штучного інтелекту для виявлення ранніх ознак зношування зубчастих передач, пошкодження підшипників або аномальних режимів роботи, що дозволяє планувати технічне обслуговування до виникнення відмов.

На третьому рівні централізована аналітика, реалізована в межах відкритої хмарної IoT-операційної системи MindSphere, підтримує системну оптимізацію на рівні всього парку турбін. Завдяки кореляції даних, отриманих від тисяч вітрових турбін, платформа забезпечує порівняльну оцінку продуктивності, розпізнавання типових шаблонів аномалій і узгоджене планування технічного обслуговування.

Зрештою, на четвертому рівні стратегічна інтелектуальність реалізується через довгострокову оптимізацію коефіцієнта готовності та керування активами, орієнтоване на повний життєвий цикл. Згідно з корпоративними звітами, застосування предиктивної аналітики на базі IoT дозволило зменшити кількість позапланових робіт з технічного обслуговування до 30 % та підвищити коефіцієнт готовності турбін до понад 98 %. Коефіцієнт готовності, який визначається як відсоток часу, протягом якого турбіна здатна виробляти електроенергію в межах свого робочого діапазону швидкостей вітру, безпосередньо впливає на доходи від продажу електроенергії та дотримання умов контрактів на сервісне обслуговування. Невиконання договірних показників готовності зазвичай призводить до фінансових санкцій для постачальників послуг, що робить оптимізацію доступності на основі IoT критично важливим чинником досягнення високої окупності інвестицій у проєктах вітрових електростанцій.

Платформа Predix є комплексним IoT-рішенням, призначеним для інтеграції даних від вітрових турбін, підстанцій і метеорологічних станцій у межах кількох вітрових електростанцій.

Архітектура платформи орієнтована на масштабованість, мінімальну затримку реагування та безшовну інтеграцію з наявними SCADA-інфраструктурами.

На першому рівні Predix агрегує експлуатаційні дані в режимі реального часу з розподілених пристроїв, зокрема сенсорів турбін, електричних підсистем і обладнання для моніторингу навколишнього середовища. При цьому використовуються SCADA-системи моніторингу та збору даних, що дозволяє зменшити складність системи та обмежити потребу в додаткових сенсорах контролю технічного стану, роблячи рішення економічно доцільним для масштабних впроваджень.

Другий рівень базується на використанні периферійних обчислень, у межах яких частина обробки даних виконується локально на edge-пристроях, а не виключно в централізованих хмарних середовищах. Такий підхід зменшує затримки передавання даних і забезпечує швидше реагування на аномальні режими роботи. Алгоритми машинного навчання аналізують сигнали вібрацій, стан мастильних матеріалів і характеристики електричного струму, застосовуючи класифікаційні моделі, зокрема Random Forest, XGBoost та k-nearest neighbors, для оцінювання технічного стану вітрових турбін [8].

На третьому рівні цифрові двійники виступають ключовим інструментом системної оптимізації. Віртуальні копії фізичних вітрових турбін створюються на основі історичних експлуатаційних даних і фізично обґрунтованих моделей. Такі цифрові двійники використовуються для моделювання режимів роботи, прогнозування відмов окремих компонентів і оптимізації графіків технічного обслуговування на рівні всього парку вітрових турбін. Оцінюючи різні сценарії експлуатації у віртуальному середовищі, інженери можуть визначати оптимальні стратегії заміни компонентів і мінімізувати простой ще до виникнення відмов [9].

Четвертий рівень розширює функціональні можливості платформи Predix у напрямі стратегічної координації з електромережею. Платформа підтримує інтеграцію з системами керування розумними електромережами, що забезпечує динамічне балансування енергопостачання шляхом коригування вихідної потужності вітрових електростанцій відповідно до коливань попиту. Така функціональність підвищує стабільність електромережі та дозволяє вітровим електростанціям діяти як активні учасники ширшої енергетичної системи, а не як ізольовані генерувальні об'єкти [10].

Окрім комплексних промислових платформ, у наземних і морських вітрових електростанціях широко застосовується низка спеціалізованих IoT-орієнтованих рішень для моніторингу та SCADA-систем. Такі системи зазвичай зосереджуються на окремих рівнях IoT-архітектури, передусім на моніторингу в режимі реального часу та предиктивному технічному обслуговуванні.

Системи Turbine Condition Monitoring забезпечують безперервний вібраційний моніторинг для виявлення дефектів і оцінювання технічного стану обладнання, пропонуючи масштабовані можливості обміну даними між вітровими електростанціями. OrbiSCADA є хмарним SCADA-рішенням, розробленим для моніторингу та керування турбінами компанії Vestas, яке підтримує візуалізацію виробничих даних, відстеження швидкості вітру, контроль частоти обертання, обробку аварійних повідомлень і аналіз історичних даних у межах єдиного програмного інтерфейсу. Система Vestas CMS інтегрує датчики вібрацій і стану мастила для виявлення широкого спектра механічних несправностей, забезпечуючи цілодобовий дистанційний моніторинг, формування звітів і генерацію аварійних сигналів з метою проактивного планування технічного обслуговування.

У сукупності наведені промислові реалізації демонструють, яким чином запропонована чотирирівнева IoT-архітектура втілюється на практиці в різноманітних системах вітроенергетики. Від моніторингу в режимі реального часу та адаптивної аналітики до оптимізації на рівні

парку турбін і стратегічної інтеграції з електромережею – розглянуті платформи підтверджують, що технології IoT відіграють ключову роль у підвищенні експлуатаційної ефективності, надійності та довгострокової стійкості сучасних вітрових електростанцій.

Хоча ці платформи значною мірою спираються на розширені аналітичні методи та машинне навчання, їхня ефективність зрештою залежить від коректного відображення фізичних процесів, зокрема аеродинамічних сил, що діють на ротор, теплової поведінки компонентів приводу та накопичення структурної втоми за умов змінної швидкості вітру. Це підкреслює важливість поєднання методів, заснованих на аналізі даних, із предметними знаннями в галузі вітроенергетичного машинобудування.

Архітектурні основи IoT-орієнтованих систем вітроенергетики. Сучасні вітроенергетичні системи на базі IoT спираються на багаторівневий технологічний стек, що інтегрує системи диспетчерського керування, розподілені обчислення, розширену аналітику та механізми безпечного обміну даними. Сукупно ці компоненти забезпечують моніторинг у режимі реального часу, предиктивне технічне обслуговування, масштабну оптимізацію та довгострокове стратегічне керування вітровими електростанціями. Відповідно до запропонованої чотирирівневої IoT-архітектури, у наступних підрозділах розглянуто ключові технологічні засади, що лежать в основі промислових реалізацій, описаних вище. Огляд основних архітектурних компонентів і допоміжних технологій, які використовуються в сучасних IoT-орієнтованих системах вітроенергетики, наведено на рис. 2.

На базовому рівні (рівень 1) системи диспетчерського керування та збору даних SCADA слугують основним інтерфейсом для моніторингу й керування вітровими турбінами. SCADA-системи збирають експлуатаційні сигнали, зокрема швидкість вітру, вироблювану потужність, температуру та частоту обертання, забезпечуючи дистанційний нагляд і базове виявлення аномалій. Хоча традиційно такі системи були орієнтовані на детерміноване керування та візуалізацію процесів, дані SCADA дедалі частіше повторно використовуються як вхідна інформація для моделей машинного навчання та хмарної аналітики, що розширює їхню функціональність за межі простого спостереження.

Для доповнення можливостей SCADA важливу роль відіграють периферійні обчислення, які стали ключовим чинником забезпечення низької затримки обробки даних. Виконуючи аналіз безпосередньо поблизу джерела даних – наприклад, у гондолі турбіни або локальному контр-



Рис. 2. Архітектурні компоненти та допоміжні технології IoT-орієнтованих систем вітроенергетики

олері, – edge-обчислення дозволяють швидко виявляти вібраційні аномалії чи короточасні відмови, одночасно зменшуючи затримки передавання та витрати на комунікацію. На практиці edge-пристрої часто функціонують у тісній взаємодії зі SCADA-системами, формуючи перший реактивний рівень IoT-орієнтованих архітектур вітрових електростанцій.

Поза межами безпосереднього керування адаптивні та предиктивні можливості реалізуються завдяки туманним обчисленням, які запроваджують проміжний рівень обробки даних (рівень 2) між edge-пристроями та централізованими хмарними платформами. Fog-вузли, що зазвичай розгортаються на підстанціях, морських платформах або в локальних центрах керування, агрегують і фільтрують дані від кількох турбін, виконують попередню аналітичну обробку та передають на вищі рівні лише ключові результати. Такий підхід дозволяє зменшити використання пропускну здатності мережі, енергоспоживання та експлуатаційні витрати, водночас підвищуючи рівень кібербезпеки та стійкості систем у географічно віддалених або морських вітрових електростанціях [11].

Однією з ключових цілей у fog-орієнтованих IoT-середовищах є мінімізація сумарного часу виконання завдань для застосунків реального часу за умови дотримання обмежень, пов'язаних з обчислювальними ресурсами, затримками та вимогами безпеки. Вибір між виконанням конкретного завдання на рівні fog-обчислень або його передаванням до хмарної інфраструктури є суттєвою оптимізаційною проблемою. Мобільність пристроїв, обмежена пропускна здатність периферійних каналів і жорсткі вимоги до безпеки можуть негативно впливати на затримки обробки даних, особливо в умовах динамічних режимів експлуатації.

Для подолання цих викликів було запропоновано вдосконалені стратегії планування завдань. У роботі [12] представлено алгоритм планування на основі нечіткої логіки, який обирає відповідні fog-обчислювальні вузли з урахуванням параметрів завдання, таких як обчислювальна складність, вимоги до зберігання даних, доступна пропускна здатність каналу, рівень безпеки та часові обмеження. Отримані результати свідчать, що одночасне врахування мережевої відстані та доступної пропускну здатності під час прив'язки IoT-пристроїв до fog-шлюзів дозволяє ефективніше скоротити час виконання завдань порівняно з підходами, заснованими лише на одному критерії.

На системному рівні (рівень 3) централізовані хмарні платформи даних виконують роль сховищ для різномірної інформації, що надходить з вітрових електростанцій, зокрема SCADA-вимірювань, високочастотних потоків сенсорних даних і результатів інспекцій на основі зображень. Такі платформи забезпечують масштабну агрегацію даних, довготривале зберігання та масштабовану аналітику, формуючи основу для розширених систем підтримки прийняття рішень на базі штучного інтелекту.

Над хмарними IoT-інфраструктурами дедалі частіше функціонує спеціалізований аналітичний рівень на основі штучного інтелекту та машинного навчання. Алгоритми машинного навчання аналізують вібраційні сигнали, акустичні емісії, показники стану мастильних матеріалів і коливання потужності з метою виявлення ранніх ознак відмов або зниження експлуатаційної ефективності. Моделі глибинного навчання, навчені на історичних IoT-наборах даних, здатні розпізнавати тонкі часові та контекстні закономірності, які можуть бути недоступними для людських операторів або традиційних правил-орієнтованих систем.

У контексті вітроенергетичних систем оптимізація на системному рівні за своєю природою обмежується фізичними явищами, такими як аеродинамічні навантаження, структурна втома та термічні напруження в компонентах приводу. Зміни швидкості вітру та інтенсивності турбулентності спричиняють циклічні навантаження на лопаті, вежу та конструкції гондоли, прискорюючи втому матеріалів і впливаючи на довгострокову надійність обладнання. Інтеграція фізично обґрунтованих ознак – зокрема спектрів навантажень, вібраційних характерис-

тик і температурних градієнтів – у аналітику, засновану на даних, дозволяє IoT-орієнтованим оптимізаційним фреймворкам узгоджувати алгоритмічні рішення з реальними механічними процесами вітрових турбін, а не розглядати їх як абстрактні джерела даних.

У низці сучасних досліджень [13] наведено розширені підходи, що базуються на глибинних нейронних мережах і гібридних архітектурах автоенкодерів, які поєднують варіаційні автоенкодери, рекурентні мережі довготривалої короткочасної пам'яті та трансформерні моделі. Застосування таких методів забезпечує раннє виявлення аномалій – до 48 годин до фактичного виникнення відмови – шляхом аналізу багатовимірних часових рядів SCADA-даних. Інтегровані конвеєри інженерії ознак виділяють часові, статистичні та частотно-спектральні характеристики, що дозволяє надійно оцінювати рівень аномальності навіть за відсутності розмічених даних про відмови.

Пов'язана з цим проблема, розглянута в роботі [14], стосується недостатнього обсягу навчальних даних для нововстановлених вітрових турбін. Застосування методів генеративної доменної адаптації дозволяє зіставляти SCADA-дані від добре задокументованих машин із турбінами, що мають обмежену історію експлуатації, забезпечуючи повторне використання наявних діагностичних моделей і підвищуючи надійність виявлення відмов на ранніх етапах роботи.

На найвищому рівні абстракції (рівень 4) технології IoT підтримують стратегічну інтелектуальність завдяки використанню цифрових двійників і механізмів безпечного обміну даними. Цифрові двійники окремих турбін або цілих вітрових електростанцій поєднують фізично обґрунтовані моделі з даними сенсорів у режимі реального часу, що дає змогу здійснювати моделювання, прогнозування відмов і планування технічного обслуговування. Такі моделі є особливо цінними для вітроенергетичних систем, у яких значна мінливість вітрових умов істотно впливає на структурну цілісність, енергоефективність і довгострокові експлуатаційні характеристики.

Предиктивні цифрові двійники інтегрують розширену аналітику даних, статистичне та ймовірнісне моделювання, а також методи машинного навчання для завчасного передбачення потенційних проблем ще до їх фізичного прояву. У вітроенергетичних застосуваннях практична цінність цифрових двійників визначається явною інтеграцією фізичних моделей турбін, які описують аеродинамічну поведінку, структурну динаміку та теплові ефекти. Коливання навантажень, зумовлені вітром, взаємодія турбулентних слідів і температурозалежні властивості матеріалів суттєво впливають на ресурс турбін та їхню енергоефективність. Включення таких фізичних обмежень до моделей цифрових двійників забезпечує узгодженість предиктивної аналітики та стратегій оптимізації з реальними умовами експлуатації, а не лише зі статистичними кореляціями.

Така проактивна здатність сприяє оптимізації експлуатаційних характеристик, підвищує економічну доцільність та покращує надійність системи. Гібридні системи цифрових двійників на основі штучного інтелекту, які поєднують фізичне моделювання з навчанням на основі даних, додатково підвищують точність прогнозування відмов і рівень інтерпретованості результатів. У разі розгортання в межах хмарно-периферійних архітектур такі системи забезпечують масштабованість, низькі затримки та підтримку прийняття рішень у режимі реального часу, що робить їх придатними для керування розподіленими відновлюваними енергетичними ресурсами та їх інтеграції в інфраструктуру розумних електромереж. Відтак цифрові двійники розглядаються як наскрізна технологія, що охоплює рівні 3 і 4 запропонованої архітектури.

Паралельно з цим технологія блокчейн дедалі активніше досліджується як механізм безпечного й прозорого обміну IoT-даними між операторами вітрових електростанцій, диспетчерами електромереж і учасниками енергетичного ринку. Зберігання вимірювань сенсорів і даних про

виробництво електроенергії у розподілених реєстрах забезпечує цілісність даних, їхню простежуваність та автоматизоване виконання смартконтрактів без посередників. У поєднанні з даними IoT у режимі реального часу блокчейн-орієнтовані системи підвищують рівень прозорості та довіри у застосуваннях відновлюваної енергетики, підтримуючи прямий обмін електроенергією, виявлення шахрайства, верифікацію «зелених» сертифікатів і моніторинг внеску відновлюваних джерел у загальний енергетичний баланс.

У сукупності ці архітектурні та технологічні засади демонструють, яким чином IoT-орієнтовані системи вітроенергетики еволюціонують від диспетчерського керування в режимі реального часу до адаптивної інтелектуальності, масштабної оптимізації та стратегічної інтеграції в енергетичну екосистему. Узгоджуючи SCADA-системи, парадигми розподілених обчислень, аналітику на основі штучного інтелекту, цифрові двійники та механізми безпечного обміну даними в межах уніфікованої чотирирівневої архітектури, сучасні вітрові електростанції досягають підвищеної ефективності, надійності та довгострокової сталості.

Виклики та обмеження. Незважаючи на суттєві переваги, які забезпечують IoT-орієнтовані системи вітроенергетики, їх масштабне впровадження супроводжується низкою технічних, організаційних та економічних викликів. Ці обмеження зумовлені притаманною складністю вітроенергетики як кіберфізичної системи, у якій цифрова інфраструктура має надійно функціонувати в жорстких умовах навколишнього середовища, залишаючись при цьому тісно пов'язаною з фізичними процесами та обмеженнями електроенергетичної системи.

На базовому рівні моніторингу й керування в режимі реального часу однією з головних проблем є надійність сенсорів і якість даних. Вітрові турбіни працюють в умовах значних вібрацій, коливань температури, підвищеної вологості та механічних навантажень, що може призводити до деградації датчиків, зсуву калібрування або періодичної втрати даних. Неточні або зашумлені вимірювання безпосередньо впливають на керувальні рішення та знижують ефективність подальшої аналітичної обробки. Крім того, інтеграція різномірних сенсорів від різних виробників ускладнює гармонізацію даних і довгострокове обслуговування системи.

На вищих рівнях додатковими обмежувальними чинниками стають затримки передавання даних і обмежена пропускна здатність каналів зв'язку, особливо для морських вітрових електростанцій і географічно розподілених установок. Хоча edge- та fog-обчислення частково пом'якшують ці проблеми завдяки локальній обробці даних, питання визначення того, які дані доцільно обробляти локально, а які – передавати до централізованих хмарних платформ, залишається складною оптимізаційною задачею. Обмежена пропускна здатність, нестабільність мережі та мобільність окремих IoT-компонентів можуть негативно впливати на оперативність реагування в режимі реального часу й підвищувати складність системи. Додаткові обмеження пов'язані зі складністю оркестрації завдань між рівнями edge, fog і cloud, особливо за жорстких вимог до затримок і безпеки, що підкреслюється у сучасних дослідженнях з керування розподіленими IoT-ресурсами [15].

З позиції інформаційних технологій кібербезпека становить критичний виклик на всіх архітектурних рівнях. Вітрові електростанції, оснащені IoT-технологіями, мають значну поверхню атаки через використання розподілених пристроїв, бездротового зв'язку та механізмів віддаленого доступу. Хоча шифрування, автентифікація та захищені протоколи обміну даними знижують кіберризики, фізичний доступ до компонентів турбін і edge-пристроїв залишається вразливим місцем. Забезпечення наскрізної безпеки без внесення надмірних обчислювальних витрат або затримок є особливо складним у сценаріях керування та моніторингу в режимі реального часу.

Іншим важливим обмеженням є масштабованість та інтерпретованість аналітики, заснованої на даних. Моделі машинного навчання та штучного інтелекту потребують великих обсягів високоякісних даних для навчання й валідації, які можуть бути недоступними для нововстановлених турбін або рідкісних режимів відмов. Крім того, суто дата-орієнтовані моделі не

завжди здатні узагальнювати результати для різних конструкцій турбін, умов експлуатації або вітрових режимів. Це обмеження підкреслює необхідність фізично інформованих і гібридних підходів до моделювання, які явно враховують аеродинамічні навантаження, структурну динаміку та теплову поведінку в аналітичних фреймворках.

Економічні чинники також істотно впливають на впровадження IoT-технологій у вітроенергетичних системах. Розгортання розвиненої сенсорної інфраструктури, розподілених обчислювальних платформ і захищених комунікаційних мереж потребує значних початкових інвестицій. Хоча довгострокові вигоди – зокрема скорочення простоїв, підвищення коефіцієнта готовності та оптимізація технічного обслуговування – можуть компенсувати ці витрати, фактична окупність інвестицій залежить від масштабу турбін, тривалості проєкту та регуляторних умов. Невеликі вітрові електростанції можуть стикатися з додатковими бар'єрами через обмежені фінансові й технічні ресурси.

Нарешті, організаційні та регуляторні виклики впливають на інтеграцію вітрових електростанцій, оснащених IoT-технологіями, у ширші енергетичні системи. Ітероперабельність між SCADA-системами, IoT-платформами та інфраструктурами керування електромережею залишається обмеженою через використання пропрієтарних рішень і відсутність уніфікованих стандартів. Крім того, регуляторні рамки, що визначають питання володіння даними, кібербезпеки та торгівлі електроенергією, істотно відрізняються між регіонами, що ускладнює транскордонну інтеграцію та координацію у великому масштабі.

Підсумовуючи, попри те що IoT-технології відкривають значні можливості для підвищення ефективності, надійності та інтелектуальності систем вітроенергетики, їх результативне впровадження потребує зваженого врахування технічних обмежень, поведінки фізичних систем, ризиків кібербезпеки та економічної доцільності. Подолання зазначених викликів вимагає міждисциплінарних підходів, які поєднують експертизу в галузях інформаційних технологій, вітроенергетичного інжинірингу та експлуатації електроенергетичних систем, а також подальших досліджень у напрямі масштабованих, безпечних і фізично обґрунтованих IoT-архітектур.

Висновки. У цьому дослідженні розглянуто роль Інтернету речей у сучасних системах вітроенергетики та запропоновано уніфіковану чотирирівневу IoT-архітектуру, яка поєднує інформаційні технології з інженерними вимогами вітроенергетики. Запропонована архітектура систематизує функціональні можливості IoT за рівнями моніторингу й керування в режимі реального часу, адаптивного та предиктивного керування, системної оптимізації та стратегічної інтелектуальності, формуючи цілісну основу для аналізу як експлуатаційних, так і довгострокових аспектів цифровізації вітрових електростанцій.

З позицій енергетичного інжинірингу представлений підхід демонструє, яким чином безперервне вимірювання параметрів, удосконалені стратегії керування та оптимізація на основі даних підвищують продуктивність вітрових турбін, покращують їхню надійність і подовжують термін служби обладнання в умовах значної мінливості навколишнього середовища. IoT-орієнтований моніторинг механічних, теплових та аеродинамічних параметрів забезпечує точніше керування роботою турбін, зменшує механічні навантаження та уможливорює впровадження проактивних стратегій технічного обслуговування, які безпосередньо впливають на енергетичний вихід і коефіцієнт готовності системи.

З позицій інформаційних технологій у статті підкреслено важливість парадигм розподілених обчислень, хмарної аналітики, штучного інтелекту та цифрових двійників як ключових чинників формування інтелектуальних систем вітроенергетики. Технології edge- та fog-обчислень зменшують затримки та комунікаційні накладні витрати, тоді як централізовані платформи даних і аналітика на основі штучного інтелекту забезпечують масштабне розпізнавання закономірностей, предиктивне технічне обслуговування та оптимізацію на рівні парку

турбін. Технології цифрових двійників додатково поєднують фізичний і віртуальний домени, уможливаючи безпечне експериментування, прогнозування відмов і підтримку ухвалення рішень, орієнтованих на життєвий цикл.

Аналіз промислових реалізацій підтверджує, що запропонована чотирирівнева архітектура є не лише концептуальною, а й практично здійсненою. Платформи, розгорнуті провідними виробниками вітроенергетичного обладнання та постачальниками сервісних послуг, демонструють, як IoT-технології вже сьогодні застосовуються для підвищення експлуатаційної ефективності, вдосконалення планування технічного обслуговування та покращення взаємодії з електромережею у великому масштабі. Ці приклади з реальної практики підтверджують ефективність поєднання SCADA-систем, розподілених обчислень, аналітики на основі штучного інтелекту та стратегічної інтеграції з електромережею в межах уніфікованої архітектурної концепції.

Попри зазначені переваги, низка проблем залишається актуальною. Ризики кібербезпеки, високі початкові інвестиційні витрати, проблеми якості даних, деградація сенсорів у складних умовах експлуатації, а також потреба в міждисциплінарній експертизі й надалі обмежують повномасштабне використання IoT у системах вітроенергетики. Подолання цих викликів потребує подальших досліджень у сфері захищених архітектур, стандартизованих моделей даних, надійних сенсорних технологій та інтелектуального керування ресурсами в межах розподілених обчислювальних рівнів.

Отже, інтеграція IoT-технологій у вітроенергетичні системи є критично важливим кроком на шляху до створення інтелектуальних, стійких і сталих енергетичних інфраструктур. Чітко поєднуючи інформаційні технології з фізичними енергетичними системами за допомогою структурованої чотирирівневої архітектури, дана робота сприяє глибшому розумінню того, як цифровізація може підтримувати ефективну експлуатацію, довгострокову надійність і стратегічну інтеграцію вітроенергетики в сучасні електроенергетичні мережі. Подальші дослідження доцільно зосередити на вдосконаленні міжрівневих методів оптимізації, посиленні механізмів кібербезпеки та розширенні застосування цифрових двійників і систем підтримки прийняття рішень на основі штучного інтелекту з метою подальшого зміцнення ролі вітроенергетики в глобальному енергетичному переході.

Список використаних джерел

1. WWEA Annual Report 2024 A Challenging Year for Windpower, 2025. URL: <https://www.wwindea.org/>
2. Tawab A. A. Wind Turbine Components Part 8: Sensors and Control System | ECAICO. URL: <https://www.ecaico.com/2025/10/%20wind-turbine-part8-sensors-control-system.html>
3. Rückert F. U. *et al.* Fluid flow and heat transfer of a novel passive cooling system for gearless wind turbines with a power range of 3–12 MW. *Energy*. 2024. Vol. 312. DOI: 10.1016/j.energy.2024.133478
4. Benhanifia A., Ben Cheikh Z., Oliveira P. M., Valente A., Lima J. Systematic review of predictive maintenance practices in the manufacturing sector. *Elsevier B.V.* 2025. DOI: 10.1016/j.iswa.2025.200501
5. Emexidis C., Gkonis P. The Integration of Internet of Things and Machine Learning for Energy Prediction of Wind Turbines. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14(22). DOI: 10.3390/app142210276
6. Wang L., Fan W., Jiang G., Xie P. An efficient federated transfer learning framework for collaborative monitoring of wind turbines in IoE-enabled wind farms. *Energy*. 2023. Vol. 284. P. 128518. DOI: 10.1016/J.ENERGY.2023.128518
7. Ullo S. L., Sinha G. R. Advances in Smart Environment Monitoring Systems Using IoT and Sensors. *Sensors*. 2020. Vol. 20(11). P. 3113. DOI: 10.3390/s20113113
8. Akbarzadeh S., Allahverdi A. Machine Learning Approaches for Wind Turbine Predictive Maintenance: An Interoperational SCADA Data Analysis. URL: https://www.researchgate.net/publication/395239093_Machine_Learning_Approaches_for_Wind_Turbine_Predictive_Maintenance_An_Interoperational_SCADA_Data_Analysis
9. Leon-Medina J. X., Tibaduiza D. A., Parés N., Pozo F. Digital twin technology in wind turbine components: A review. *Intelligent Systems with Applications*. 2025. Vol. 26. P. 200535. DOI: 10.1016/J.ISWA.2025.200535

10. Clifton A. *et al.* Grand challenges in the digitalisation of wind energy. *Wind Energy Science*. 2023. Vol. 8(6). P. 947–974. DOI: 10.5194/wes-8-947-2023
11. Abdullahi I., Perinpanayagam S., Hamidu I. A Fog Computing Based Approach Towards Improving Asset Management and Performance of Wind Turbine Plants Using Digital Twins. *27th International Conference on Automation and Computing (ICAC)*, IEEE. 2022. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICAC55051.2022.9911170
12. Ali H. S., Sridevi R. Mobility and Security Aware Real-Time Task Scheduling in Fog-Cloud Computing for IoT Devices: A Fuzzy-Logic Approach. *Comput. J.* 2024. Vol. 67(2). P. 782–805. DOI: 10.1093/comjnl/bxad019
13. Renström N., Bangalore P., Highcock E. System-wide anomaly detection in wind turbines using deep autoencoders. *Renew. Energy*. 2020. Vol. 157. P. 647–659. DOI: 10.1016/j.renene.2020.04.148
14. Jonas S., Meyer A. Fault detection in new wind turbines with limited data by generative transfer learning. *Energy and AI*. 2025. Vol. 22. P. 100626. DOI: 10.1016/j.egyai.2025.100626
15. Azari A., Miao G., Stefanovic C., Popovski P. Latency-Energy Tradeoff based on Channel Scheduling and Repetitions in NB-IoT Systems. *IEEE Global Communications Conference*. IEEE. 2018. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8648024>. DOI: 10.1109/GLOCOM.2018.8648024

Дата першого надходження статті до видання: 20.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 14.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



S. Syrotyuk¹, O. Skliar², V. Ptashnyk¹, V. Klymchuk¹, G. Walowski³

¹ Lviv National Stepan Gzhytsky University of Veterinary Medicine and Biotechnology

² Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

³ Institute of Technology and Life Sciences – National Research Institute

FOUR-LEVEL INTERNET OF THINGS ARCHITECTURE FOR WIND ENERGY SYSTEMS: MONITORING, OPTIMIZATION, AND GRID INTEGRATION

Summary

The article examines the role of the Internet of Things (IoT) in modern wind energy systems and substantiates the feasibility of integrating IoT technologies with wind power generation. A unified four-level architecture for IoT-oriented wind energy systems is proposed, structured according to the increasing complexity of control, decision-making time horizons, and the scale of integration with the physical power system. The first level covers real-time monitoring and control based on sensor data. The second level involves adaptive and predictive control supported by machine learning for failure prediction and condition-based maintenance. The third level focuses on wind-farm-level optimization through digital twins, cloud analytics, and coordinated maintenance planning. The fourth level addresses lifecycle-oriented management, cyber-physical security, grid interaction, and environmental analytics. The article also reviews industrial implementations of IoT in wind energy, including monitoring and diagnostic platforms and AI-based decision support tools. Particular attention is paid to SCADA integration, digital twins, and secure data exchange mechanisms. The main technical, organizational, and economic challenges of large-scale IoT deployment are outlined, including sensor reliability, communication constraints, cybersecurity risks, data quality, and scalability of intelligent analytics. It is concluded that IoT technologies are a key enabler for improving the efficiency, reliability, and long-term sustainability of wind energy infrastructure.

Keywords: IoT, renewable energy, turbine, wind farms, AI, offshore.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-15>

UDC 629.463.001.63

O. V. Fomin¹, Doctor of Technical Sciences

ORCID: 0000-0003-2387-9946

O. V. Burlutskyi², Candidate of Technical Sciences

ORCID: 0000-0003-1902-5809

V. M. Prokhorov³, Candidate of Technical Sciences

ORCID: 0000-0001-8963-6467

I. M. Hannoshyna⁴, Candidate of Technical Sciences

ORCID: 0000-0001-5810-2462

S. M. Shelest, graduate student

ORCID: 0009-0009-4381-4884

¹ National Transport University² National Technical University Kharkiv Polytechnic Institute³ Ukrainian State University of Railway Transport⁴ National Aviation University

e-mail: Oleksij.Burlutskyi@khpi.edu.ua

MATHEMATICAL MODEL FOR A COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE ECONOMIC IMPACT OF OPERATING INNOVATIVE VEHICLES ACROSS THEIR LIFE CYCLE

Summary. The article presents the results of a scientific study aimed at developing a comprehensive methodology for assessing the economic efficiency of operating innovative freight cars on the railway infrastructure of Ukraine. The relevance is due to the critical wear of the freight car fleet and the need to implement tariff mechanisms that consider the interests of both rolling stock owners and the infrastructure owner. Existing approaches focus mainly on operator benefits, ignoring the significant impact of car technical characteristics on infrastructure costs (train traction, track wear).

The proposed methodology is based on a comparative analysis of an innovative car and an analog car. A key feature is the determination of two fundamental coefficients based on field tests: the change in the basic specific resistance to movement (k_w) and the change in the impact on the track (k_t). A mathematical apparatus has been developed to calculate the annual change in infrastructure owner costs, covering expenses on fuel and energy resources, track maintenance, locomotive maintenance, and en-route car maintenance.

The practical value lies in the possibility of using the results to justify differentiated tariffs. The procedure for calculating the specific economic effect (C_{ud}) and the innovative reduction coefficient to the base tariff (k_{tar}^{inv}) is proposed, creating an economic incentive for operators to purchase more advanced rolling stock. The approbation of the methodology on the example of an innovative gondola car demonstrated a net economic effect of about +5,000 UAH per technological cycle due to increased productivity, reduced downtime, and higher speed.

Key words: innovative vehicle, economic efficiency, infrastructure owner, rolling resistance, track impact, cost rates, tariff incentives, computer modeling, life cycle.

Problem statement. Freight rail transportation is one of the main activities of JSC “Ukrzaliznytsia”, it largely meets the transportation needs of the national economy. It is freight transportation that accounts for the largest share of JSC “Ukrzaliznytsia”’s revenues in the overall revenue structure – 82.2 % (2024) [1]. The current stage of development of the transport industry is characterized by the rapid introduction of innovative means of transportation. However, the choice of specific models is often based only on the purchase price, which is a strategic mistake. The relevance of the topic is due to the need to transition to a comprehensive assessment of economic efficiency. The concept of life cycle cost (LCC) becomes a key tool in this process. It allows you to take into account not only the purchase price, but also the costs of operation, service and disposal. For innovative vehicles, this is

critically important due to the specifics of their maintenance. The energy efficiency of new models is often offset by the high cost of spare parts.

Traditional methods of calculating payback no longer correspond to market realities. The risks of introducing innovations without proper analysis are excessively high. It is necessary to take into account the dynamics of energy prices throughout the entire service life of the car. Life cycle cost allows you to see a real picture of profitability. This helps to increase the competitiveness of transport enterprises. Introducing innovations without calculating LCC leads to unforeseen losses. State support for environmental initiatives also requires transparent assessment methods. Investors require clear forecasts of costs for the long term. Innovative technologies often have more complex technical inspection cycles.

Analyses of the latest research and publications. In the article [2], a scientific and methodological approach is proposed to determine the change in the quantitative indicators of the use of gondola cars for the transportation of loaded containers in them in the empty direction due to the decrease in their empty mileage. A scientific and methodological approach is proposed to determine the influence of the coefficient of empty mileage of cars to loaded on the cost of transporting loaded containers in gondola cars in the empty direction. An increase in the efficiency of the use of gondola cars due to the transportation of loaded containers in them in the empty direction is estimated

The article [3] presents the calculated results of the economic justification of the feasibility of modernizing freight cars with axle units of improved design. The factors influencing the amount of additional capital costs for modernizing cars with improved axle units are analyzed. The calculation of annual operating costs for the car is adapted to the conditions of the specific Kharkiv-Kyiv route.

The paper [4] analyzes the current state, development dynamics, and prospects for updating the freight car fleet in Ukraine. The most popular types of cars are identified.

In the work [5], the issues of the conceptual approach to determining the life cycle of a passenger car are considered. The fleet of passenger cars of JSC Ukrzaliznytsia mainly consists of models developed and manufactured in the 70s–90s of the last century at the car-building plants of Germany and Russia. They are outdated both morally and physically. This necessitates the renewal of the fleet of passenger cars by purchasing cars of both domestic and foreign production. But in modern conditions, the user of new equipment is interested not only in the purchase price, but also in the costs after the sale, which is reflected in the life cycle cost.

The article [6] describes the characteristics of iron ore pellets as a specific type of cargo and describes the technology of their production in the conditions of a mining and processing plant. A comparative analysis of the efficiency of using the specified types of freight cars was performed according to such technical and economic indicators (criteria) as tare weight, load capacity, body volume, specific material capacity, specific volume, dimensions, service life, mileage between overhauls, tare loading coefficient, body capacity utilization coefficient, running load, cost, life cycle cost.

In the fundamental work [7] in one of the sections in mathematical modeling of the process of forming reliability indicators of freight cars at the stages of the life cycle is presented.

The monograph [8] considers the issues of optimization design of elements of railway gondola bodies and the organization of their production. It presents modern trends in the development of gondola body structures, presents proposed approaches to their design, and formalizes the features of the organization of their production.

The article [9] considers innovative vehicles as an important solution to reduce road congestion and harmful emissions from trucks. The study found that in Europe, the main barriers to the transition to water transport are insufficient depth of waterways and their inadequate maintenance, while in Asia, the key obstacles are high initial investments in infrastructure and a shortage of vessels. Overcoming these barriers will allow to obtain significant economic effects by reducing logistics costs, reducing fuel and vehicle maintenance costs, as well as reducing environmental damage from CO₂ emissions.

In the article [10], it is analyzed that urban growth and population density lead to a critical deterioration of the transport situation, especially on routes with intensive freight traffic. The proposed coordinated vehicle routing system uses personalized instructions and financial incentives for individual drivers, taking into account their individual preferences using a hierarchical Bayesian model. The implementation of such a system provides an economic effect by reducing congestion, reducing delivery times and fuel costs, which is confirmed by numerous experiments on the Sioux Falls transport network.

In the article [11], approaches to modeling the life cycle cost of vehicles with different types of power plants are investigated. The work is aimed at determining the economic feasibility of using alternative transport technologies compared to traditional solutions. The authors form a mathematical model that takes into account the costs of purchasing, operating, maintaining and disposing of vehicles. Considerable attention is paid to the analysis of factors that most affect the change in the total life cycle cost. The results obtained demonstrate that the application of the LCC concept allows for a more reasonable assessment of the economic efficiency of innovative transport systems.

In [12], the author considers a methodology for estimating the life cycle cost of transport infrastructure, taking into account the spread of autonomous vehicles. The study focuses on predicting changes in the structure of costs for the construction, operation and maintenance of highways. The author proposes a model that integrates future transport scenarios with economic indicators of infrastructure functioning. The analysis demonstrates that the introduction of autonomous transport can significantly change the structure of operating costs. The results obtained can be used to form long-term strategies for the development of transport systems.

In the article [13], researchers conduct a comprehensive review of modern approaches to assessing the sustainability of the transport sector based on the life cycle concept. The authors systematize existing analysis methods, in particular LCC, LCA and other integrated efficiency assessment tools. The paper examines the features of applying these methods for different types of transport systems and infrastructure facilities. The review allows us to identify the key advantages and limitations of using the life cycle concept in transport planning. The results of the study form a methodological basis for further improving the economic justification of innovative transport solutions.

In the publication [14] the authors analyze modern methods of economic evaluation of innovations in the field of railway transport. The work focuses on identifying the main problems of applying traditional economic models to the evaluation of new technical solutions. The authors propose improved approaches that combine life cycle analysis with the assessment of operational and infrastructure costs. Considerable attention is paid to the need to integrate technical and economic indicators in the process of making investment decisions. The study demonstrates the prospects for the application of complex methods for evaluating the effectiveness of innovations in railway transport.

The purpose of the study is a theoretical justification and development of a comprehensive methodology for determining the economic effect of operating innovative vehicles based on modeling the cost of their full life cycle. The research is aimed at creating a toolkit for objectively assessing the effectiveness of investments in the modernization of transport fleets. The implementation of this goal will allow enterprises to make strategically balanced decisions regarding the implementation of the latest technologies.

The object of research is the process of forming economic results from the use of innovative vehicles in the logistics system. The subject of the study is methodological approaches and tools for assessing life cycle cost as a basis for determining the economic effect. The study focuses on the relationships between capital costs and operational efficiency throughout the entire service life of the equipment. Scientific research covers the mechanisms for transforming costs into added value of transport services.

To achieve this goal, the following tasks have been defined:

1. To analyze the factors influencing the technical characteristics of freight cars on the costs of the railway infrastructure owner, in particular, on costs associated with train traction, track maintenance, locomotive maintenance and technical maintenance of wagons en route, in order to identify key parameters for economic evaluation.

2. Develop mathematical models to determine the coefficients of change in the main specific resistance of movement (ρ) and the change in the impact on the track ($k_{\omega}k_{\tau}$) based on data from full-scale (dynamometric) tests of innovative cars and similar cars, which will allow us to quantitatively assess their operational advantages.

3. Form a system of analytical equations to calculate the annual change in the infrastructure owner's costs ($\sum \Delta E_0$) by main items: fuel and energy resources (electricity/diesel fuel), current track maintenance, locomotive maintenance and technical maintenance of freight cars in trains.

4. Determine the procedure for calculating the specific economic effect (ϵ) per car-kilometer C_{y0} and to justify the methodology for calculating the innovative reduction coefficient (k_{map}^{ins}) as a tool for economically stimulating operators to purchase and operate more advanced rolling stock.

To achieve the goal of the study, a set of scientific methods was used, in particular, system analysis for structuring life cycle costs. Mathematical modeling methods were used to construct formulas for calculating the economic effect. Comparative analysis became the basis for assessing the advantages of different types of innovative vehicles. Financial management methods were used, in particular, discounting cash flows to take into account the time factor. Statistical methods allowed processing data on the reliability and cost of operating similar systems abroad. Graphical methods helped visualize the dynamics of costs at different stages of the equipment life cycle.

The main part. The mathematical model of the study is based on a comparative analysis of the operating costs of the infrastructure owner (JSC «Ukrzaliznytsia») when using innovative freight cars and analogue cars. The main hypothesis is that the improved technical characteristics of innovative cars (reduced rolling resistance, less impact on the track, greater load capacity) lead to a reduction in infrastructure maintenance costs, which may be the basis for tariff incentives. The analogue car is selected from among the most common models of the same type and purpose on the network, and the selection criterion is the maximum freight turnover among cars of the corresponding class.

An innovative car is considered as a carrier of a set of measured quantitative and qualitative indicators in absolute or relative terms (Fig. 1).

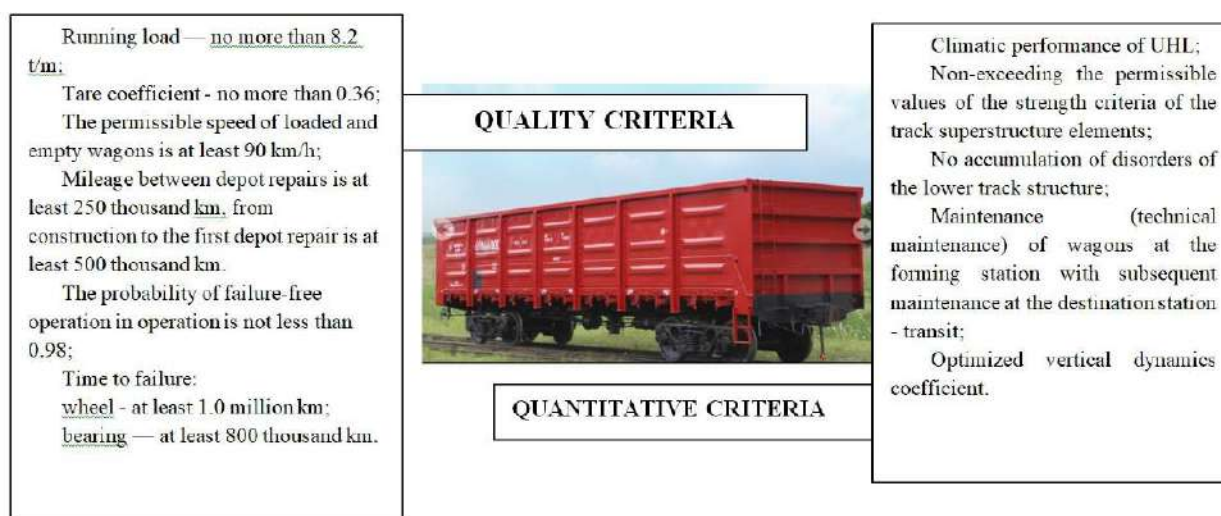


Fig. 1. Criteria for innovative freight cars

The solution to the problem of increasing the productivity of rolling stock through innovative cars lies in the multiplicative effect of reducing the tare weight of cars, increasing the capacity of the body and the speed of the train, expanding the range of permissible axle loads [15]. In addition, the maintenance intervals of both cars as a whole and their individual technological equipment are increasing, failures during operation are reduced, and loading and unloading methods are improved with a corresponding expansion of the range of transported goods:

- the weight of the container is reduced due to the use of new high-strength steels;
- increasing the capacity of the body is achieved through the use of original design schemes with full use of the overall capabilities of the car;
- an increase in permissible axial loads and speeds is ensured by the use of innovative bogies [15];
- operational reliability is based on modern scientific and technical support for the processes of creating and producing railcar structures

The productivity of rolling stock in freight traffic is determined by two generalized indicators: the mass of the train and the mileage of the traction rolling unit.

The tests are carried out by the dynamometric method in accordance with the rules of traction calculations. At the selected intervals of the railway track there should be no sharp changes in the speed of movement and traction force caused by changes in the positions of the driver's controller. The profile of the railway track should be directed along the entire length of the train. The main specific resistance of movement within each interval S is a constant value and is calculated by the formula [16]. w_{tr}

Change in average daily productivity of rolling stock. This is the main formula that shows how productivity changes due to two factors: increasing train mass and increasing daily locomotive mileage.

$$\Delta W_n^{\max} = \frac{W_n^{\max}}{\bar{Q}^6} \Delta Q^{\max} + \frac{W_n^{\max}}{\bar{S}^n} \Delta S^{\max}. \quad (1)$$

Where is the change in the average daily productivity of rolling stock (gross tkm). $\Delta W_n^{\max}$

$W_n^{\max}$ – average daily productivity of rolling stock (gross tkm).

$\bar{Q}^6$ – gross train weight (gross t).

$\Delta Q^{\max}$ – increase in gross train weight (due to the use of innovative wagons).

$\bar{S}^n$ – average daily mileage of the locomotive (km).

$\Delta S^{\max}$ – increase in the average daily mileage of the locomotive.

In expression (1), the components reflect the influence of two factors on the productivity of freight rolling stock. The first component characterizes the target change in the mass of the train, namely the effect of increasing the mass of the train formed from innovative freight cars. The second component is responsible for the target change in the average daily mileage, i.e. the effect of increasing the ton-kilometer work of traction rolling stock [16].

The magnitude of the change in the mass of a train with innovative cars is calculated by the formula:

$$\Delta Q_n^{\max} = \gamma_n^H n_n^{\text{const}} q_n^{\max} \frac{1}{k_n^{\min}} + \gamma_n^H n_n^{\text{const}} q_n^{\min} \frac{1}{k_n^{\max}}; \quad (2)$$

$$k_n^{\text{const}} = \frac{Q_n^{\min}}{Q_n^{\max}}, \quad (3)$$

$\Delta Q_n^{\max}$ – change in train weight with innovative cars.

γ_n^H – the share of innovative cars in the train composition.



n_n^{const} – number of cars in the train (pcs.).

q_n^{max} – useful mass of cargo in the vehicle

q_n^{min} – mass of the tare in the composition (t).

k_n^{min} – the ratio of the net weight of the train to the gross weight.

k_n^{max} – ratio coefficient (probably related to tare).

$Q_n^{\text{min}}, Q_n^{\text{max}}$ – net and gross train weight, respectively (t).

Change in average daily locomotive mileage Shows the dependence of the locomotive's mileage on the station speed and regulatory downtime.

$$\Delta S_n^{\text{max}} = \frac{24}{\frac{1}{V_n^{\text{max}}} + \frac{t_n^{\text{const}}}{L_y}}, \quad (4)$$

ΔS_n^{max} – change in the average daily mileage of the locomotive (km/day).

V_n^{max} – traffic speed (km/h).

t_n^{const} – normative idle time of the locomotive (hours).

L_y – length of the section (km).

24 – number of hours in a day.

The increase in the actual loading rate of innovative cars ensures an increase in the capacity utilization factor and static load of a given unit of rolling stock. The average train composition will be formed taking into account the weight of the tare and the optimal specific load capacity of the innovative car.

Therefore, a comprehensive system of performance indicators for innovative railcars is given by the following system of expressions:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_n^{\text{min}} = \frac{V_n^{\text{const}}}{V_n^H}; \\ k_m^{\text{max}} = \frac{T_n^{\text{const}}}{T_n^H}; \\ p_0 = \frac{P_n^H + T_n^H}{n} \leq p_0^{\text{const}}; \\ q = \frac{P_n^H + T_n^H}{2L} \leq q^{\text{const}} \end{array} \right. \quad (5)$$

k_n^{min} – the ratio of the volume usage of the innovative car and the analogue car.

V_n^{const} – specific volume of the analog wagon (t). m^3/t

V_n^H – specific volume of the innovative car (t). m^3/t

k_m^{max} – coefficient of the ratio of the tare mass of the innovative wagon and the analogue wagon.

T_n^{const} – mass of the tare of the analogue wagon (t).

T_n^H – mass of the innovative wagon's container (t).

p_0 – axle load of the innovative wagon (t/axle).

P_n^H – load capacity of the innovative car (t).

T_n^H – mass of the innovative wagon's container (t).

n – number of axles.

p_0^{const} – permissible axle load (t/axle).

q – gross running load of the innovative wagon (t/m).

$2L$ – length of the wagon along the coupling axes (m).

q^{const} – permissible running load (t/m).

The set of indicators given in expression (5) ensures high-performance transportation of a wide range of goods in specified volumes, which contributes to increasing the efficiency of using the innovative freight car in terms of power and load capacity. This, in turn, gives a total effect in the form of an increase in carrying capacity of 6.7 % and above.

As a result, for a given length of train, innovative cars can form a train of greater weight than similar cars. The main factor affecting the average daily mileage of a locomotive is the section speed. Part of the technical possibilities for its growth are lost due to downtime and delays of trains at stations and crossings, as well as due to loss of time caused by low-performance loading and unloading operations.

The results of the analysis of the downtime of local gondolas at the loading station require special attention (Figure 2). More than half of this time (in hours, about 60 hours or more) is spent on downtime from the moment of arrival to the completion of the cargo operation. This is explained by the poorly established production connection between the arrival of empty cars and the possibility of loading at the consignor, which leads to unproductive downtime of cars. The waiting time for loading increased significantly after the cars were transferred from the inverter fleet to their own. The planning horizon for supplying empty cars actually became equal to the planned time of an empty trip. As a result, there was a transition from a regulated daily shift planning of car distribution (the so-called “just in time” model) to a management model with an unfixed delivery delay time, in which a reserve is required.

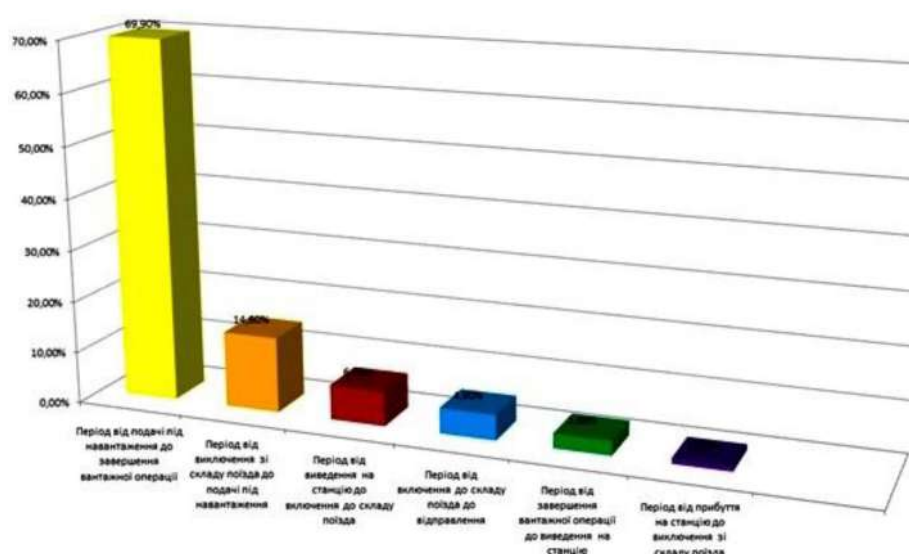


Fig. 2. Distribution of freight car operating time across different stages of the production cycle

The diagram shows that the lion's share of time (69.9 %) is spent by the freight car directly on the loading process (from the moment of submission to the completion of the operation). The second longest stage is the period after exclusion from the train composition until the moment of submission for loading (14.6 %). The operations of arrival at the station and shunting work take the least time.

The car hours of the production cycle of an innovative car are determined according to the elements of working time

$$\sum nt_{\min}^o = \sum nt_{\min}^{IB} + \sum nt_{\min}^{tex} + \sum nt_{\min}^{TP} \quad (6)$$

$\sum nt_{\min}^o$ – total car hours of the production cycle.

$\sum nt_{\min}^{IB}$ – car hours in motion.

$\sum nt_{\min}^{tex}$ – car hours at stations and crossings (technical downtime).

$\sum nt_{\min}^{TP}$ – car-hours of downtime during freight operations.

A comprehensive system of indicators of precinct speed. Shows how the speed of movement changes depending on the technical characteristics and reliability of the cars.

$$\begin{cases} k_{\max}^{AV} = k_{\min}^V \frac{V_T}{V_{\min}} \left(1 - \frac{V_{\min}}{V_{\min}^{TP}} \right), \\ k_{\min}^V = \frac{V_T^{in}}{V_T}, \\ t_{TP}^{in} \leq t_{TP}, \\ p(t)^{in} \rightarrow 0.98 \end{cases} \quad (7)$$

$k_{\max}^{AV}$ – coefficient of change of the site speed.

$k_{\min}^V$ – the coefficient of the precinct speed.

V_T^{in} – technical speed with innovative cars (km/h).

V_T – technical speed (total) (km/h).

$V_{\min}$ – minimum speed (km/h).

$V_{\min}^{TP}$ – speed taking into account idle times (km/h).

t_{TP}^{in} – downtime of the innovative car during freight operations (hours).

t_{TP} – standard downtime of wagons during freight operations (hours).

$p(t)^{in}$ – operational probability of failure-free operation of the innovative car (aims to 0.98).

Infrastructure cost assessment (impact on track superstructure). A comprehensive indicator that assesses how the increase in tonnage from innovative wagons affects track maintenance costs.

$$\begin{cases} k_{\Delta C_n}^{\max} = k_{C_m} \left[\left(\frac{p_0^H}{p_0} \right)^3 \cdot \frac{\lambda_0}{\lambda_0^3} \right], \\ k_{C_m} = \frac{C_m^H}{C_m}, \\ \lambda_0^3 = 0,15\lambda_0 \end{cases} \quad (8)$$

$k_{\Delta C_n}^{\max}$ – coefficient of change in track maintenance costs.

k_{C_m} – coefficient of change in current track maintenance costs.

C_m^H – the cost of current track maintenance during the operation of innovative wagons (CU).

C_m – the cost of current track maintenance when operating similar cars (CU).

p_0^H, p_0 – axle load of the innovative car and the analogue car (t/axle).

λ_0, λ_0^3 – the number of freeze-thaw cycles (transitions) per 100 million gross tkm.

D_n^H, D_n – damage rate (number of failures) when passing tonnage.

Q^{ϕ} – tonnage missed (million gross tons).

The developed approach allows for a mathematical model assessment of the following operational indicators in comparison with a similar wagon: productivity of traction and non-traction rolling stock, average daily mileage and section speeds in terms of various components of the fleet, mass parameters of railway warehouses in terms of gross and net, technical and economic characteristics of wagons. Model calculations of a comprehensive assessment of the operational efficiency of innovative wagons in comparison with a model analogue wagon in freight traffic for one technological.

The final effect of the implementation of one innovative car (for 1 cycle of work) table 1.

Table 1

The final effect of the introduction of one innovative car (for 1 cycle) based on the proposed mathematical model and taking into account the data provided in the studies [3, 7, 17]

Effect component	Amount, UAH
Additional productivity (per day)	+4 278
Downtime savings	+1,080
Effect of increasing speed	+108
Total benefit	+5 466
Additional track costs (per cycle)	-463
Net effect per cycle	+5 003 UAH

Conclusions. The article develops a comprehensive methodology for assessing the economic efficiency of innovative freight wagons, which, unlike existing approaches, takes into account not only the benefits of the operator, but also the impact of the technical characteristics of the wagon on the costs of the infrastructure owner. The considered mathematical model for evaluating the performance indicators of innovative wagons makes it possible to determine the change in these indicators depending on the specific wagon model and to compare them using a single methodology for the same volumes of transportation work within a conditional section (section) of the railway under given model conditions.

The mathematical model is based on a comparative analysis of the pair «innovative car – analogue car» and the determination of two key coefficients based on the results of field tests: changes in the main specific resistance of movement ($k_{\text{ср}}$) and changes in the impact on the track ($k_{\text{т}}$). The developed mathematical apparatus allows calculating the annual change in infrastructure costs for four items: fuel and energy resources, track maintenance, locomotive maintenance and technical maintenance of cars. $k_{\text{ср}}, k_{\text{т}}$

Testing the methodology on the example of an innovative gondola car showed that the innovative car gives a net economic effect of about +5,000 UAH per technological cycle (approximately 1.5 working days) due to:

- increased productivity,
- reduction of downtime,
- increasing speed, with a slight increase in infrastructure costs.

Bibliography

1. Консолідований фінансовий план АТ «Укрзалізниця» на 2024 рік [Електронний ресурс]. URL: <https://www.uz.gov.ua/files/file/about/investors/finzvit/12>
2. Калабухін Ю. Є., Зоріна О. І., Ловська А. О., Каменева Н. М., Рукавішников П. В. Оцінювання підвищення ефективності використання напіввагонів *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті* 2025 Т. 30 № 1 С. 37–46 DOI: 10.18664/ikszt.v30i1.326789
3. Калабухін Ю. Є., Мартинов І. Е., Труфанова А. В., Литовченко О. М. Обґрунтування доцільності модернізації буксових вузлів вантажних вагонів *Інформаційно-керуючі системи на залізничному тран-*

спорті. Серія: Інформаційні технології та інженерія 2025 Т. 6 № 194 С. 399–405 DOI: 10.33042/3083-6727-2025-6-194-399-405

4. Фомін О. В., Стукало А. В. Оцінка ефективності використання вантажних вагонів удосконалених конструкцій з урахуванням мультиплікативного ефекту для економіки України *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології»* 2016 Вип. 35 С. 130–141.

5. Мартинов І. Е., Калабухін Ю. Є., Труфанова А. В. Концепція життєвого циклу пасажирського вагона *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології»* 2021 Вип. 38 С. 153–163 DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-38-150-14>

6. Сулим А. О., Сафронов О. М., Хозя П. О., Стринжа А. Обґрунтування необхідності створення спеціалізованого вагона для перевезення залізничних окатишів *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології»* 2022 Вип. 40 С. 23–34 DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-3>

7. Мурадян Л. А. Розвиток наукових основ забезпечення надійності вантажних вагонів на етапах життєвого циклу дис. ... д-ра техн. наук 05.22.07 Дніпро 2020 377 с. URL: <https://crust.ust.edu.ua/items/e0bcdcaf-b0f5-42dc-bce1-129b564189fc>

8. Фомін О. В. Оптимізаційне проектування елементів кузовів залізничних напіввагонів та організація їх виробництва монографія Донецьк ДонІЗТ УкрДАЗТ 2013 251 с.

9. Beil D., Gupta P., Dopler S., Pani A., Putz-Egger L.-M., Gupta A. Freight modal shift to inland waterways: Evaluating transferability of transport policies between Europe and Asia using Bayesian best-worst method *Case Studies on Transport Policy* 2026 Vol. 24 Article 101777 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2026.101777>

10. Wang Z., Dessouky M., Ioannou P. Incentivized personalized coordinated freight routing considering system optimization with driver-in-loop utility learning *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 2026 P. 1–13 DOI: 10.1109/TITS.2026.3668029

11. Furch J., Konečný V., Krobot Z. Modelling of life cycle cost of conventional and alternative vehicles *Scientific Reports* 2022 Vol. 12 Article 10661 DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14715-8>

12. Liang K. Highway life-cycle cost analysis under the autonomous vehicles scenario *Journal of Highway and Transportation Research and Development* 2024 Vol. 18 No. 4 P. 1–7 DOI: <https://doi.org/10.26599/htrd.2024.9480028>

13. Burchart D., Przytuła I. Sustainability assessment methods for the transport sector considering the life cycle concept – A review *Sustainability* 2024 Vol. 16 No. 18 Article 8148 DOI: <https://doi.org/10.3390/su16188148>

14. Smith A. S. J., Pierce D. E. Methodologies for economic assessment of rail technical innovations: challenges and new perspectives *Transport Transitions: Advancing Sustainable and Inclusive Mobility. TRA Conference 2024. Lecture Notes in Mobility* Cham Springer 2025 DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-95284-5_108

15. Сулим А. О., Сафронов О. М., Хозя П. О., Фомін О. В., Фомін В. В. Сучасні інноваційні бункерні вагони-хопери для перевезення зерна вітчизняного виробництва та перспективи їх розвитку *Наукові вісті Дніпровського університету* 2021 № 21 С. 16–32 DOI: <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2021-21-16>

16. Гетьман Г. К. Теорія електричної тяги монографія у 2 т. Дніпро Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна 2010 Т. 2 361 с. URL: <https://crust.ust.edu.ua/server/api/core/bitstreams/6a4f237f-fe38-44de-9528-6e5fcf36b7ed/content>

17. Довідник основних показників роботи регіональних філій АТ «Укрзалізниця» (2006–2021 рр.) Київ Укрзалізниця 2022 38 с.

Дата першого надходження статті до видання: 19.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 29.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)





О. В. Фомін, О. В. Бурлуцький, В. М. Прохоров, І. М. Ганношина, С. М. Шелест

¹ Національний транспортний університет

² Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

³ Український державний університет залізничного транспорту

⁴ Національний авіаційний університет

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КОМПЛЕКСНОЇ ОЦІНКИ ЕКОНОМІЧНОГО ЕФЕКТУ ВІД ЕКСПЛУАТАЦІЇ ІННОВАЦІЙНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ НА ЕТАПАХ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ

Анотація

У статті представлено результати наукового дослідження, спрямованого на розробку комплексної математичної моделі оцінювання економічної ефективності експлуатації інноваційних вантажних вагонів на залізничній інфраструктурі України. Актуальність роботи зумовлена критичним зносом парку вантажних вагонів та необхідністю впровадження тарифних механізмів, які враховують інтереси як власників рухомого складу, так і власника інфраструктури – АТ «Укрзалізниця». Існуючі підходи зосереджуються переважно на вигодах для оператора, ігноруючи суттєвий вплив технічних характеристик вагона на інфраструктурні витрати (тяга поїздів, зношування колії).

Запропонована методика базується на порівняльному аналізі пари «інноваційний вагон – вагон-аналог». Ключовою особливістю є визначення за результатами натурних випробувань двох фундаментальних коефіцієнтів: зміни основного питомого опору руху (k_{ω}) та зміни впливу на колію (k_t). Розроблено математичний апарат для розрахунку річної зміни витрат власника інфраструктури, який охоплює витрати на паливно-енергетичні ресурси, утримання колії, утримання локомотивів та технічне обслуговування вагонів у дорозі. Модель враховує мультиплікативний ефект впливу технічних характеристик вагонів на продуктивність тягового рухомого складу, швидкість руху, тривалість простоїв та витрати на утримання інфраструктури.

Практична цінність полягає у можливості використання результатів для обґрунтування диференційованих тарифів. Запропоновано порядок розрахунку питомого економічного ефекту (C_{ye}) та інноваційного понижуючого коефіцієнта до базового тарифу (k_{tar}^{inv}), що створює економічний стимул для операторів придбавати більш досконалий рухомий склад. Апробацію математичної моделі виконано на прикладі інноваційного напіввагону, що дозволило кількісно оцінити чистий економічний ефект. Результати моделювання демонструють, що використання інноваційних вагонів забезпечує сукупний мультиплікативний ефект збільшення продуктивності рухомого складу за рахунок підвищення маси поїзда, збільшення середньодобового пробігу локомотива, скорочення простоїв та покращення дільничної швидкості при незначному зростанні витрат на утримання інфраструктури. Розроблена математична модель є універсальним інструментом для оцінювання ефективності інноваційних транспортних засобів на всіх етапах життєвого циклу. Застосування цієї моделі на прикладі інноваційного напіввагона продемонструвало чистий економічний ефект у розмірі близько +5 000 грн на один вагон за технологічний цикл завдяки підвищенню продуктивності, скороченню простоїв та збільшенню швидкості.

Ключові слова: інноваційний транспортний засіб, економічна ефективність, власник інфраструктури, опір руху, вплив на колію, витратні ставки, тарифне стимулювання, комп'ютерне моделювання, життєвий цикл.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-16>

УДК 621.694.2

С. О. Шарапов¹, канд. техн. наукА. Р. Вербицький¹, аспірантС. О. Євтушенко¹, інженерС. О. Хованський¹, канд. техн. наукО. С. Ковязін², канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-8433-8580

ORCID: 0009-0002-7552-0142

ORCID: 0000-0003-4536-4046

ORCID: 0000-0003-2435-7787

ORCID: 0000-0002-3027-872X

¹ Сумський державний університет² Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: verbaanton1994@gmail.com

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СТЕНД ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОЕЛЕКТРОГЕНЕРУЮЧИХ АГРЕГАТІВ НА БАЗІ РІДИННО-ПАРОВИХ СТРУМИННИХ АПАРАТІВ

Анотація. У статті описано мету та завдання експериментальних досліджень теплоелектрогенеруючих агрегатів на базі рідинно-парових струминних апаратів. Для визначення завдань експериментальних досліджень було проведено критичний аналіз сучасного стану досліджень схемних рішень когенераційних систем для генерації теплової та електричної енергії, серед яких установки на базі міні-ТЕЦ та на базі теплових насосів. Отже, необхідно провести експериментальні дослідження запропонованого авторами теплоелектрогенеруючого агрегату на базі рідинно-парового струминного апарату, які б підтвердили проведені числові розрахунки та визначили режимні параметри, за яких його ефективність буде максимальною. У статті наведено схему та опис експериментальної установки для досліджень теплоелектрогенеруючих агрегатів на базі рідинно-парових струминних апаратів. Програма та методика містять діапазон зміни режимних та геометричних параметрів при проведенні експериментальних досліджень. Запропоновано схему підключення блоку конденсаторів до електрогенератора та наведено опис запропонованих контрольно-вимірювальних приладів в характерних точках циклах.

Ключові слова: рідинно-паровий струминний апарат, виробництво тепла та електроенергії, експериментальні дослідження, геометричні параметри, ефективність, доступна та чиста енергія, сталий розвиток міст та громад.

Постановка проблеми. Створення високоефективних теплоелектрогенеруючих агрегатів (ТЕГА) є пріоритетним напрямом розвитку української енергетики в даний час [1]. Існуючі схемні рішення мають ряд суттєвих недоліків, що стримують їх впровадження в системи тепло- та електрозабезпечення як промислових, так і комунальних споживачів [2].

Одним зі шляхів вирішення проблеми створення високоефективних когенераційних установок є створення теплоелектрогенеруючих агрегатів на базі рідинно-парових струминних апаратів (РПСА). Особливістю його робочого процесу є те, що генерація робочої пари відбувається в середині сопла активного потоку, що дає змогу регулювати режимні параметри всього циклу агрегату на його базі та досягати необхідних термодинамічних та витратних параметрів мережевої води, яка циркулює по системі опалення та гарячого водопостачання. Підтримування ступеня перевиробництва пари в змішаному потоці на виході з РПСА дає змогу впливати на кількість електроенергії, що буде вироблятися в ТЕГА [3].

Саме ці параметри впливають на ефективність робочого процесу РПСА та потребують детального числового розрахунку з подальшим експериментальним дослідженням, що визначає доцільність застосування ТЕГА в системах тепло- та електрогенерації.



Аналіз останніх досліджень. Перші спроби створення перших децентралізованих систем, які б забезпечували споживачів тепловою та електричною енергією відомі ще з 50-х років ХХ ст. Однак вони в своєму складі мали низькоефективність турбінні агрегати, що гальмувало їх розвиток та впровадження [4, 5].

Істотним кроком на шляху підвищення ефективності когенераційних установок у вигляді міні-ТЕЦ стало впровадження пароструминних агрегатів. Автори робіт [6–8] досліджують схемні рішення міні-ТЕЦ на базі таких агрегатів та наводять результати числових та експериментальних досліджень їх ефективності. Поруч з такими їх перевагами як відсутність рухомих вузлів, ущільнюючих елементів та клапанних систем, які є основними недоліками газо- та паротурбінних установок, вони все ж не є високоефективними. Це пов'язано з особливостями їх робочого процесу [9, 10].

Поява теплонасосних систем дала змогу по-новому поглянути на питання теплозабезпечення окремих споживачів теплом та гарячим водопостачанням [11]. В роботах [12–14] описані схеми теплонасосних систем в залежності від потреб споживачів. Так, досить актуальним є питання регулювання температури мережевої води в подаючому та зворотному трубопроводах, що є запорукою створення комфортних умов в приміщенні, в якому знаходиться споживач.

В роботах [15, 16] наведено результати числових розрахунків теплонасосних систем провідних світових фірм та діапазони їх робочих параметрів, за яких ефективність таких систем буде найвища.

Однак, в результаті проведеного вище аналізу можна зробити висновки, що в цих роботах не врахована ефективність основного устаткування, що входить до складу як міні-ТЕЦ, так і теплонасосних установок. Наприклад, автори цих робіт лише оцінювали температурні та режимні параметри в опалюваних приміщеннях.

Автори даної статті пропонують замінити неефективні пароструминні насоси, що входять до складу міні-ТЕЦ та компресори теплонасосних систем на РПСА [17, 18]. Це дасть змогу підвищити ефективність самого циклу перетворення енергії, яка буде використовуватися для підігрівання води для систем опалення та гарячого водопостачання, а також регулювати кількість пари, яка буде надходити в турбогенераторний блок для вироблення електроенергії. Для реалізації такого підходу розроблено схемне рішення комбінованого ТЕГА, що базується на міні-ТЕЦ, запропонованої в роботах [19, 20].

Для оцінювання доцільності впровадження ТЕГА на базі РПСА автори даної статті вважають за доцільне створити експериментальний стенд для проведення досліджень такого агрегату, що дозволить визначити діапазон робочих параметрів, в якому ефективність ТЕГА буде максимальною.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою даного дослідження є визначення оптимальних режимних параметрів контурів генерації тепла та електроенергії для забезпечення максимальної ефективності агрегату.

Об'єктом дослідження є термодинамічні та режимні параметри робочого струменя в циклі ТЕГА.

Предметом дослідження є показники ефективності системи тепло- та електропостачання на базі ТЕГА.

Для досягнення поставленої мети, були сформульовані та потребують вирішення наступні завдання:

1. Створення експериментального стенду ТЕГА на базі рідинно-парового струминного апарату.
2. Експериментальне дослідження термодинамічних та режимних параметрів в контурі теплопостачання ТЕГА на базі рідинно-парового струминного апарату.

3. Експериментальне дослідження термодинамічних та режимних параметрів в контурі електрогенерації ТЕГА.

4. Аналіз факторів, які впливають на показники ефективності роботи ТЕГА на базі рідинно-парового струминного апарату з подальшою кореляцією математичної моделі.

5. Перевірка достовірності отриманих результатів шляхом порівняння результатів розрахунків та експериментальних досліджень.

Основна частина. В Сумському державному університеті був створений експериментальний стенд для дослідження теплоелектрогенеруючого агрегату на базі рідинно-парового струминного апарату та парової турбіни з можливістю зміни геометрії проточної частини шляхом заміни сопел і камер змішування різної геометричної форми профілю. Даний стенд є удосконаленим варіантом установки, створеної авторами та описаної в роботі [21]. Стенд складається безпосередньо з самого РПСА 1, парової турбіни 2, теплообмінника 3, сепаратора 28, нагрівальної ємності 4, у якій нагрівається робоча рідина у вигляді проточної води, системи трубопроводів, запірної арматури та системи фіксації робочих параметрів у вигляді датчиків, терморегуляторів, манометрів та вакуумметрів (рис. 1). Фотографія експериментального стенду подана на рис. 2.

Спочатку робоча рідина нагрівається до необхідного тиску та температури за допомогою системи електричних водяних ТЕНів 15 у нагрівальній ємності 4. Параметри даного процесу контролюються та регулюються за допомогою терморегулятора з датчиками температури на базі термопари 12 та манометра для вимірювання тиску 10. На випадок виникнення позаштатної роботи терморегулятора та підвищення критичної температури та тиску був встановлений запобіжний клапан для аварійного скидання робочої рідини 5.

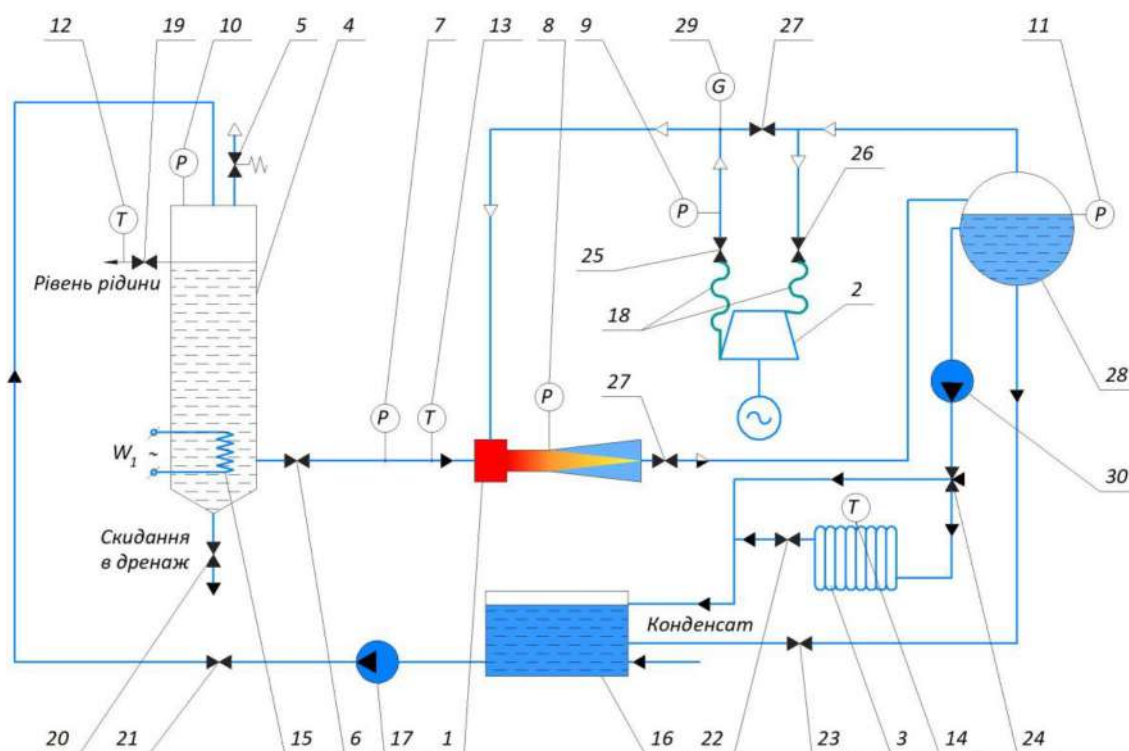


Рис. 1. Принципова схема експериментального стенду теплоелектрогенеруючого агрегату:

1 – РПСА; 2 – турбогенератор; 3 – радіаторний теплообмінник; 4 – нагрівальна ємність; 5 – запобіжний клапан; 6 – регулювальний вентиль; 7, 8, 9, 10, 11 – манометри та вакуумметри; 12, 13, 14 – датчики температури; 15 – блок ТЕНів; 16 – ємність для води; 17 – насос подачі мережевої води; 18 – гнучкі термостійкі рукава; 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27 – регулюючі вентилі; 28 – сепаратор; 29 – лічильник витрати води та пари, 30 – циркуляційний насос



Рис. 2. Фотографія експериментального стенду теплоелектрогенеруючого агрегату на базі рідинно-парового струминного апарату

Потім робоча рідина через трубопровід під тиском подається з нагрівальної ємності 4 до входу в сопло активного потоку РПСА 1. В надзвуковій частині сопла активного потоку відбувається процес закипання недогрітої до насичення рідини, в результаті чого створюється сила, що ежектує пасивний потік. В камері змішування РПСА відбувається змішування активного і пасивного потоків в єдиний двофазний потік заданої парокрапельної структури з певним значенням ступеня перевиробництва пари. Він виходить з дифузору РПСА і потрапляє до сепаратора 28, де розділяється на парову та рідку фази.

Турбогенератор 2 монтується між виходом з парової лінії сепаратора 28 та входом пасивного потоку в РПСА, в результаті парова фаза розширюється в турбіні до параметрів, що відповідають її стану на вході в приймальну камеру РПСА. Підключення парової турбіни до лінії парової фази здійснюється за допомогою гнучких термостійких рукавів 18 через вентилі 25 і 26. В свою чергу, при роботі стенду в режимі генерації електроенергії необхідно перекрити вентиль 27, задля уникнення «байпасної лінії», яка проходить в обхід турбогенератора.

Значення витрати робочої пари через турбіну вимірюються за допомогою лічильника об'ємної витрати 29, а показники сили струму, напруги та потужності, яка створюється в турбогенераторі вимірюються за допомогою енергометра.

Надлишок парової фази може виводитися з сепаратора у навколишнє середовище. В свою чергу, рідка фаза з сепаратора спрямовується до побутового теплообміннику 3 та циркулює в ньому як теплоносіє в системі теплопостачання, значення температури якого вимірюються за допомогою датчика температури 14.

Сопла активного потоку та камери змішування різної геометричної форми впливають на параметри пасивного потоку та змішаного потоків, що в свою чергу зумовлює зміну частоти обертів ротора турбогенератора, значення температури рідкої фази в побутовому теплообміннику та енергоефективність всього теплоелектрогенеруючого агрегату. Саме тому в даному стенді передбачено можливість додаткового регулювання робочих параметрів РПСА шляхом зміни геометричної форми проточної частини [22].

Турбогенератор для даного теплоелектрогенеруючого агрегату складається з парової турбіни, трифазного асинхронного електродвигуна, конденсаторного блоку, блоку електровимірювальних пристроїв та «споживача» (рис. 3). Схема підключення турбогенератора наведена на рис. 4.



Рис. 3. Фото турбогенератора з глушником

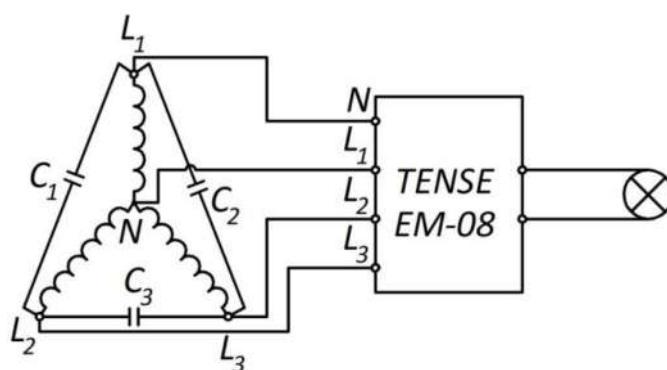


Рис. 4. Електрична схема підключення блоку конденсаторів до генератора, мультиенергометра та «споживача» (лампи)

Парова фаза з сепаратора 28, потрапляючи на лопатки колеса парової турбіни, яке, в свою чергу, з'єднане з валом ротору асинхронного електродвигуна, обертає його. В цьому вузлі відбувається перетворення механічної енергії в електрорушійну силу за рахунок збудження магнітного поля реактивною потужністю. Це забезпечується блоком з трьох конденсаторів, які з'єднані між собою у схему «зіркою» або «трикутником». Створення реактивної складової електричного струму за допомогою даного блоку забезпечує індуктивність обмоток двигуна, що надає змогу самостійного підтримування збудження магнітного поля. Дана схема дозволяє

забезпечувати симетрію фаз з мінімальним прекосом напруги. Водночас робота даної схеми конденсаторного блоку має обмеження у частоті обертання ротору, оскільки на генерацію електроенергії також впливає величина ємності конденсаторів та магнітна характеристика матеріалу ротору.

Для моніторингу значень температури з датчиків на базі термопари під час проведення експерименту використовується терморегулятор REX-C100 FK04 (рис. 5).



Рис. 5. Терморегулятор REX-C100FK04

Це надійний та сучасний прилад для керування температурою, укомплектований заводським фірмовим PID-монітором температури та твердотільним реле SSR-40 DA-H. Температурний діапазон даного приладу від 0 до 400 °C, а відносна похибка вимірювання складає всього 0,5 % [23].

Для вимірювання температури при проведенні експериментальних досліджень використовуються високоточні датчики на базі термопари. Термопара діє за принципом впливу температури на провідник, через що його опір і напруга змінюється. За допомогою іншого додаткового гнучкого проводу, який підключається до гарячого кінця термодатчика, вимірюється напруга.

Даний гнучкий провід надає власну напругу, що відрізняється від поточної. Ці два дроти виготовлені з двох різних матеріалів і завдяки цьому вони генерують різну напругу. Виготовлений даний датчик з хром-алюмінію, має температурний діапазон від 0 до 400 °C, з внутрішньою ізоляцією скловолокном, зовнішнім екрануванням, вишкою 3.5 мм, та монтажним гвинтом з різьбою M6 (рис. 6).



Рис. 6. Датчик температури на базі термопари

Для вимірювання витрати потоку робочого середовища в даному експериментальному використовується ультразвуковий лічильник води для закритих систем SHARKY 775 (рис. 7). Даний витратомір є ультразвуковим. Сам лічильник обладнаний архівом зберігання даних.



Рис. 7. Ультразвуковий лічильник води для закритих систем SHARKY 775

Технічні характеристики ультразвукового лічильника води для закритих систем SHARKY 775 наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Технічні характеристики ультразвукового лічильника води для закритих систем SHARKY 775a [24]

Номінальна витрата	м³/год	1,5	2,5	6	10
Номінальний діаметр	мм	20	20	32	40
Монтажна довжина	мм	130	190	260	300
Поріг чутливості	л/год	2,5	4	7	20
Мінімальна витрата	л/год	6	10	24	40³/100
Максимальна витрата	м³/год	3	5	12	20
Робочий тиск	бар	16	16	16	16
Витрата тиску	мбар	75	100	128	95
Діапазон температури	°C	5–105	5–105	5–105	5–105

Для вимірювання значень сили струму, напруги, частоти, потужності по кожній фазі генеруючого струму в турбогенераторі використовується цифровий мультиметр TENSE EM-08 (рис. 8).



Рис. 8. Електронний мультиенергометр TENSE EM-08



Даний енергометр має світлодіодний дисплей для показників всіх необхідних нам параметрів, та підтримує схеми трифазної мережі з або без нейтралі. Також надає нам можливість вимірювання реактивної потужності, індуктивної та ємнісної за фазами або в сумі, повної потужності по фазах та сумарно, коефіцієнт потужності та $\cos \varphi$ по кожній фазі та в сумі. Також має можливість вимірювання фазної та лінійної напруги між фазами або між фазою та нейтраллю, відображаючи при цьому мінімум, максимум та середні значення. Також струм по кожній фазі та в сумі, активну енергію споживання і експорт, реактивну енергію (як індуктивну, так і ємнісну) та частоту мережі з перекосом фаз.

Технічні характеристики мультиенергометра TENSE EM-08 [25]

- Робоча напруга: 85–260;
- Частота мережі: 50 / 60 Гц;
- Потужність: Менше 10 ВА;
- Робоча температура: від $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- Діапазон вимірювання фазної напруги (L–N): 5 – 300V AC RMS;
- Діапазон вимірювання лінійної напруги (L–L): 10 – 520V AC RMS;
- Діапазон вимірювання струму: від 10 мА до 5.5 А;
- Діапазон вимірювання частоти: 45–65 Гц;
- Похибка вимірювання напруги та струму: $\pm 0.5\%$;
- Похибка вимірювання активної потужності: $\pm 1\%$;
- Похибка вимірювання реактивної потужності: $\pm 2\%$;
- Похибка вимірювання частоти: $\pm 0.2\%$;
- Похибка вимірювання активної енергії: $\pm 1\%$;
- Підтримувані типи підключення: 3P3W, 3P4;
- Коефіцієнт трансформації струму: від 1 до 1200.

Для вимірювання тиску при проведенні експериментальних досліджень використовуються високоточні зразкові манометри та вакуумметри ДСТУ 7224:2011.

Значення температури робочої рідини активного потоку на вході в РПСА вимірюються за допомогою термодатчика, який знаходиться безпосередньо у рухомому потоці. Показники абсолютного тиску робочої рідини у витратному перерізі сопла активного потоку вимірюються датчиком тиску. Температура робочої рідини пасивного потоку визначається аналогічно температурі робочої рідини активного потоку на вході в РПСА.

Оброблення результатів експерименту здійснювалося за наступними формулами.

Абсолютний тиск робочої рідини активного потоку на вході до РПСА, Па:

$$p_{01} = p_{атм} + 9,861 \cdot 10^4 \cdot p_{ман01}, \quad (1)$$

де $p_{атм}$ – барометричний тиск, Па,

$p_{ман01}$ – показання манометра, розміщеного на вході до апарату,

$$p_{атм} = 133,32 \cdot B, \quad (2)$$

де B – показання датчику атмосферного тиску, мм рт. ст.

Масова витрата робочої рідини, що проходить через сопло активного потоку, кг/с:

$$\dot{m}_a = \frac{w_f \cdot F_f}{v'_0}. \quad (3)$$

Середня швидкість робочої рідини активного потоку у витратному перерізі сопла, м/с:

$$w_f = \mu_0 \cdot v_f \cdot \sqrt{2 \cdot (P_0 - P_{s0}) \cdot v'_0 \cdot 10^5}, \quad (4)$$



де μ_0 – коефіцієнт витрати вихідної ділянки сопла активного потоку,
 ν_f – показник метастабільності витрати,
 P_{s0} – тиск робочої рідини на вході в сопло активного потоку в стані насиченої рідини, Па,
 ν'_0 – питомий об'єм робочої рідини на вході в сопло активного потоку в стані насиченої рідини, м³/кг.

Площа сопла активного потоку у витратному перерізі, м²:

$$F_f = 0,7854 \cdot d_f^2 \cdot 10^{-6}, \quad (5)$$

де d_f – діаметр сопла у витратному перерізі, мм.

Абсолютний тиск робочої рідини пасивного потоку в приймальній камері, Па:

$$p_{02} = p_{атм} - p_{вак02}, \quad (6)$$

де $p_{вак02}$ – показники датчика, розташованого на вході до приймальної камери РПСА, Па.

Масова витрата робочої рідини пасивного потоку, кг/с:

$$\dot{m}_{02} = \frac{\dot{V}_{02}}{\rho_{02}}, \quad (7)$$

де $\dot{V}_{02}$ – об'ємна витрата робочої рідини пасивного потоку,

ρ_{02} – густина робочої рідини пасивного потоку,

Густина робочої рідини пасивного потоку,

$$\rho_{02} = \frac{p_{02}}{R \cdot T_{02}}, \quad (8)$$

де R – газова стала речовини пасивного потоку,

T_{02} – температура пасивного потоку на вході до приймальної камери.

Тиск змішаного потоку на виході з камери змішування, Па:

$$p_{03} = p_{атм} - p_{вак03}, \quad (9)$$

де $p_{вак03}$ – показники датчика розміщеного у перерізі на виході з камери змішування РПСА.

Тиск змішаного потоку на виході з РПСА, Па:

$$p_4 = p_{атм} + 9,861 \cdot 10^4 \cdot p_{ман4}, \quad (10)$$

де $p_{ман4}$ – показники датчика, розміщеного на виході з РПСА.

Ступінь підвищення тиску пасивного потоку

$$\pi_n = \frac{p_4}{p_{02}}. \quad (11)$$

Коефіцієнт інжекції

$$u = \frac{\dot{m}_{02}}{\dot{m}_a}, \quad (12)$$

де $\dot{m}_a$ – масова витрата активного потоку.

Потужність турбіни, кВт:

$$N_T = \dot{m}_{02} \cdot (h'_4 - h_{02}), \quad (13)$$

де h'_4 – ентальпія парової фази на виході з сепаратора, Дж/кг,

h_{02} – ентальпія пари на виході з турбіни, Дж/кг.

Ексергетична ефективність РПСА

$$\varepsilon_{ex\text{ РПСА}} = u \cdot \frac{\psi_4 \cdot [(h_4'' - h_{02}) - T_{o.c.} \cdot (s_4'' - s_{02})]}{\tilde{c}_{pid} \cdot \left[(T_{01} - T_4') - T_{o.c.} \cdot \ln \frac{T_{01}}{T_4'} \right] + \frac{p_{01} - p_4'}{\rho_{pid}}}, \quad (14)$$

де ψ_4 – ступінь перевиробництва пари,

$T_{o.c.}$ – температура оточуючого середовища, К,

s_4'' – ентропія парової фази на виході з сепаратора, Дж/(кг · К),

s_{02} – ентропія пари на виході з турбіни, Дж/(кг · К),

c_{pid} – питома теплоємність за середньої температури рідкої фази, Дж/(кг · К)

T_{01} – температура робочої рідини активного потоку на вході до РПСА, К,

T_4' – температура рідкої фази на виході з сепаратора, К,

p_{01} – тиск робочої рідини активного потоку на вході до РПСА, Па,

p_4' – тиск рідкої фази на виході з сепаратора, Па,

ρ_{pid} – густина рідкої фази за середнього тиску p_{01} і p_4' .

Ексергетична ефективність теплоелектрогенеруючого агрегату на базі РПСА:

$$\varepsilon_{ex\text{ ТЕГА}} = \frac{\dot{m}_n \cdot [(h_4'' - h_{02}) - T_{o.c.} \cdot (s_4'' - s_{02})] + N_T}{G_T \cdot \left[c_T \cdot \left\{ (T_{1T} - T_{2T}) - T_{o.c.} \cdot \ln \frac{T_{1T}}{T_{2T}} \right\} + \frac{p_{1T} - p_{2T}}{\rho_T} \right] + N_H}, \quad (15)$$

де c_T – питома теплоємність за середньої температури теплоносія, Дж/(кг · К)

T_{1T} – температура теплоносія на вході до теплообмінника, К,

T_{2T} – температура теплоносія на виході з теплообмінника, К.

Для оцінювання достовірності даних, отриманих в результаті прямих вимірювань, необхідно враховувати значення похибок величин вимірювання температури та тиску робочої рідини активного та пасивного потоків на вході і на виході з РПСА та об'ємної витрати робочої рідини, яка подається до приймальної камери РПСА. Величини, що є результатом непрямих вимірювань визначаються з функціональних залежностей, які враховують результати прямих вимірювань включно з їх похибками, а для виключення випадкових похибок буде виконуватись не одне, а серія вимірювань.

Висновки. В результаті експериментальних досліджень теплоелектрогенеруючого агрегату на базі рідинно-парового струминного апарату можна отримати результати, які дозволяють визначити оптимальні режими роботи цього агрегату, за яких його ефективність буде максимальною. В результаті експериментальних досліджень буде одержано термодинамічні параметри в контурах тепло- та електрогенерації, що дасть можливість вибирати оптимальні параметри турбогенератора та елементів системи тепло- та гарячого водопостачання. Також експериментальні дослідження дозволять порівняти результати теоретичних розрахунків та, за необхідності, провести кореляцію математичної моделі. Похибка прямих та непрямих вимірювань не перевищує 5 % при довірчій ймовірності 0,95, що є допустимим для технічних експериментів.

Список використаних джерел

1. Aghaei A. T., Saray R. K. Optimization of a combined cooling, heating, and power (CCHP) system with a gas turbine prime mover: A case study in the dairy industry. *Energy*. 2021. Vol. 229. P. 120788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120788>
2. Костенко, Г., Згуровець, О. (2023). Сучасний стан та перспективи розвитку відновлюваної розподіленої генерації в Україні. Системні дослідження в енергетиці, 2(73), 4–17. DOI: <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.02.004>

3. Systems, Decision and Control in Energy I / ed. by V. Babak, V. Isaienko, A. Zaporozhets. Cham : Springer International Publishing, 2020. URL: DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2>
4. Bobrov, Y. (2021). The trends of Ukraine energy strategy development in the context of energy security. *Economics, Finance and Management Review*, 3(7), 21–32. DOI: <https://doi.org/10.36690/2674-5208-2021-3-21>
5. Бобров Є. Економічні виклики розвитку розподіленої генерації в Україні в умовах енергетичної трансформації у 2025 році / Є. Бобров. *Вчені записки Університету «КРОК»*. 2025. № 2(78). С. 23–34. DOI: <https://doi.org/10.31732/2663-2209-2025-78-23-34>
6. Сохацька О. М. Розподілена генерація як шлях до створення конкурентного біржового ринку електроенергії: завдання для повоєнної відбудови України. *Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference. Varna, Bulgaria*. 2022. Pp. URL: <https://isg-konf.com/implementation-of-modern-technologies-in-science/>
7. Теліженко О., Шашков С. Напрямки діяльності з агрегації в електроенергетиці на основі розвитку розподіленої генерації. *Вісник Херсонського національного технічного університету*, 4(87), 2023. 299–304. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.4.36>
8. Kostenko G., Zgurovets O. Current State and Prospects for Development of Renewable Distributed Generation in Ukraine. *System Research in Energy*, (2 (73)), 2023. 4–17. DOI: <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.02.004>
9. Yang X, Li Y, Luo Z, Chan PW (2017) The urban cool island phenomenon in a high-rise high-density city and its mechanisms. *Int J Climatol* 37(2), 890–904. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.4747>
10. Steam system optimization of an industrial heat and power plant / R. Filkoski et al. *Thermal Science*. 2020. Vol. 24, no. 6 Part A. P. 3649–3662. DOI: <https://doi.org/10.2298/tsci200403284f>
11. Horskyi V., Maliarenko O. Use of Improved Methodology to Determine the Total Power Efficiency of Energy Products in Their Co-production at Combined Heat and Power Plant. *Systems, Decision and Control in Energy IV*. Cham, 2023. P. 291–307. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5_17
12. Aidoun Z., Ameer K., Falsafioon M., Badache M. Current Advances in Ejector Modeling, Experimentation and Applications for Refrigeration and Heat Pumps. Part 1: Single-Phase Ejectors. *Inventions*, Vol. 4 (1), 2019. 15. DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions4010015>
13. Nikbakht Naserabad S., Mehrpanahi A., Ahmadi G. Multi-objective optimization of feed-water heater arrangement options in a steam power plant repowering. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 220. P. 253–270. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.125>
14. Wang Y., Morosuk T., Yang S., Cao W. A high-efficiency multi-function system based on thermal desalination and absorption cycle for water, water-cooling or water-heating production. *Energy Conversion and Management*, Vol. 284, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116962>
15. Tashtoush B. M.; Al-Nimr M. A.; Khasawneh M. A. A comprehensive review of ejector design, performance, and applications. *Applied Energy*, Vol. 240, 2019. pp. 138–172. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.185>
16. Tashtoush B., Nayfeh Y. Energy and economic analysis of a variable-geometry ejector in solar cooling systems for residential buildings. *Journal of Energy Storage*, Vol. 27, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101061>
17. Марченко В. Н. Струйная термокомпрессорная установка (СТК): назначение, принцип действия, термодинамическая модель и результаты расчетных исследований параметров рабочего процесса / В. Н. Марченко, Н. А. Жиленко. *Вісник Сумського державного університету*. Серія «Технічні науки». 2004. № 13 (72). С. 50–60.
18. Марченко В. Н. Энергетическая эффективность парового струйного термокомпрессора / В. Н. Марченко, М. Г. Прокопов. *Холодильна техніка і технологія*. 2007. № 5 (109). С. 45–51.
19. Principle of stream thermocompression: conception of energetic efficiency and prospect of realization in small heat energetic / V. N. Marchenko, V. A. Osipov, M. G. Prokopov, S. O. Sharapov. «MOTROL. Motoryzacja i energetyka rolnictwa». Simferopol – Lublin, 2009. Vol. 11 A. P. 70–76.
20. Прокопов М. Г., Шарапов С. О., Мерзляков Ю. С., Гусев Д. М. Концепція енергоефективності й перспективи реалізації принципу струминної термокомпресії в малій теплоенергетиці. *Енергетика і автоматика*. 2021. 2. С. 39–51. DOI: <https://doi.org/10.31548/energiya2021.02.039>
21. Шарапов С. О., Євтушенко С. О., Хованський С. О. Експериментальний стенд для дослідження процесів змішування в рідинно-парових струминних апаратах. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*, 24(2), 2024. 37–50. DOI: <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2024-24-2-4>



22. Sharapov, S., Husiev, D., Verbytskiy, A., Vaskin, R., Kozii, I., Plyatsuk, L., Vaskina, I., Hopkalo, D., & Denysenko, Y. (2025). Influence of Motive Nozzle Supersonic Part Profiling on the Effectiveness of the Vaporization Process: Experimental Results. *Thermo*, 5(4), 44. DOI: <https://doi.org/10.3390/thermo5040044>
23. Реле температури REX-C100FK04-M*AN URL: <https://www.mpja.com/download/rex-c100.pdf>
24. Теплолічильник SHARKY 775. Паспорт. Керівництво з експлуатації URL: https://lichilnik.com.ua/index.php?route=product/product/download&product_id=590&download_id=19
25. Багатофункціональний вимірювач мережі TENSE EM-08 URL: https://eshop.venio.sk/user/related_files/manual_en_em-08.pdf

Дата першого надходження статті до видання: 25.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



S. Sharapov¹, A. Verbytskiy¹, S. Yevtushenko¹, S. Khovanskyi¹, O. Koviazin²

¹ **Sumy State University**

² **Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University**

EXPERIMENTAL STAND FOR RESEARCHING HEAT-&-ELECTRICITY GENERATING AGGREGATES BASED ON LIQUID-VAPOR JET DEVICES

Summary

This article describes the objectives and tasks of experimental studies of combined heat and power generation units based on liquid-vapor jet devices. To define the objectives of the experimental studies, a critical analysis was conducted of the current state of research on design solutions for cogeneration systems for the generation of thermal and electrical energy, including installations based on mini-CHP plants and heat pumps. Based on a review of the literature, it can be concluded that the modern energy sector has not developed highly efficient thermal and electrical power generation units with a capacity of up to 0.5 MW that could meet the needs of individual consumers. The literature review also revealed that there is currently no design solution capable of meeting the thermal and electrical energy needs of individual consumers. The authors propose a design solution for a combined heat and power unit based on a liquid-vapor jet device, which combines all the advantages of a mini-CHP plant and a heat pump system. The theoretical studies conducted by the authors allow us to conclude that the use of such units in distributed generation systems is feasible. Therefore, it is necessary to conduct experimental studies of the heat and power generation unit proposed by the authors, based on a liquid-vapor jet device, which would confirm the numerical calculations and determine the operating parameters under which its efficiency will be maximized. The article presents a diagram and description of an experimental setup for studying thermoelectric power generation units based on liquid-vapor jet devices. The program and methodology include a range of operating and geometric parameters for conducting experimental research. A connection diagram for the capacitor bank to the electric generator is proposed, and a description of the proposed control and measuring instruments at characteristic points in the cycles is provided. The methodology for processing the results of experimental studies of a heat and power generation unit based on a liquid-vapor jet device is also described, including the determination of the main errors in direct and indirect measurements.

Keywords: liquid-vapor jet device, heat-&-electricity generating, experimental research, geometric parameters, efficiency, affordable and clean energy, sustainable cities and communities.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-17>

УДК 631.354.2

О. О. Шокарев, ст. викладач

ORCID: 0009-0008-5675-0376

І. В. Колокольчикова, доцент, професор

ORCID: 0000-0002-5692-0901

М. М. Данченко, канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0001-7555-6511

О. М. Шокарев, канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0001-8646-4524

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: alexandr.shokarev@gmail.com

КРИТЕРІЙ ЕФЕКТИВНОСТІ ОБЧИСУВАЛЬНО-РІЗАЛЬНОГО МОДУЛЯ ЗЕРНОЗБИРАЛЬНОГО КОМБАЙНУ

Анотація. Визначений загальний критерій ефективності технологічного процесу збирання зернових культур методом обчисування рослин на корені. Процес збирання здійснюється обчисувальним модулем, який складається з обчисувального та різального пристроїв. Технологічний процес збирання складається з обчисування на корені і збирання зерна, а також зрізання та укладки в валок незернової частини. Встановлені цілі та критерії ефективного проведення збирання врожаю (зернової та незернової частини). Встановлені шляхи підвищення ефективності технологічного процесу збирання врожаю при обчисуванні зернових культур на корені.

Наведені фактори, які впливають на надійність обчисувально-різального модуля зернозбирального комбайну.

Критерій ефективності та фактори дають підставу визначити об'єктом подальших досліджень технологічний процес обчисування культур на корені та зрізання, транспортування та укладку в валок зрізаних обчесаних рослин, що збираються, та робочі органи, які здійснюють його. А предметом досліджень визначені взаємозв'язки між конструктивними параметрами, довговічністю, ремонтпридатністю модуля та параметрами культур, що збираються.

Ключові слова: обчисувальний модуль, обчисування рослин на корені, різальний пристрій, критерій, ефективність, фактори, дерево цілей і критеріїв.

Постановка проблеми. Питання зрізання та укладки в валок обчесаних стеблин в технологічному процесі збирання зернових культур методом обчисування рослин на корені залишається відкритим [1]. Обчесані рослини, що залишились в полі у вигляді незрізаної маси перешкоджають роботі ґрунтообробних машин. При загортанні соломи, яка не подрібнена, в ґрунт, вона сприяє накопиченню в орному шарі нерозкладеної органіки, що негативно впливає на врожайність [2, 4].

Таким чином розробка шляхів та засобів ефективного збору не зернової частини врожаю є актуальною науково-технічною задачею, рішення якої дозволить забезпечити впровадження вискоелективних технологій збирання зернових культур методом обчисування рослин на корені.

Аналіз останніх досліджень. Одним з напрямків підвищення ефективності проведення збирання зернових культур методом обчисування рослин на корені є застосування обчисувально – різального модуля зернозбирального комбайну, який складається з обчисувального та різального пристроїв. Експериментальний комбайн з обчисувально – різальним модулем наведено на рисунку 1.

Але для оцінки роботи цього модуля необхідно встановити критерій ефективності спільних збиральних робіт (за один прохід зерно збирального комбайну). У попередніх дослідженнях критерій ефективності встановлювався тільки для різального апарату, окремо від обчисувального пристрою [3, 6, 7].



Рис. 1. Експериментальний комбайн з обчисувально – різальним модулем

Приймаємо критерій ефективності, як кількісно виміряну ціль збиральних робіт. При обґрунтуванні прийнятих рішень ціль можливо виразити одним критерієм тільки в простих випадках. Системне обґрунтування рішень такої умови не передбачає, не передбачає тому, що така умова майже ніколи не виконується. Тому будується цільова функція у вигляді математичного виразу критерію ефективності спільних збиральних робіт. Встановлений критерій ефективності може бути, як оптимізаційним, так і обмежувачим. Цільова функція оптимізаційного критерію повинна мати екстремум, який і є кращий варіант з усіх рішень. Гранично допустимі значення параметрів визначає обмежувачий критерій, який дозволяє вилучити варіанти, які знаходяться поза обмежень [3].

Велике значення при визначенні відповідності критерію ефективності поставленій цілі має рівень узагальнених результатів рішень. На рисунку 2 представлено так зване «дерево цілей і критеріїв» збирання обчесаних на корені, не зрізаних стеблин культур що збираються. На нижньому рівні цілей цього дерева вказані основні показники: кількість машин (N_m), коефіцієнт змінності (K_{zm}), експлуатаційна продуктивність (W_{ek}), затрати праці (Z_p), експлуатаційні витрати (S_{ek}), втрати врожаю (U_v). Але це далеко не всі показники ефективності збиральних робіт.

Продуктивність на одного працівника збирального комплексу (W_p) є інтегральним показником. Цей критерій більш прийнятний при виборі оптимальної кількості зернозбиральної техніки в залежності від виробничо – природних факторів. Критерій продуктивності на одного працівника має екстремум і визначає ціль при дефіциті виконавців. Але цей критерій не враховує грошові витрати на виконання збиральних робіт.

За критерій, який враховує грошові витрати, приймаємо приведені витрати ($S_{np} \rightarrow \min$) на одиницю виконаних робіт. Цей критерій, як цільова функція, використовується і під час проектування нових виробничих процесів, так і при плануванні та організації під час вдосконалення вже діючого виробничого процесу. Проводимо оптимізацію мінімізації приведених витрат. Але цей критерій не вказує впливу всього зернозбирального комплексу на кінцеву ціль, а це весь зібраний врожай.

З усіх приведених критеріїв, загальним критерієм є ефективність праці (E_p , грн./ люд.-год.), який дає інформацію для оцінки машин, технологій і процесів зі збирання врожаю.

$$E_n = \frac{(Q_m \cdot T - T \cdot U_v) \cdot (C_o - S_{ek})}{Z_n} \rightarrow \max, \quad (1)$$

де

$$U_{\varepsilon} = Q_m \cdot \frac{g_{\varepsilon}}{100}, \quad (2)$$

 E_n – ефективність праці, грн./люд.-год.;

 U_{ε} – втрати продукції, кг/год.;

 T – час роботи комбайна, год.;

 Q_m – продуктивність різального пристрою, кг/год.;

 g_{ε} – відсоток втрат незернової частини врожаю, %;

 C_o – вартість незернової частини врожаю, грн./кг;

 S_{ek} – експлуатаційні витрати, грн./кг;

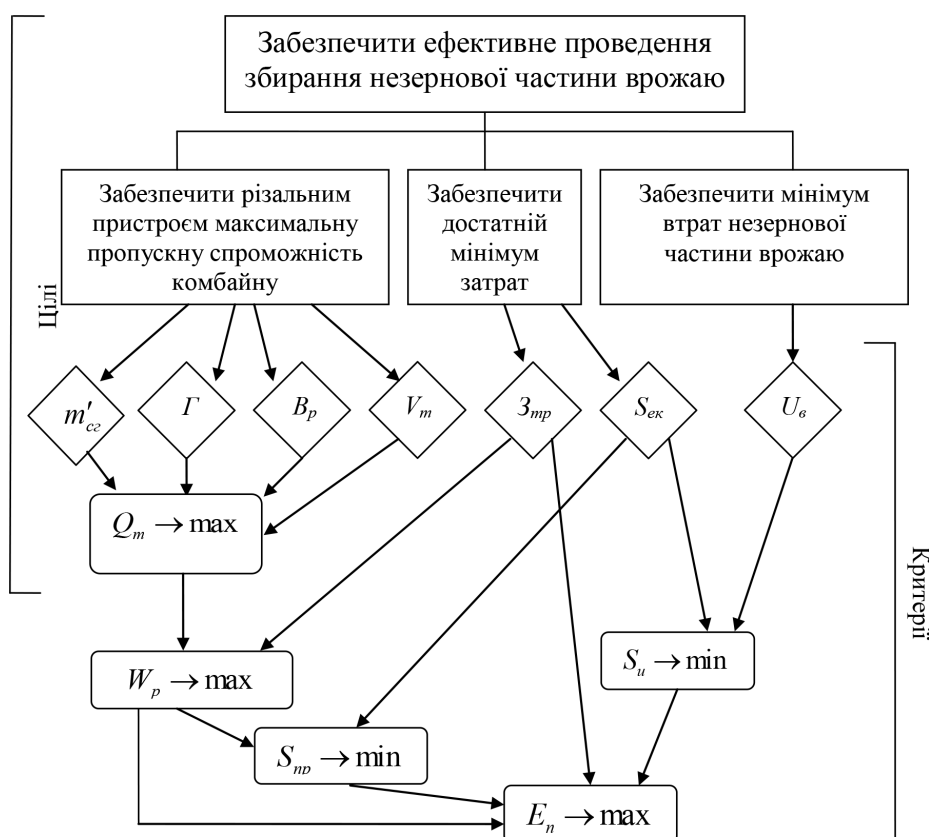
 z_n – затрати праці, люд.-год.


Рис. 2. Дерево цілей і критеріїв збирання незернової частини врожаю після обчислення рослин на корені

Вибір критерію залежить від обставин, пов'язаних з виробничою ситуацією.

 При дефіциті часу, наприклад при проведенні збирання врожаю, коли важливо зменшити втрати зерна від самоосипу, проводимо оптимізацію за мінімумом затрат праці ($z_n \rightarrow \min$). При дефіциті робочої сили проводимо оптимізацію за максимумом продуктивності ($W_{np} \rightarrow \max$).

 Якщо більш суттєвою є економія коштів, то оптимізацію можна проводити за мінімумом приведених витрат на одиницю продукції ($S_{np} \rightarrow \min$). При цьому важливим фактором, який впливає на приведені витрати на одиницю продукції, є вартість машин, які розробляються для всього збирального комплексу.

Продуктивність різального пристрою визначаємо як:

$$Q_m = m'_{CT} \cdot \Gamma \cdot B_p \cdot V_M, \quad (3)$$

де

m'_{CT} – маса однієї обчесаної стеблини, кг;
 Γ – густина стеблостою, шт./м²;
 B_p – ширина захвату різального пристрою, м;
 V_M – швидкість комбайна, м/год.

Тоді:

$$E_n = \frac{\left[m'_{CT} \cdot \Gamma \cdot B_p \cdot V_M \cdot T \left(1 - \frac{g_s}{100} \right) \right] \cdot (C_o - S_{ek})}{Z_n} \rightarrow \max. \quad (4)$$

Постановка завдання. Дана стаття присвячена обґрунтуванню загального критерію ефективності збирання всього врожаю, як зерна так і незернової частини врожаю, а також встановленню факторів, які впливають на ефективність роботи обчисувального модуля.

Основна частина. За таким же алгоритмом, як для визначення критерію ефективності різального пристрою проводимо обґрунтування загального критерію ефективності збирання всього врожаю, як зерна так і незернової частини врожаю, а також встановлюємо фактори, які впливають на ефективність роботи обчисувального модуля.

Будуємо дерево цілей і критеріїв (рис. 3). Приймаємо умови, що збирання зерна і обчесаних стеблин проводимо за один прохід комбайну обчисувального типу. Обчисування рослин і зріз обчесаних стеблин здійснюється обчисувальним модулем, який складається з обчисувального [8, 14] та різального пристроїв [8, 9, 10, 11, 12, 13].

Ширина захвату обчисувального пристрою B_{po} дорівнює ширині захвату різального пристрою B_{pp} . В подальшому для розрахунків приймаємо B_m – ширина захвату обчисувального модуля, яка дорівнює і ширині захвату обчисувального пристрою і ширині захвату різального пристрою.

Тоді ефективність праці при обчисуванні рослин на корені з одночасним збиранням обчесаних рослин має вигляд:

$$E_n = B_p \cdot V_M \cdot \frac{\left[Y_3 \cdot \frac{(1-q_3)}{100} \cdot (C_0 - S_{eko}) + m'_{ce} \cdot z \cdot \frac{(1-q_{cm})}{100} \cdot (C_q - S_{ekp}) \right]}{m}, \quad (5)$$

де

E_n – ефективність праці, грн./люд.-год.;
 B_m – ширина захвату обчисувального модуля, м;
 m'_{ce} – маса однієї обчесаної стеблини, кг;
 Γ – густина стеблостою, шт./м²;
 Y_3 – врожайність культури, що збирається, кг/м²;
 V_M – швидкість комбайна, м/год.;
 q_3 – відсоток втрат зерна, %;
 q_{cm} – відсоток втрат незернової частини врожаю, %;
 C_0 – вартість зерна, грн./кг;
 C_q – вартість незернової частини врожаю, грн./кг;
 S_{eko} – експлуатаційні витрати на збиранні зерна, грн./кг;
 S_{ekp} – експлуатаційні витрати на збиранні незернової частини врожаю, грн./кг;
 m – кількість людей, зайнятих на збиранні врожаю, люд.

На підставі розробленого дерева цілей і критеріїв бачимо, що підвищення ефективності технологічного процесу збирання зернових культур методом обчисування на корені можливе:

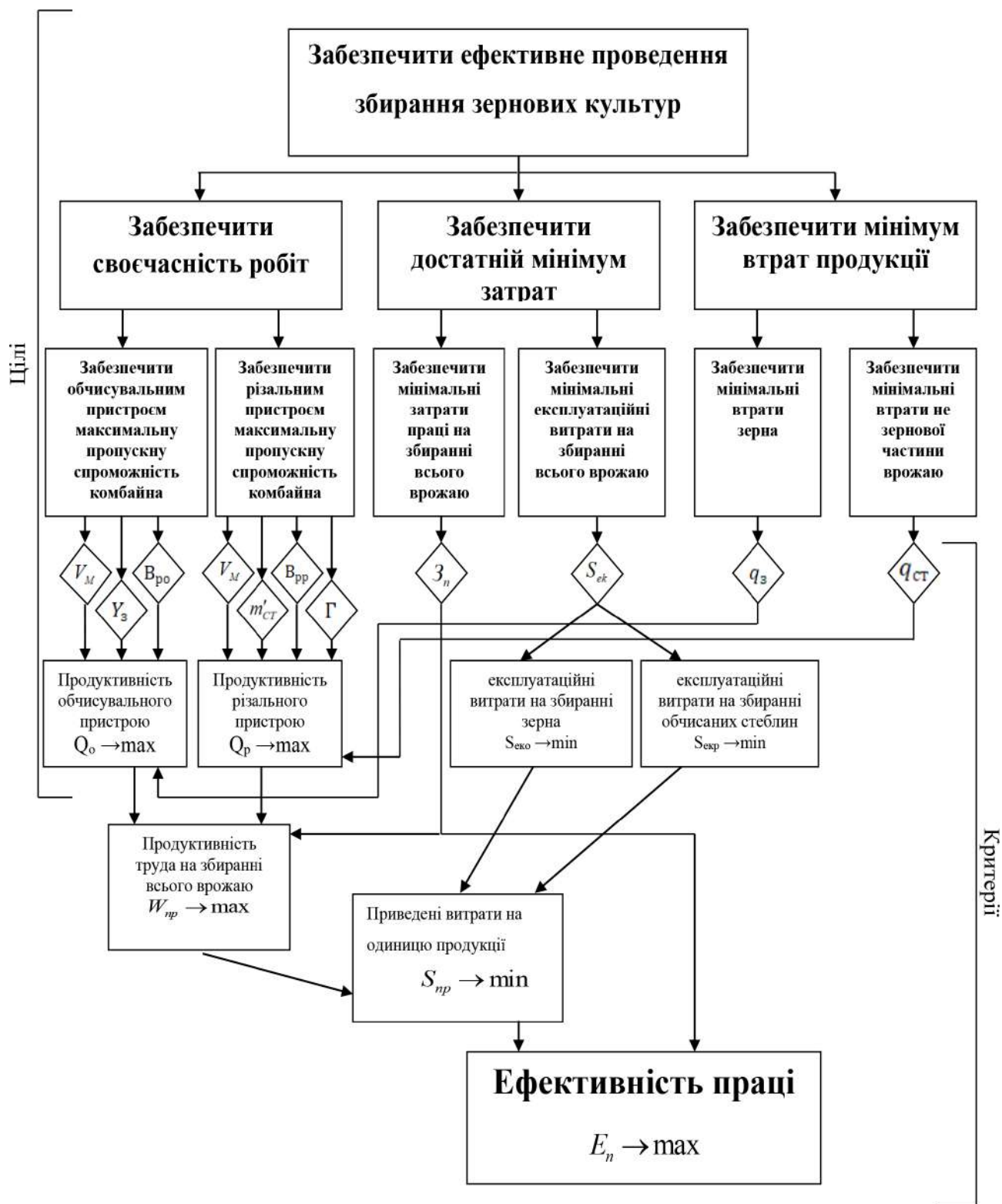


Рис. 3. Дерево цілей і критеріїв збирання врожаю зернових культур методом обчисування рослин на корені

— забезпечивши підвищення продуктивності обчисувального модуля за рахунок конструктивних параметрів, як обчисувального пристрою так і різального пристрою, в тому числі і транспортуючого механізму, а також за рахунок підвищення рівня безвідмовності пристрою;

- мінімізувавши затрати на технічне обслуговування та ремонт, які є складовими приведених витрат ($S_{np} \rightarrow \min$). Мінімізація затрат можлива за рахунок підвищення рівня довговічності та ремонтпридатності;

- мінімізувавши втрати при збиранні [$g_e \rightarrow \min$] за рахунок вдосконалення конструкції робочих органів, як обчисувального барабану, так і різального пристрою, а також за рахунок зменшення інтенсивності зносу поверхонь обчисувальних гребінок, так і граблин транспортуючого механізму.

Розглянемо надійність різального пристрою, як складову технологічної та технічної надійності.

Властивостями технологічної надійності є: ступінь зрізу обчесаних стеблин зернових культур, які надходять в зону зрізання після обчисувального пристрою в похилому стані; ступінь стеблин, які зрізали та вклали на транспортуючий механізм і які потрапили в валок; здатність створеного валка до підбору діючим комплексом машин для збирання незернової частини врожаю; напрацювання різального пристрою.

Властивостями технічної надійності є: безвідмовність, ремонтпридатність; збереженість та довговічність різального пристрою [3, 4, 5].

В свою чергу властивостями довговічності різального пристрою є: зносостійкість, витривалість деталей та зчеплення нероз'ємних з'єднань різального пристрою.

Ефективність технічних систем визначають за такими факторами, як спосіб використання, умови функціонування, якість.

Фактори, які впливають на надійність різального пристрою:

- фізико-механічні властивості культур, що збираються;
- конструктивні параметри та якість технологічного процесу виготовлення різального пристрою;
- режими роботи, організація та технологія ТО, зберігання та ремонту пристрою, а також спосіб відновлення деталей пристрою.

Висновки. Встановлені загальний критерій ефективності збирання всього урожаю обчисувальним модулем зернозбирального комбайну обчисувального типу (ефективність праці) та фактори, які впливають на надійність модуля. Критерій ефективності та фактори дають підставу визначити об'єктом подальших досліджень технологічний процес обчисування культур на корені та зрізання, транспортування та укладку в валок зрізаних обчесаних рослин, що збираються, та робочі органи, які здійснюють його. А предметом досліджень визначені взаємозв'язки між конструктивними параметрами, довговічністю, ремонтпридатністю модуля та параметрами культур, що збираються.

Список використаних джерел

1. Шегада К. О., Шокарев О. М., Шокарев О. О. Механіко-технологічні особливості взаємодії обчесаних стебел з робочими органами різального пристрою Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Мелітополь : ТДАТУ, 2015. Вип. 15, т. 3. 360 с.
2. Шегада К. О., Шокарев О. М., Данченко М. М. Кінематичний аналіз транспортуючого механізму різального пристрою комбайна обчисувального типу Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенко. Технічні науки. Вип. 156. Харків, 2015.
3. Шегада К. О., Шокарев О. М., Шегада А. В. Критеріальний підхід до проблеми ефективності збирання незернової частини врожаю. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету, Вип.2, Т.3. – Мелітополь : ТДАТУ, 2012.
4. Sheheda K., Shokarev O., Kiurchev S., Danchenko M., Mykhailova L. (2021). Results of research of combine harvester cutterbar. *Engineering for Rural Development*. Vol. 20. P. 1632–1637. DOI: 10.22616/ERDev.2021.20.TF350



5. Shokarev O., Kiurchev S., Shokarev O., Rud A., Gorbovy O. Results of experimental research in separator dielectric aspiration channel. Engineering for Rural Development. Vol. 20. 2021. P. 1611–1616. DOI: 10.22616/ERDev.2021.20.TF346

6. Данченко М. М., Шокарев О. М. Экономическая эффективность от внедрения в производство комбайна очесывающего типа. Праці / Таврійська державна агротехнічна академія. Вип. 1, Т. 15. Мелітополь : ТДАТА, 2000.

7. Шокарев О. М., Данченко М. М. Технічні вимоги до різального пристрою рисозбирального комбайна очисувального типу та його польові дослідження. Праці / Таврійська державна агротехнічна академія. Вип. 1, Т. 18. Мелітополь : ТДАТА, 2001.

8. Шокарев О. М. Збирання незернової частини врожаю комбайном очисувального типу. Праці / Таврійська державна агротехнічна академія. Вип. 1, Т. 22. Мелітополь : ТДАТА, 2001.

9. А.С. 1601971 СССР, Режущее устройство сельскохозяйственных машин. / Шокарев А. Н. и др./ Б.И. 1990 № 20.

10. Різальний апарат сільськогосподарської збиральної машини. Патент України на корисну модель № 157103, опубл. 11.09.2024, бюл. № 37/2024/ Шокарев О. О., Шегада К. О., Шокарев О. М., Кюрчев С. В., Шегада А. В.

11. Ріжучий пристрій з активним валкоутворювачем. Патент України на корисну модель № 157108, опубл. 11.09.2024, бюл. № 37/2024/ Шокарев О. О., Шегада К. О., Шокарев О. М., Кюрчев С. В., Данченко М. М.

12. Ріжучий пристрій сільськогосподарських машин. Патент України на корисну модель № 157088, опубл. 11.09.2024, бюл. № 37/2024/ Шокарев О. О., Шегада К. О., Шокарев О. М., Кюрчев С. В.

13. Ріжучий пристрій сільськогосподарської збиральної машини. Патент України на корисну модель № 157084, опубл. 11.09.2024, бюл. № 37/2024 / Шокарев О. О., Шегада К. О., Шокарев О. М., Кюрчев С. В., Шегада А. В.

14. А.С 1165278 СССР, Устройство для обмолота сельскохозяйственных культур на корню. /Голубев И. К., Гончаров Б. И./ Б.И. 1985. № 25.

Дата першого надходження статті до видання: 19.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 14.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



O. Shokarev, I. Kolokolchikova, M. Danchenko, O. Shokarev
Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

EFFICIENCY CRITERION OF THE STRIPPER-CUTTING MODULE OF A GRAIN COMBINE HARVESTER

Summary

The general efficiency criterion for the technological process of harvesting grain crops using the method of stripping standing plants is determined. The harvesting process is carried out by a stripper module, which consists of stripping and cutting devices. The technological harvesting process comprises stripping standing crops and harvesting grain, as well as cutting and laying the non-grain part into a windrow.

The goals and criteria for efficient harvesting (of both grain and non-grain parts) are established. Ways to improve the efficiency of the technological harvesting process when stripping standing grain crops are identified.

The factors influencing the reliability of the stripper-cutting module of the grain combine harvester are presented.

The efficiency criterion and factors provide a basis for defining the object of further research as the technological process of stripping standing crops, and the cutting, transporting, and windrowing of the harvested stripped plants, as well as the working bodies that perform these operations.

The subject of the research is defined as the relationships between the design parameters, durability, and maintainability of the module and the parameters of the harvested crops.

Keywords: stripper module, stripping of standing plants, cutting device, criterion, efficiency, factors, tree of goals and criteria.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-18>

UDC 539.3:629.7

B. N. Younis, Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor, Professor
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"
e-mail: docbasheer01@gmail.com

ORCID: 0000-0002-5693-6954

COMPARATIVE ANALYSIS OF FAILURE CRITERIA FOR ANISOTROPIC LAYERED COMPOSITES: FROM BRITTLE ONSET TO PROGRESSIVE DAMAGE IN AEROSPACE STRUCTURAL ELEMENTS

Summary. Aerospace composite structures are routinely analysed using first-ply-failure criteria that equate initial ply damage with structural collapse, generating unconservative failure-load overestimates of up to 23 % for quasi-isotropic carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) laminates. Five established failure criteria – Maximum Stress, Maximum Strain, Tsai-Hill, Tsai-Wu, and Hashin – are systematically compared for aerospace-representative layups. The Hashin criterion predicts a critical in-plane shear stress 5 % below the Maximum Stress threshold due to the coupled shear-transverse matrix failure mechanism. A three-stage progressive damage model tracking matrix micro-cracking, interface debonding, and cohesive-zone delamination reproduces ultimate failure loads within 0.5 % of ASTM D3039 experimental values. The findings establish a quantitative case for adopting progressive damage methodologies in aerospace structural certification.

Keywords: failure criteria, progressive damage, CFRP, Hashin criterion, Tsai-Wu, delamination, cohesive zone modelling, damage tolerance, aerospace structures.

Problem Statement. The structural analysis of fibre-reinforced polymer composites in primary aerospace applications – fuselage panels, wing skins, spar flanges – has long relied on first-ply-failure (FPF) criteria as the terminal design limit state. Under this convention, the load at which any individual ply in a laminate first satisfies a prescribed failure criterion is identified as the structural failure load, implicitly treating localised initial damage as synonymous with overall structural collapse. This assumption is computationally expedient and superficially conservative: the FPF load is always lower than or equal to the load at which the undamaged structure would fail in a purely elastic sense. However, it is fundamentally non-conservative with respect to the true failure load because it systematically ignores the post-first-ply load redistribution capacity that undamaged plies retain after their neighbours have cracked [1, 2].

The practical consequence is that structures declared safe by FPF analysis may in reality already be accumulating progressive damage under service conditions, a situation incompatible with the damage tolerance design philosophy mandated by contemporary airworthiness regulations (FAR 25.571, CS 25.571). There is thus both a scientific and a regulatory imperative to establish, with quantitative rigour, how large this overestimation is for practical layup configurations and what minimum analytical fidelity is required to recover accuracy.

Analysis of Recent Research. The comparative evaluation of composite failure criteria has a well-documented history in the World-Wide Failure Exercise (WWFE), coordinated by Hinton, Kaddour, and Soden [3]. The WWFE-I and WWFE-II systematically benchmarked more than a dozen criteria against experimental data for diverse loading conditions, revealing that physically motivated criteria – Hashin [4], Puck [5], LaRC [6] – generally outperform purely polynomial approaches such as Tsai-Wu [7] under multiaxial loading, particularly for shear-dominated cases.

The Hashin criterion's four-mode decomposition (fibre tension, fibre compression, matrix tension, matrix compression) has become the standard implementation in commercial finite element codes, including Abaqus and LS-DYNA, largely because its individual mode expressions are algebraically simple and its parameters are fully characterised by uniaxial and shear tests [4]. Its matrix tensile mode – $(\sigma_2/Y_t)^2 + (\tau_{12}/S_{12})^2 = 1$ – explicitly couples transverse normal stress to in-plane shear, a feature absent in Maximum Stress and Maximum Strain criteria. Catalanotti et al. [8] demonstrated that this coupling is physically grounded in the oblique principal stress state within the resin-rich interfibre matrix under combined loading, reducing the effective shear capacity below the nominal in-situ value.

Progressive damage modelling for laminated composites has advanced substantially through the continuum damage mechanics (CDM) frameworks of Ladeveze and Le Dantec [9] and the thermodynamically consistent formulation of Maimi et al. [10]. These approaches maintain separate damage state variables for distinct failure modes, enabling anisotropic stiffness degradation that reflects the physical progression from matrix micro-cracking through interface debonding to interlaminar delamination. Cohesive zone models (CZM), formulated by Alfano and Crisfield [11] and refined by Turon et al. [12], provide a tractable finite element implementation of interlaminar fracture that reproduces experimentally measured mode I and mixed-mode delamination responses with high fidelity. Despite this analytical maturity, the quantitative gap between FPF and progressive damage predictions for specific aerospace layup configurations – and its direct implication for structural certification – has received insufficient systematic attention in the recent literature.

Purpose Statement. This investigation has three specific objectives: (1) to quantify the divergence among five established failure criteria in their predictions of ply-level failure stresses for aerospace-representative T300/3501-6 CFRP layups; (2) to establish, through comparison with ASTM D3039 experimental data, the quantitative margin by which FPF analysis overestimates ultimate failure load for quasi-isotropic $[0/+-45/90]_2$ s laminates; and (3) to demonstrate that a three-stage progressive damage model incorporating matrix micro-cracking, interface debonding, and cohesive-zone delamination recovers experimental accuracy to within 0.5 % without disproportionate added computational complexity.

Basic Text

4.1. Theoretical Framework of Failure Criteria

All five criteria operate on the same set of ply-level resolved stress components – longitudinal normal stress σ_1 , transverse normal stress σ_2 , and in-plane shear stress τ_{12} – assessed against the corresponding strength parameters: tensile and compressive strengths X_t , X_c (fibre direction) and Y_t , Y_c (transverse), and shear strength S_{12} . The criteria occupy a spectrum from fully decoupled to fully interactive.

The Maximum Stress criterion evaluates each component independently; failure occurs when any ratio σ_i/X_i exceeds unity. No stress interaction is assumed, which produces non-conservative predictions under combined loading. The Maximum Strain criterion introduces a modest implicit coupling through the orthotropic compliance matrix, slightly reducing predicted shear capacity under biaxial loading [13].

The Tsai-Hill criterion adapts the von Mises yield surface to anisotropic materials, introducing a quadratic interaction term between σ_1 and σ_2 . However, it employs a single strength value per axis, conflating tension and compression [14]. The Tsai-Wu tensor polynomial addresses this through separate linear terms for tensile and compressive strengths, augmented by a biaxial interaction parameter F_{12} that requires dedicated combined-loading tests for determination [7]. The sensitivity of Tsai-Wu predictions to F_{12} scatter is a recognised practical limitation for certification applications.

The Hashin criterion [4] decomposes failure into four physically distinct modes. For matrix tensile failure ($\sigma_2 > 0$):

$$(\sigma_2 / Y_t)^2 + (\tau_{12} / S_{12})^2 = 1 \quad (1)$$

Equation (1) defines an elliptical failure surface in (σ_2, τ_{12}) stress space. For the T300/3501-6 system examined here ($Y_t = 60$ MPa, $S_{12} = 95$ MPa), equation (1) predicts matrix failure at $\tau_{12} = 90$ MPa under pure shear ($\sigma_2 = 0$), compared with $S_{12} = 95$ MPa from the Maximum Stress criterion – a 5 % reduction reflecting the oblique principal tensile stress mechanism in the interfibre matrix (Fig. 1).

Table 1

Elastic properties of CFRP material systems considered in this study

Material System	E1 (GPa)	E2 (GPa)	G12 (GPa)	ν_{12}
T300/3501-6 CFRP	130	10.5	5.25	0.28
IM7/8552 CFRP	161	11.4	5.17	0.32
AS4/3501-6 CFRP	126	11.0	6.60	0.28

Table 1 presents elastic constants for three material systems examined. The failure stress predictions across all five criteria for T300/3501-6 are summarised in Table 2.

Table 2

Predicted ply failure stresses under five failure criteria for T300/3501-6 unidirectional CFRP

Criterion	s1t (MPa)	s1c (MPa)	s2t (MPa)	s2c (MPa)	t12 (MPa)
Max Stress	1850	1230	60	210	95
Max Strain	1840	1220	58	200	92
Tsai-Hill	1830	1215	59	205	93
Tsai-Wu	1820	1210	58	202	91
Hashin	1825	1200	57	195	90

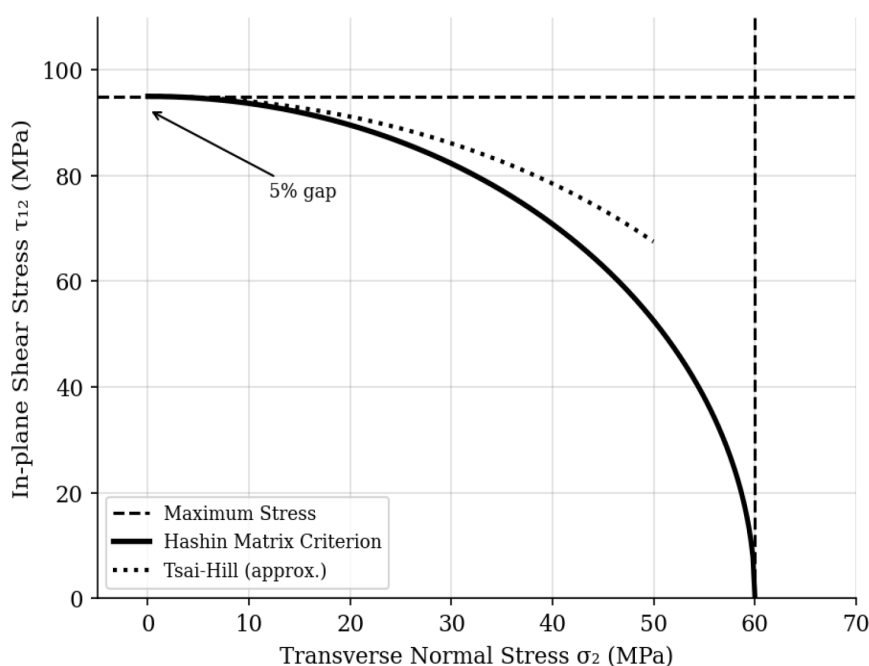


Fig. 1. Matrix failure envelopes in (σ_2, τ_{12}) stress space for T300/3501-6 CFRP. The Hashin elliptical boundary (solid line) predicts a 5 % lower critical shear stress than the Maximum Stress criterion (dashed line)

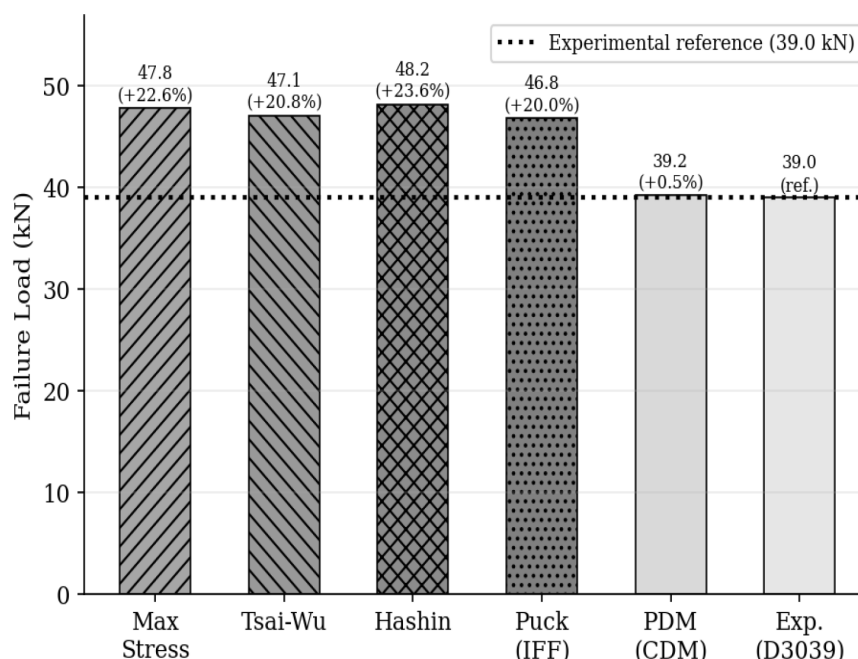


Fig. 2. Predicted failure loads from five first-ply-failure approaches and the progressive CDM model compared against the experimental reference (39.0 kN, ASTM D3039). FPF approaches overestimate by 20–23 %; CDM matches within 0.5 %

4.2. Experimental Programme

Twelve panels of $[0/\pm 45/90]_2s$ quasi-isotropic CFRP (T300/3501-6, $V_f = 0.60$) were fabricated by autoclave cure (120 degrees C, 0.7 MPa, 120 min) following manufacturer specifications. Void content was confirmed below 1 % by acid digestion per ASTM D3171 [15]. Specimens were waterjet-cut to ASTM D3039 dog-bone geometry (250 mm $\times$ 25 mm $\times$ 3.6 mm gauge section).

Six specimens were instrumented with uniaxial strain gauges at 0, 45, and 90 degree orientations. The remaining six were monitored by stereo digital image correlation (DIC) at 2 Hz acquisition. Acoustic emission (AE) transducers bracketed the gauge section; events were amplitude-classified into matrix cracking (45–65 dB), interface debonding (65–80 dB), and fibre fracture (>80 dB) following the thresholds of Bohse [16]. Load was applied in displacement control at 1 mm/min.

4.3. Three-Stage Progressive Damage Model

The progressive damage model follows the thermodynamically consistent CDM framework of Maimi et al. [10], adapted for three sequential physical stages.

Stage I (0–40 % of ultimate load): Matrix micro-crack nucleation in plies transverse to the loading direction, governed by equation (1). Laminate stiffness reduction remains below 2 %.

Stage II (40–75 % of ultimate load): Crack saturation and fibre-matrix interface debonding. The characteristic damage state (CDS) of Highsmith and Reifsnider [17] is reached; the ± 45 degree plies accumulate shear matrix cracks as load redistributes from the cracked 90-degree plies. The load-displacement slope progressively decreases (Fig. 3).

Stage III (75–100 % of ultimate load): Delamination propagation driven by stress concentrations at transverse crack tips. The delamination is modelled with cohesive zone elements using a bilinear traction-separation law [11]:

$$T = T_{\max} * (1 - (\delta - \delta_0)/(\delta_f - \delta_0)) \text{ for } \delta_0 \leq \delta \leq \delta_f, \quad (2)$$

where $T_{\max}$ is the interface tensile strength, δ_0 is the displacement at damage initiation, and δ_f is the displacement at complete separation. Mode I and Mode II critical energy release rates

$G_{Ic} = 0.26 \text{ kJ/m}^2$ and $G_{IIc} = 1.02 \text{ kJ/m}^2$ were determined from DCB (ASTM D5528 [18]) and MMB (ASTM D6671 [19]) tests respectively.

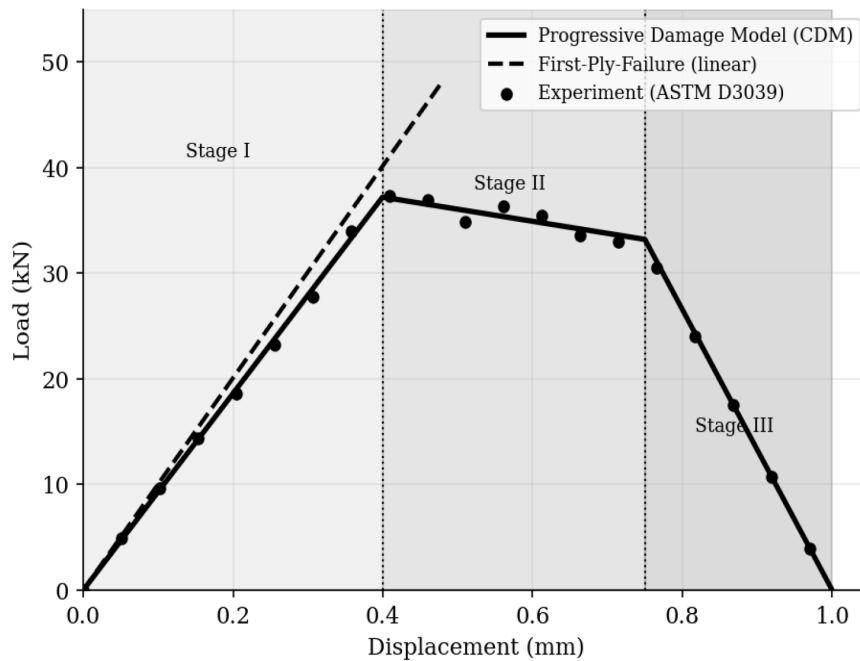


Fig. 3. Load-displacement response of $[0/+/-45/90]_2s$ CFRP laminate under uniaxial tension. Progressive damage model (solid line), first-ply-failure prediction (dashed), and experiment (markers). Stage boundaries are indicated by vertical dotted lines

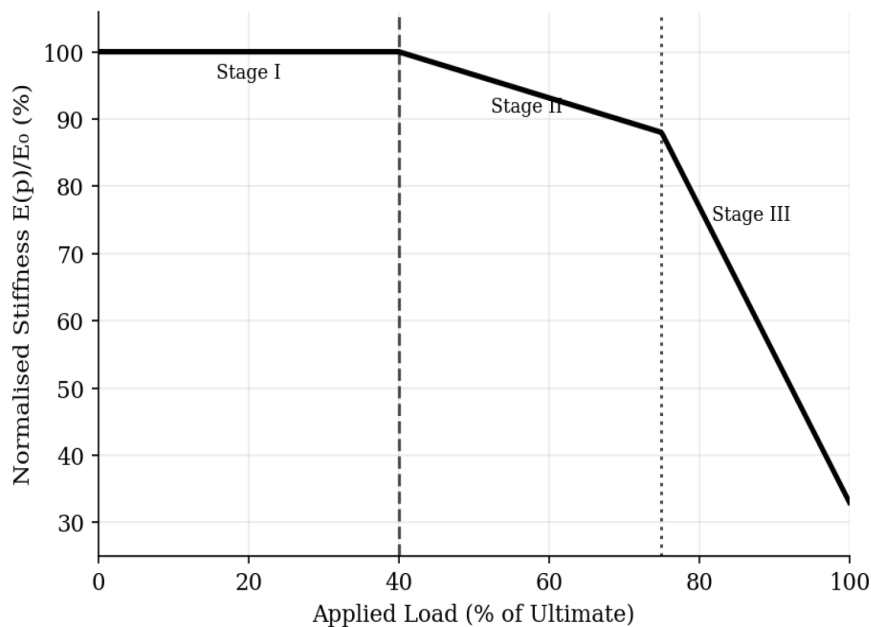


Fig. 4. Normalised axial stiffness $E(p)/E_0$ as a function of applied load fraction. Three-stage degradation profile: Stage I (stable), Stage II (gradual), Stage III (rapid collapse)

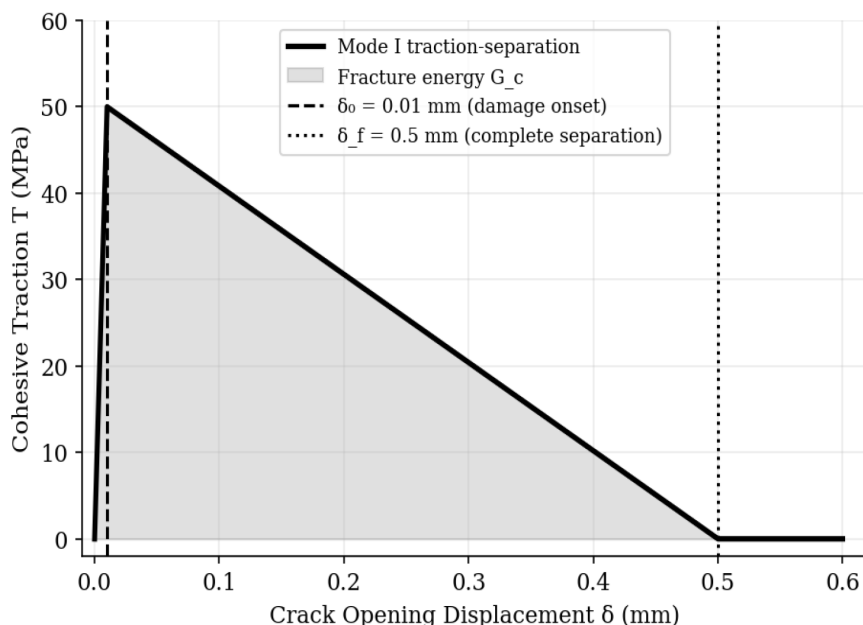


Fig. 5. Bilinear traction-separation law used in the cohesive zone delamination model (Mode I). Shaded area equals the critical energy release rate $G_{Ic} = 0.26 \text{ kJ/m}^2$

4.4. Results and Discussion

Table 3 summarises predicted versus measured failure loads across all analysis approaches.

Table 3

Predicted versus measured failure loads for $[0/+/-45/90]_2s$ CFRP under uniaxial tension

Analysis Method	Failure Load (kN)	Error vs Exp. (%)	Assessment
Max Stress (FPF)	47.8	+22.6	Non-conservative
Tsai-Wu (FPF)	47.1	+20.8	Non-conservative
Hashin (FPF)	48.2	+23.1	Non-conservative
Progressive CDM	39.2	+0.5	Excellent match
Experiment (D3039)	39.0	–	Reference

The span of FPF predictions across five criteria is only 1.4 kN (46.8–48.2 kN), confirming that the 20–23 % overestimation relative to the experimental mean (39.0 kN) is not criterion-specific but inherent to the FPF methodology. When the 90-degree plies crack at ~39.5 kN, the 0-degree and +45-degree plies remain intact, absorbing the shed load and continuing to carry increasing force. This post-cracking redistribution capacity – representing 23.1 % of the ultimate load – is the structural reserve that FPF analysis systematically ignores (Fig. 2).

The progressive damage CDM model predicts 39.2 kN, a 0.5 % deviation from experiment falling within the experimental scatter band (coefficient of variation 1.8 %). The full load-displacement trajectory, including the three-stage softening character, is reproduced with high fidelity (Fig. 3). DIC strain maps at 80 % of ultimate load confirm that the spatial extent of the simulated damage zone differs from experiment by less than 8 % in projected area. AE cumulative counts show three clear inflection points at ~16 kN, ~24 kN, and ~30 kN, in close correspondence with the model-predicted Stage I onset, Stage I-II transition, and Stage II-III transition loads respectively.

A parametric sensitivity study showed that ± 20 % variation in G_{Ic} shifts the Stage III failure load by ± 3.1 %, while equivalent variation in G_{IIc} yields ± 1.8 % change – consistent with the Mode I dominance of the observed delamination pattern. The model is therefore moderately sensitive to G_{Ic} and requires measured rather than estimated fracture toughness data.



Conclusions. (1) The Hashin criterion predicts critical in-plane shear stress 5 % below the Maximum Stress reference for T300/3501-6 CFRP, reflecting the physical coupling between shear and transverse normal stress in the matrix failure mode. This conservatism is experimentally justified and should not be dismissed as analytical pessimism.

(2) All five FPF criteria examined overestimate ultimate failure load by 20–23 % for [0/+/-45/90]_{2s} quasi-isotropic CFRP laminates. This overestimation is an intrinsic consequence of the FPF methodology, not of any specific criterion, and represents a genuinely unconservative design error for structures whose governing failure mode is ultimate collapse.

(3) The three-stage progressive CDM model recovers experimental accuracy to within 0.5 %, reproduces the full load-displacement response, and is validated by independent AE and DIC measurements. Its computational overhead relative to FPF analysis is modest for laminate models with fewer than several thousand integration points.

(4) For aerospace damage tolerance certification, the Hashin criterion combined with a cohesive zone delamination model constitutes the minimum analytical fidelity consistent with the physics of progressive composite failure. Prospects for further research include extension of the model to compression-after-impact scenarios and fatigue loading, as well as development of reduced-order implementations suitable for fleet-level structural health monitoring.

Дата першого надходження статті до видання: 19.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 14.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



Bibliography

1. Soutis C. Fibre reinforced composites in aircraft construction. *Progress in Aerospace Sciences*. 2005. Vol. 41, No. 2. P. 143–151. DOI: 10.1016/j.paerosci.2005.02.004
2. Mouritz A. P. *Introduction to Aerospace Materials*. Cambridge : Woodhead Publishing, 2012. 638 p.
3. Hinton M. J., Kaddour A. S., Soden P. D. (eds.). *Failure Criteria in Fibre-Reinforced Polymer Composites: The World-Wide Failure Exercise*. Oxford : Elsevier, 2004. 1259 p.
4. Hashin Z. Failure criteria for unidirectional fibre composites. *Journal of Applied Mechanics*. 1980. Vol. 47, No. 2. P. 329–334. DOI: 10.1115/1.3153664
5. Puck A., Schurmann H. Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models. *Composites Science and Technology*. 1998. Vol. 58, No. 7. P. 1045–1067. DOI: 10.1016/S0266-3538(96)00140-6
6. Davila C. G., Camanho P. P., Rose C. A. Failure criteria for FRP laminates. *Journal of Composite Materials*. 2005. Vol. 39, No. 4. P. 323–345. DOI: 10.1177/0021998305046452
7. Tsai S. W., Wu E. M. A general theory of strength for anisotropic materials. *Journal of Composite Materials*. 1971. Vol. 5, No. 1. P. 58–80. DOI: 10.1177/002199837100500106
8. Catalanotti G., Camanho P. P., Marques A. T. Three-dimensional failure criteria for fibre-reinforced laminates. *Composite Structures*. 2013. Vol. 95. P. 63–79. DOI: 10.1016/j.compstruct.2012.07.016
9. Ladeveze P., Le Dantec E. Damage modelling of the elementary ply for laminated composites. *Composites Science and Technology*. 1992. Vol. 43, No. 3. P. 257–267. DOI: 10.1016/0266-3538(92)90097-M
10. Maimi P., Camanho P. P., Mayugo J. A., Davila C. G. A continuum damage model for composite laminates: Part I – Constitutive model. *Mechanics of Materials*. 2007. Vol. 39, No. 10. P. 897–908. DOI: 10.1016/j.mechmat.2007.03.005
11. Alfano G., Crisfield M. A. Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2001. Vol. 50, No. 7. P. 1701–1736. DOI: 10.1002/nme.93
12. Turon A., Camanho P. P., Costa J., Davila C. G. A damage model for the simulation of delamination under variable-mode loading. *Mechanics of Materials*. 2006. Vol. 38, No. 11. P. 1072–1089. DOI: 10.1016/j.mechmat.2005.10.003

13. Daniel I. M., Ishai O. *Engineering Mechanics of Composite Materials*. 2nd ed. New York : Oxford University Press, 2006. 432 p.
14. Kaddour A. S., Hinton M. J., Soden P. D. A comparison of the predictive capabilities of current failure theories for composite laminates. *Composites Science and Technology*. 2004. Vol. 64, No. 3–4. P. 449–476. DOI: 10.1016/S0266-3538(03)00316-5
15. ASTM D3171-22. *Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials*. West Conshohocken : ASTM International, 2022.
16. Bohse J. Acoustic emission in delamination investigation. *Composites Science and Technology*. 2000. Vol. 60, No. 6. P. 1225–1235. DOI: 10.1016/S0266-3538(00)00060-9
17. Highsmith A. L., Reifsnider K. L. Stiffness-reduction mechanisms in composite laminates. *ASTM STP 775*. West Conshohocken : ASTM International, 1982. P. 103–117.
18. ASTM D5528-13. *Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites*. West Conshohocken : ASTM International, 2013.
19. ASTM D6671/D6671M-13. *Standard Test Method for Mixed Mode I-Mode II Interlaminar Fracture Toughness*. West Conshohocken : ASTM International, 2013.
20. Wisnom M. R. The role of delamination in failure of fibre-reinforced composites. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2012. Vol. 370, No. 1965. P. 1850–1870. DOI: 10.1098/rsta.2011.0441
21. Camanho P. P., Davila C. G., de Moura M. F. Numerical simulation of mixed-mode progressive delamination in composite materials. *Journal of Composite Materials*. 2003. Vol. 37, No. 16. P. 1415–1438. DOI: 10.1177/0021998303034505
22. Talreja R., Singh C. V. *Damage and Failure of Composite Materials*. Cambridge : Cambridge University Press, 2012. 312 p. DOI: 10.1017/CBO9781139016063
23. Aboudi J., Arnold S. M., Bednarczyk B. A. *Micromechanics of Composite Materials*. Oxford : Elsevier, 2013. 984 p.
24. Beaumont P. W. R., Soutis C., Hodzic A. (eds.). *The Structural Integrity of Carbon Fibre Composites*. Cham : Springer, 2017. 786 p. DOI: 10.1007/978-3-319-46120-5
25. ASTM D3039/D3039M-17. *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. West Conshohocken : ASTM International, 2017.

Б. Н. Юніс

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ КРИТЕРІЇВ РУЙНУВАННЯ АНІЗОТРОПНИХ ШАРУВАТИХ КОМПОЗИТІВ: ВІД КРИХКОГО ПОЧАТКУ ДО ПРОГРЕСИВНИХ ПОШКОДЖЕНЬ В АЕРОКОСМІЧНИХ СТРУКТУРНИХ ЕЛЕМЕНТАХ

Анотація

Аерокосмічні композитні конструкції традиційно аналізуються з використанням критеріїв руйнування першого шару (FPF), які прирівнюють початкове пошкодження шару до руйнування всієї конструкції, що призводить до неконсервативного завищення прогнозованих навантажень руйнування на 23 % для квазіізотропних ламінатів з вуглецевого волокна (CFRP). У роботі систематично порівнюються п'ять відомих критеріїв руйнування – максимальних напружень, максимальних деформацій, Цая-Хілла, Цая-Ву та Хашина – для аерокосмічно-репрезентативних конфігурацій укладання. Критерій Хашина прогнозує критичне зсувне напруження на 5 % нижче за поріг методу максимальних напружень завдяки механізму зв'язаного руйнування матриці при зсуві та поперечному навантаженні. Тристадійна модель прогресивного пошкодження, що відстежує мікротріщини матриці, відшарування на межі розділу та делінацію в когезійній зоні, відтворює граничні навантаження руйнування з відхиленням менше 0,5 % від експериментальних значень за ASTM D3039.

Ключові слова: критерії руйнування, прогресивні пошкодження, CFRP, критерій Хашина, Цай-Ву, делінація, модель когезійної зони, живучість конструкції, аерокосмічні композити.



ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-19>

УДК 004.4:004.8

О. В. Бойко, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-8557-2267

А. С. Комін, аспірант

ORCID: 0000-0003-0328-3934

Сумський державний університет

e-mail: anton.komin2@gmail.com

**ОЦІНКА І ВИБІР МОДЕЛІ-ЧЕМПІОНА У ЗАДАЧАХ АДАПТАЦІЇ
МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗУВАННЯ РІВНЯ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ
У SMART GRID**

Анотація. У статті запропоновано модель оцінки та вибору моделі-чемпіона у задачах адаптації моделей прогнозування рівня споживання електроенергії до умов експлуатації кінцевим споживачем. Модель було перевірено у рамках прототипу інформаційної технології з використанням LSTM-моделі прогнозування. Експеримент проведено на реальних даних про погодинне споживання електроенергії домогосподарством за 8 місяців. У процесі інкрементального навчання було сформовано пул моделей-кандидатів і за допомогою запропонованої моделі на кожному із вікон оцінки було обрано модель-чемпіона з найкращою якістю прогнозів. Це дозволило провести адаптацію моделі прогнозування і покращити RSME на 35.3 % у порівнянні із початковою моделлю, що підтвердило ефективність запропонованої моделі оцінки та вибору моделі-чемпіона.

Ключові слова: периферійні обчислення, машинне навчання, розумні мікромережі, енергоефективність, прогнозування споживання електроенергії, Tensorflow Lite.

Постановка проблеми. Короткострокове прогнозування електроспоживання є важливим компонентом сучасних HEMS, адже якість таких прогнозів безпосередньо впливає на планування навантаження, керування накопиченням електроенергії, оптимізації споживання, тощо. Для забезпечення високого рівня точності прогнозів навчання моделей машинного навчання потребує наявності достатньої кількості історичних даних про рівень споживання електроенергії. Також варто зазначити, що кожна енергетична мережа є унікальною як з точки зору її компонентів, так і з точки зору її використання. Відповідно для надання точних прогнозів необхідно навчати моделі з використанням історичних даних мережі, де ця модель буде використовуватись. Нажаль не завжди можна отримати достатню кількість даних для первинного навчання моделі на етапі впровадження HEMS, а отже і її підсистема прогнозування не зможе повноцінно функціонувати, що ускладнює задачу ефективного управління енергомережою.

Варто зазначити, що у практичних середовищах моделі прогнозування не можуть залишатись статичними, адже режими використання енергомережі можуть змінюватись з часом – підключення нових споживачів, оновлення обладнання мережі, кліматичні зміни. Відповідно виникає потреба у адаптації моделей прогнозування по мірі накопичення історичних даних мережі. Зазвичай процес адаптації полягає у оптимізації вагових коефіцієнтів моделі, або її перенавчанні. З часом утворюється множина моделей, кожна з яких була навчена на різному обсязі історичних даних. Виникає проблема вибору поточної моделі для використання і якщо порівнювати моделі лише за метриками, що були отримані під час їх первинного навчання і тес-

тування, то таке порівняння буде некоректним, адже кожна модель була оцінена на власному часовому зрізі даних, і кожна наступна модель вже мала ці дані у своїй навчальній вибірці.

Аналіз останніх досліджень. Враховуючи динамічну і мінливу природу Smart Grid використання статичних моделей прогнозування не є ефективним. Хоча сучасні моделі машинного навчання, наприклад LSTM [1], здатні надавати досить точні короткострокові прогнози, з часом практично неможливо уникнути дрейфу даних та концепту моделі [2], що призводить до деградації їх точності [3]. Для Smart Grid і енергомереж в цілому таким дрейфом може бути зміна шаблонів споживання і його рівнів. Яскравим прикладом впливу цих факторів є вплив пандемії COVID-19, що не тільки показав вразливість моделей прогнозування [4], але і стимулював дослідження у сфері адаптації моделей прогнозування до актуальних умов їх використання [5], [6]. В рамках процесу адаптації виникає задача вибору оптимальної моделі для використання. У результаті аналізу актуальних публікацій було помічено, що більшість з них сфокусовані на виборі оптимальної моделі прогнозування на етапі первинного навчання, а подальший процес оновлення часто залишається поза рамками досліджень. Для вирішення даної проблеми пропонуються підходи, такі як застосування підкріпленого навчання у процесі вибору [7], або підхід конкурентного вибору моделі-чемпіона [8], що особливо актуально у випадках, коли донавчання поточної моделі ускладнене або неможливе. Прикладом таких моделей можуть бути моделі прогнозування LSTM на мобільних пристроях [9]. Проаналізовані публікації мають прогалину у даній темі досліджень і не пропонують універсальних підходів щодо оцінки моделей машинного навчання у задачах прогнозування рівня споживання електроенергії.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Метою цієї статті є розробка моделі оцінки та вибору моделі-чемпіона у задачах адаптації моделей прогнозування рівня споживання електроенергії до умов експлуатації кінцевим споживачем.

Основна частина. Нехай часовий ряд погодинного споживання електроенергії задається як:

$$Y = \{y_t\}_{t=1}^T, \quad y_t \in \mathbb{R}_{\geq 0}, \quad (1)$$

де y_t є фактичним значенням електроспоживання в момент часу t , а крок дискретизації становить одну годину.

У момент прийняття рішення τ доступна множина моделей-кандидатів

$$\mathcal{M}_\tau = \{M_1, M_2, \dots, M_{K_\tau}\}, \quad (2)$$

де K_τ це загальна кількість навчених моделей, що доступні на момент прийняття рішення. Кожна модель M_k була навчена на історичних даних, доступних до моменту початку її навчання.

$$T_k^{train}. \quad (3)$$

Оскільки значення T_k^{train} відрізняються між навченими моделями, первинні зафіксовані метрики оцінки не можуть бути використані як основа для прямого порівняння.

Нехай останній доступний індекс спостереження в поточний момент дорівнює T , а довжина зовнішнього вікна оцінювання становить H часових кроків. Тоді вікно оцінки визначається як

$$W(T, H) = \{t \mid T - H + 1 \leq t \leq T\}. \quad (4)$$

Важливо зазначити, що дане вікно використовується виключно для зовнішньої оцінки та порівняння моделей і ніколи не входить у вибірку даних для навчання.

У рамках даної моделі розглядається прогноз з горизонтом прогнозування в один часовий крок із фіксованою довжиною історії L . Для кожного допустимого моменту часу формується вхідний вектор

$$x_t = [y_{t-L}, y_{t-L+1}, \dots, y_{t-1}]^T, \quad (5)$$

а прогноз моделі M_k визначається як

$$\hat{y}_t = f_{M_k}(\mathbf{x}_t). \quad (6)$$

Для відносної оцінки ефективності навчених моделей прогнозування введемо наївну базову модель:

$$\hat{y}_t^{(b)} = y_{t-1}. \quad (7)$$

Для моделі-кандидата M_k похибка прогнозу в момент часу $t \in W$ визначається як

$$e_t^{(k)} = y_t - \hat{y}_t^{(k)}. \quad (8)$$

Якість прогнозів моделей оцінюється за чотирма метриками.

Середня абсолютна помилка (MAE), що розраховується як:

$$MAE^{(k)}(W) = \frac{1}{|W|} \sum_{t \in W} |e_t^{(k)}|. \quad (9)$$

Метрика MAE характеризує загальну стабільність прогнозу і менш чутлива до значних одиничних відхилень точності прогнозу.

Корінь із середньоквадратичної помилки (RMSE):

$$RMSE^{(k)}(W) = \sqrt{\frac{1}{|W|} \sum_{t \in W} (e_t^{(k)})^2}. \quad (10)$$

RMSE у порівнянні з MAE чутлива до значних одиничних відхилень у точності прогнозу. Значні промахи у прогнозах у задачах управління енергомережами можуть призводити до некоректного вибору режиму їх роботи.

Зважена абсолютна відсоткова похибка (WAPE) надає відносну оцінку похибки у відсотках, але при цьому у порівнянні із середньою абсолютною відсотковою похибкою (MAPE) може бути розрахована для показників, які можуть містити нульові значення або наближатися до них, що є типовим для часових рядів рівня споживання електроенергії. WAPE можна розрахувати як

$$WAPE^{(k)}(W) = \frac{\sum_{t \in W} |e_t^{(k)}|}{\sum_{t \in W} |y_t|} \cdot 100 \%. \quad (11)$$

Четвертою метрикою для порівняння задаємо коефіцієнт покращення відносно базової моделі (Skill), що можна розрахувати як

$$Skill_{RMSE}^{(k)}(W) = 1 - \frac{RMSE^{(k)}(W)}{RMSE^{(b)}(W)}. \quad (12)$$

Обраний набір критеріїв дозволяє провести оцінку моделі-кандидата. MAE та RMSE характеризують абсолютну точність прогнозу, WAPE надає відносну інтерпретацію точності прогнозу відносно фактичних показників на вікні оцінки $W(T, H)$, а Skill дозволяє оцінити чи дійсно натренована модель машинного навчання надає кращий прогноз, ніж базова модель прогнозування.

Оскільки обрані критерії оцінки мають різний масштаб та напрямок оптимізації перед їх агрегацією необхідно застосувати нормалізацію. Для метрик, що мінімізуються застосуємо

$$\tilde{m}^{(k)} = \frac{m^{(k)} - m_{\min}}{m_{\max} - m_{\min} + \varepsilon}, \quad (13)$$

де $\varepsilon > 0$ є малою константою, яка запобігає діленню на нуль.

Для метрики Skill, яку необхідно максимізувати нормалізований показник розрахуємо як

$$\tilde{s}_{raw}^{(k)} = \frac{Skill_{RMSE}^{(k)} - Skill_{min}}{Skill_{max} - Skill_{min} + \varepsilon}, \quad (14)$$

та виконаємо його інверсію

$$\tilde{s}^{(k)} = 1 - \tilde{s}_{raw}^{(k)}. \quad (15)$$

В результаті всі нормалізовані показники мають єдиний напрямок оптимізації – менше значення відповідає моделі з найкращою якістю прогнозів.

На основі зазначених критеріїв оцінки можемо сформулювати інтегральний критерій вибору моделі-чемпіона. Нехай для моделі M_k маємо вектор критеріїв

$$\mathbf{g}^{(k)} = (RMSE^{(k)}, MAE^{(k)}, WAPE^{(k)}, Skill_{RMSE}^{(k)}). \quad (16)$$

Тоді інтегральний критерій можна задати як

$$S^{(k)} = \alpha_{RMSE} \widehat{RMSE}^{(k)} + \alpha_{MAE} \widehat{MAE}^{(k)} + \alpha_{WAPE} \widehat{WAPE}^{(k)} + \alpha_{Skill} \tilde{s}^{(k)}, \quad (17)$$

де ваги задовольняють умову

$$\alpha_{RMSE} + \alpha_{MAE} + \alpha_{WAPE} + \alpha_{Skill} = 1, \quad \alpha_i \geq 0. \quad (18)$$

На основі інтегрального критерію вибору моделі-чемпіона сформуємо правило для вибору відповідної моделі серед моделей-кандидатів

$$M^*(T) = \arg \min_{M_k \in \mathcal{M}_t} S^{(k)}. \quad (19)$$

Відповідно до правила 19 моделлю-чемпіоном вважається модель із мінімальним значенням інтегрованого критерію на спільному зовнішньому вікні оцінювання.

Для зменшення частоти нестійких перемикань між моделями, що мають практично еквівалентний показник інтегрованого критерію оцінки доцільно використати поріг гістерезису. Нехай $S^{(c)}$ є значенням інтегрованого критерію оцінки поточної моделі-чемпіона, а $S^{(n)}$ є значенням інтегрованого критерію оцінки моделі-кандидата. Тоді відносне покращення моделі дорівнює

$$\Delta = \frac{S^{(c)} - S^{(n)}}{S^{(c)} + \varepsilon}. \quad (20)$$

Якщо

$$\Delta < \delta, \quad (21)$$

де δ це мінімальний поріг покращення інтегрального критерію оцінки моделі, то чинна модель-чемпіон зберігається.

Практична перевірка моделі. Для перевірки ефективності розробленої моделі було проведено прототипування інформаційної технології (ІТ) для оцінки і вибору моделі-чемпіона у задачах адаптації моделей прогнозування рівня споживання електроенергії до умов експлуатації кінцевим споживачем. Практичний сценарій моделює середовище, у якому дані про рівень споживання електроенергії накопичуються поступово і навчання моделі прогнозування виконується з використанням інкрементального підходу, тобто по мірі надходження нових даних. На кожному кроці спостереження часовий ряд подовжується до нового моменту T . Останні H значень часового ряду формують поточне вікно чемпіона, а вся попередня історія спостережень використовується у якості даних для навчання нової моделі. Період перенавчання задається окремим параметром R . Якщо перенавчання виконується кожні R днів, то часовий зсув становить

$$\Delta T = 24R. \quad (22)$$

В практичному експерименті перевірки прототипу ІТ значення R становить 7 днів. Важливо зазначити, що довжина вікна оцінювання H та періодичність перенавчання моделі R є незалежними параметрами і можуть бути змінені відповідно до потреб користувача ІТ.

У якості вхідних даних для перевірки прототипу було використано набір даних щогодинного споживання електроенергії домогосподарства за 8 місяців. Набір даних було попередньо очищено від аномалій та пропусків даних, обрано проміжок даних, що містить 5760 значень, або 240 повних діб. Дані для навчання і оцінки були нормалізовані за допомогою MinMaxScaler (0, 1) пакету NumPy. Горизонт вхідних даних для виконання прогнозу на один часовий крок вперед – 24 години. Період перенавчання R було задано як 7 діб, відповідно крок перенавчання становить ΔT 168 годин. Спільне вікно оцінювання $W(T, H)$ в експерименті було задано як 720 годин (30 діб). Значення гістерезису δ задано як 0.01. При розподілі вагових коефіцієнтів метрик оцінки більшого пріоритету надано α_{RMSE} , адже саме ця метрика найбільш чутлива до масштабу промахів прогнозів моделі. Загальна кількість вікон оцінки моделей на основі вищевказаних даних становить 31. Значення ключових параметрів моделі оцінки наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Ключові параметри моделі оцінки і вибору моделі-чемпіона

Параметр	R (год.)	ΔT (год.)	$W(T, H)$	δ	α_{RMSE}	α_{MAE}	α_{WAPE}	α_{Skill}
Значення	7	168	720	0.01	0.4	0.2	0.2	0.2

В якості експериментальної моделі прогнозування було обрано модель на базі LSTM. Архітектура шарів моделі вказана у таблиці 2. Для навчання та перевірки моделі прогнозування використовувалися фреймворки TensorFlow Keras, та NumPy. В якості функції втрат при навчанні було використано середньоквадратичну помилку MSE, оптимізатор Adam. Для навчання кожної моделі було задано розмір вибірки 64, та 10 епох навчання.

Таблиця 2

Структура експериментальної моделі прогнозування

Шар	Параметри
InputLayer	(24, 1)
LSTM	200, activation='relu'
Dense	100, activation='relu'
Dropout	0.1
Dense	1

Вихідний код прототипу ІТ, що включає імплементацію моделі оцінки і вибору моделі-чемпіона, розрахунку критеріїв моделі, підготовку даних для навчання моделей прогнозування, навчання моделей прогнозування, тестування навчених моделей було розроблено з використанням мови програмування Python.

В результаті тестування прототипу було проведено тренування 31 моделей-кандидатів (по 1 моделі прогнозування на кожне вікно оцінки). Експеримент показав, що якість моделі покращується у процесі адаптації, але динаміка покращення не є монотонною. На початкових вікнах оцінки спостерігається швидке зниження похибки, ближче до середини експерименту є період деградації якості прогнозів і наприкінці експерименту процес знову переходить до стабілізації та покращення, що узгоджується з логікою перенавчання моделі на дедалі більшій вибірці історичних даних. За показником RMSE модель-чемпіон на вікні 1 мала значення RMSE 0,304186, а в процесі адаптації цей показник вдалось знизити до 0,196611, що є на 35.3 % краще. Динаміку зміни RMSE у процесі адаптації моделей можна побачити на рис 1.

Динаміка зміни інтегрального критерію оцінки моделі-чемпіона демонструє, що на вікні 1 критерій має найгірше значення, адже на старті є лише один кандидат і модель навчається на дуже обмеженому наборі даних. На вікнах 2, 4, 5 і 12 значення критерію наближається до нуля, тобто поточні чемпіони мали виражену перевагу серед моделей-кандидатів. На кроках 7–16 значення критерію мало велику кількість локально високих значень, що означало високу конкуренцію між моделями-кандидатами, а вибір моделі-чемпіона не був очевидним, що призводило до частой зміни обраного чемпіона. На фінальних вікнах експерименту конкуренція моделей знову зменшується і перемикавання моделі-чемпіона не відбувалось між вікнами 22 та 30 і фінальна модель-чемпіон мала відносно невелику перевагу. Візуалізацію динаміки значень

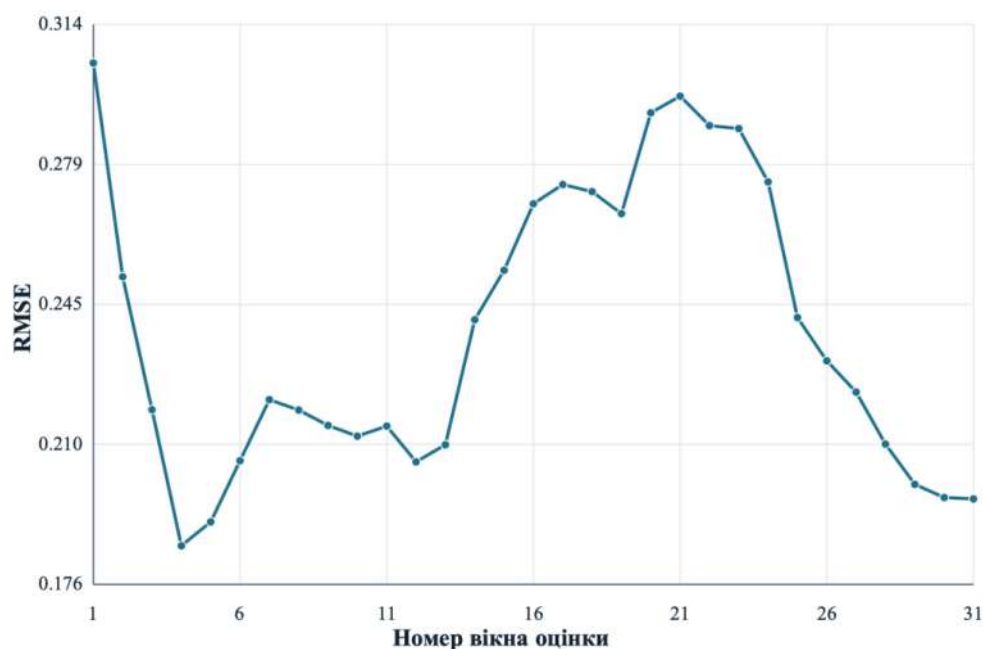


Рис. 1. Зміна критерію RMSE моделі-чемпіона у процесі адаптації

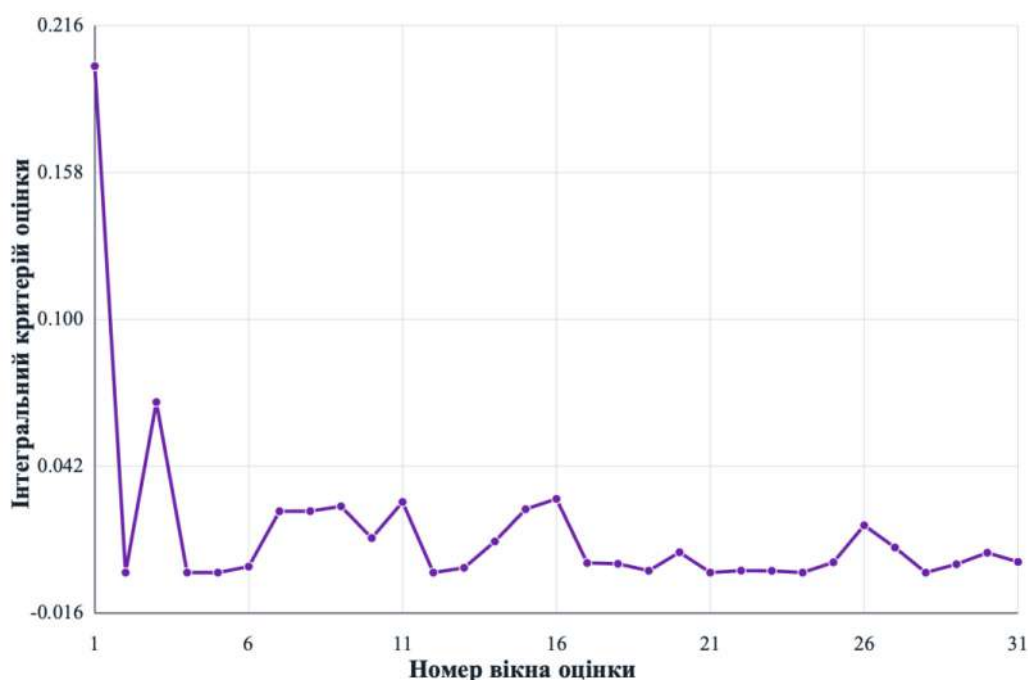


Рис. 2. Зміна значення інтегрального критерію оцінки моделі-чемпіона у процесі адаптації

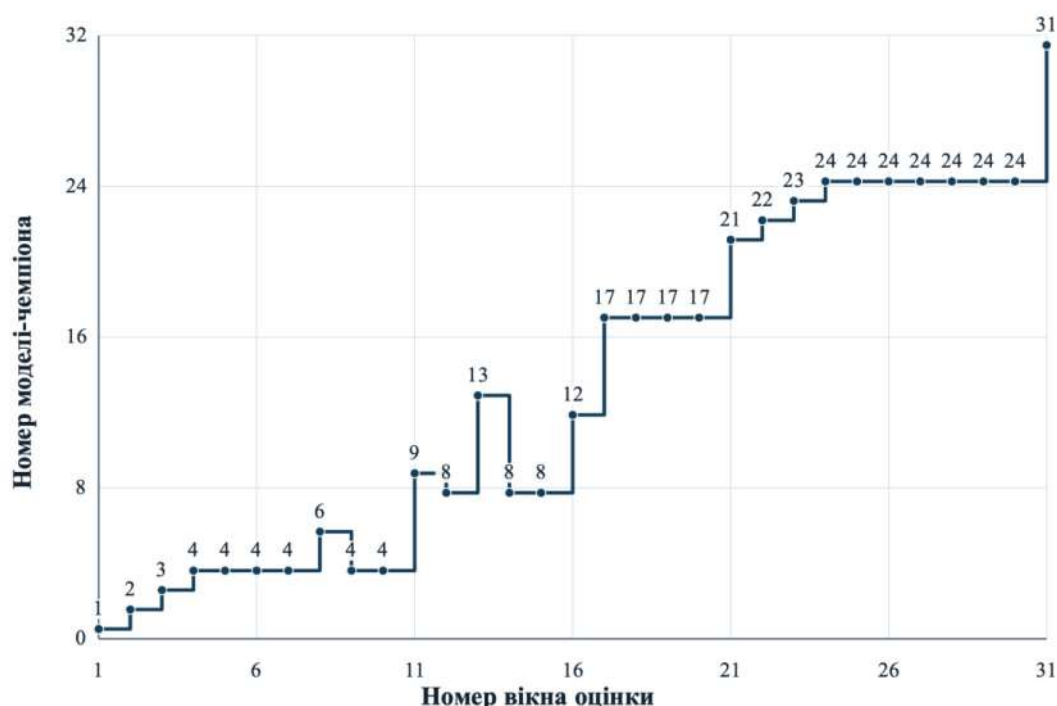


Рис. 3. Значення номера обраної моделі-чемпіона у процесі адаптації

інтегрального критерію оцінки зображено на рис. 2. Динаміку перемикань моделей чемпіонів зображено на рис. 3. Цікавим спостереженням є те, що на певних вікнах оцінки моделлю-чемпіоном обиралась модель із попередніх вікон, що була натренована на меншому об'ємі історичних даних, але показувала кращі показники точності прогнозів на актуальному вікні оцінки.

Висновки. Запропоновану модель оцінки та вибору моделі-чемпіона у задачах адаптації моделей прогнозування рівня споживання електроенергії до умов експлуатації кінцевим споживачем було реалізовано у рамках прототипу інформаційної технології та перевірено на реальних даних про рівень споживання електроенергії домогосподарством. Експеримент підтвердив, що модель дає змогу ефективно оцінювати інкрементально навчені моделі-кандидати та обирати модель-чемпіон із найкращими значеннями критеріїв на актуальному вікні оцінки. На основі отриманих даних експерименту можна побачити, що моделі навчені на більшій кількості історичних даних не завжди забезпечували найкращу якість прогнозів і запропонована модель оцінки та вибору дозволила попередити регрес у якості прогнозів прототипом інформаційної системи. У комбінації з ікрементальним навчанням моделей запропонована модель оцінки дозволила адаптувати модель прогнозування і покращити її RMSE на 35.3 % – з 0.304186 до 0.196611. Отриманий результат підтверджує практичну доцільність використання запропонованої моделі при запуску підсистеми прогнозування HEMS для споживачів із малою кількістю історичних даних із подальшою адаптацією до умов експлуатації їх мережі. Перспективою подальших досліджень є розширення моделі шляхом додавання нових критеріїв оцінки та вагових коефіцієнтів для врахування важливості точності прогнозів у часових точках найближчих до поточного моменту.

Список використаних джерел

1. Comparison of short-term forecasting methods of electricity consumption in microgrids / Y. V. Parfenenko та ін. *Radio electronics, computer science, control*. 2023. № 1. С. 14. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2023-1-2>
2. Bayram F., Ahmed B. S., Kassler A. From concept drift to model degradation: an overview on performance-aware drift detectors. *Knowledge-Based systems*. 2022. Т. 245. С. 108632. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2022.108632>

3. Deterioration of electrical load forecasting models in a smart grid environment / A. Azeem та ін. *Sensors*. 2022. Т. 22, № 12. С. 4363. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22124363>
4. Abulibdeh A., Zaidan E., Jabbar R. The impact of COVID-19 pandemic on electricity consumption and electricity demand forecasting accuracy: Empirical evidence from the state of Qatar. *Energy strategy reviews*. 2022. С. 100980. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100980>
5. Power system load forecasting using mobility optimization and multi-task learning in COVID-19 / J. Liu та ін. *Applied energy*. 2022. Т. 310. С. 118303. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118303>
6. Obst D., de Vilmarest J., Goude Y. Adaptive methods for short-term electricity load forecasting during COVID-19 lockdown in france. *IEEE transactions on power systems*. 2021. Т. 36, № 5. С. 4754–4763. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2021.3067551> (дата звернення: 26.03.2026).
7. Wee C. K., Nayak R. Adaptive load forecasting using reinforcement learning with database technology. *Journal of information and telecommunication*. 2019. Т. 3, № 3. С. 381–399. DOI: <https://doi.org/10.1080/24751839.2019.1596470>
8. AI governance in the system development life cycle / S. Laato та ін. *CAIN '22: 1st conference on AI engineering—software engineering for AI*, м. Pittsburgh Pennsylvania. New York, NY, USA, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1145/3522664.3528598>
9. Комін А. С., Бойко О. В. Прогнозування енергоспоживання у мікромережах: оцінка конвертованих моделей. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2025. Т. 2, № 1(92). С. 84–92. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.2.12>

Дата першого надходження статті до видання: 11.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



O. Boiko, A. Komin
Sumy State University

EVALUATION AND CHAMPION MODEL SELECTION IN THE ADAPTATION OF ELECTRICITY CONSUMPTION FORECASTING MODELS FOR SMART GRIDS

Summary

The article proposes a model for the evaluation and selection of a champion model in the tasks of adapting electricity consumption forecasting models to the operating conditions of the end consumer. The model applies a multicriteria approach to model evaluation using the RMSE, MAE, WAPE, and Skill metrics. It includes their normalization and combination into a single integral evaluation criterion. Together with the use of a common external evaluation window, this allows forecasting models trained in different time periods to be effectively compared. To reduce the frequency of probable champion model switching, a hysteresis rule was added to the evaluation and selection model. The proposed model was validated in scope of the information technology prototype using an LSTM forecasting model based on the TensorFlow Keras library. The experiment was conducted on real data on the household's hourly electricity consumption over 8 months. Based on these data, 31 time intervals with a 7-day step were formed, corresponding to a scenario of weekly updates of the forecasting model during its operation. As a result of the incremental training on the specified data intervals, a pool of candidate models was formed, and with the help of the proposed model, a champion model with the best forecasting quality was selected at each of the external evaluation windows. This made it possible to adapt the forecasting model used in the prototype of the information technology and improve its RMSE by 35.3 % compared with the initial version, which confirmed the effectiveness of the proposed model. The obtained results confirm the practical value of the model when deploying HEMS forecasting subsystems for consumers with a small amount of historical data, followed by adaptation to the operating conditions of their network.

Keywords: edge computing, machine learning, microgrids, energy consumption forecasting, TensorFlow Lite.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-20>

УДК 625.681.5

С. В. Гайдукевич, ст. викладач

ORCID: 0000-0001-5910-5921

Н. П. Семенова, ст. викладач

ORCID: 0000-0002-8478-9429

*Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України
«Бережанський агротехнічний інститут»*

e-mail: SoleykoS@i.ua

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОДВИГУНА НА ОСНОВІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДІАГНОСТИКИ ТА АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ

Анотація. У статті розглянуто проблему підвищення ефективності та надійності асинхронного електродвигуна приводу головного робочого органу екструдера в умовах змінного технологічного навантаження. Проаналізовано аналіз методів контролю, діагностування та керування електроприводами. Запропоновано інтелектуальну систему діагностування та адаптивного керування електродвигуном приводу екструдера, яка забезпечує комплексний підхід до аналітичного оцінювання технічного стану, прогнозування розвитку дефектів, оптимізації режимів роботи та запобігання аварійним ситуаціям на основі багатоканального вимірювання, цифрової обробки сигналів і інтелектуальних методів аналізу. Ця система є комплексом апаратно-програмних модулів, що взаємодіють у реальному часі з електродвигуном, датчиками відповідних технологічних параметрів та операторським інтерфейсом.

На відміну від існуючих методів діагностування технічного стану та систем адаптивного керування, які здебільшого не забезпечують переходу від реактивного технічного обслуговування до проактивного, запропонована інтелектуальна система характеризується значно вищим рівнем функціональності, інформаційної насиченості, адаптивності та здатністю до самодіагностики. Використання такої системи не лише підвищує надійність, енергоефективність і довговічність електродвигуна, але й сприяє стабільності технологічного процесу, зниженню енергетичних витрат та зменшенню обсягу регламентного технічного обслуговування.

Дана інтелектуальна система діагностування і адаптивного керування електродвигуном дозволяє своєчасно визначати аномалії, аналізувати темп зростання температури ізоляції та прогнозувати момент досягнення критичних значень, що суттєво знижує ймовірність відмови електродвигуна та підвищує надійність технологічного процесу в цілому.

Використання запропонованої інтелектуальної системи дає можливість технологічній лінії екструдуювання кормових сумішей і харчових продуктів перевести від концепції роботи за встановленим режимом до принципів Smart-систем з виконавчими функціями автоматичного адаптування та самодіагностування. Для екструдерів цей перехід є особливо важливим, оскільки їх продуктивність, стабільність параметрів кінцевого продукту та енергоефективність значною мірою залежать від рівня автоматизації електроприводу.

Ключові слова: інтелектуальна система, адаптивне керування, діагностування, надійність, сучасні технології, привід екструдера.

Постановка проблеми. В умовах стрімкого розвитку цифровізації трифазні електродвигуни й надалі залишаються основним елементом автоматизованих технологічних процесів. Найбільшого поширення набули трифазні асинхронні електродвигуни як у промисловості, так і в сільському господарстві, оскільки вони відзначаються простотою конструктивного виконання та обслуговування, стійкістю до перевантажень, високим коефіцієнтом корисної дії та здатністю до тривалої безперервної роботи. Водночас ускладнення технологічних процесів, зростання вимог до енергоефективності, надійності та оптимізації виробництва зумовлюють необхід-

ність розширення функціональних можливостей електроприводів шляхом переходу від традиційних підходів Industry 3.0, що характеризувалися статичними автоматизованими системами, до гнучких інтелектуальних та адаптивних рішень [1, с. 9], здатних оперативно реагувати на змінні умови експлуатації та технологічні збурення. Інтеграція асинхронних електродвигунів із сучасними інформаційними, комунікаційними та керуючими технологіями переводять їх на новий технічний рівень – рівень інтелектуальної кіберфізичної системи виробництва. Отже, безвідмовна робота електродвигунів є критично важливою для стабільного функціонування технологічного процесу. Своєчасне виявлення можливих проблем дозволяє уникати аварій і забезпечувати стабільну роботу [2, с. 25]. Оскільки будь-які збої призводять до простоїв, зниження продуктивності та збільшення експлуатаційних витрат.

Приводи екструдерів працюють в умовах випадкових механічних та термічних впливів, зокрема: підвищеної вібрації, періодичних ударних навантажень, локального перегріву та значних змін крутного моменту, що призводить до прискореного старіння ізоляції, деградації підшипників і механічних елементів та зниження загального ресурсу приводу. Системи керування електродвигуном приводу екструдера вимагають точного налаштування цілого масиву параметрів, що в свою чергу, ускладнює введення їх в експлуатацію [3, с. 27]. Існуючі системи керування електроприводами, що базуються на застарілих принципах, часто не дозволяють повною мірою реалізувати потенціал сучасного електромеханічного обладнання [4], а саме не виявляють прихованих дефектів і не прогнозують залишковий ресурс, що не дає можливості формування повноцінної системи захисту та своєчасного попередження аварійних ситуацій. Тому актуальним є створення більш прогресивних систем керування, здатних до адаптації змінним умовам навантаження, глибокої аналітичної обробки даних в реальному часі та превентивного захисту електропривода.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз опрацьованих публікацій показав, що сучасні дослідження у сфері електроприводів спрямовані на підвищення ефективності, гнучкості керування та надійності електродвигунів. Значна кількість науковців зазначає, що розв'язання цієї складної науково-технічної проблеми можливе шляхом впровадження високо-ефективних адаптивних систем керування. На сьогодні, як вважають науковці Паранчук С. В., Ухачевич Я. П., Олейніков М. О., Демішонков Я. В., Бурмістенков О. П. та інші, найбільш інтенсивного розвитку такі системи набули саме в технічних галузях, зокрема в електроприводах складних технологічних установок.

Завдяки впровадженню нових технічних рішень [5, с. 3] і розвитку обчислювальних засобів розроблено велику кількість методів адаптивного управління, які відрізняються між собою припущеннями щодо моделей об'єктів і характеристик зовнішніх збурень, критеріїв якості функціонування синтезованих систем, а також алгоритмів адаптації [6, с. 49].

Виходячи з проведеного аналізу [7, с. 58] сучасних систем управління виявлено, що більшість адаптивних підходів орієнтовані переважно на стабілізацію окремих параметрів і не забезпечують комплексного врахування технічного стану електродвигуна в умовах нестаціонарних та швидкозмінних навантажень, що є характерним для процесів екструдування.

Метою дослідження є підвищення ефективності і надійності роботи асинхронного електродвигуна приводу екструдера та зниження питомих енерговитрат шляхом розроблення інтелектуальної системи діагностики і адаптивного керування, яка забезпечує безперервний моніторинг технічного стану, своєчасне виявлення відхилень і передаварійних режимів та динамічну корекцію параметрів керування відповідно до змін навантаження та умов експлуатації.

Виклад основного матеріалу. Однією з ключових причин, що визначають ефективність та надійність асинхронного електродвигуна приводу головного робочого органу екструдера, є підвищений тепловий знос ізоляції. Формування теплових перевантажень зумовлене низ-

кою чинників, що призводять до прискореної деградації ізоляційних матеріалів, втрати електричної міцності та виникнення міжвиткових замикань у статорних обмотках. Додатково слід зазначити, що значна частина відмов виникає через підвищену вібрацію [8] та зношування механічних елементів приводу. Унаслідок дії цих факторів суттєво підвищується ймовірність аварійних відмов, скорочується напрацювання на відмову та зростає потреба у регламентному технічному обслуговуванні. Основною передумовою зниження відмов в період експлуатації є своєчасне діагностування і прогнозування поточного стану електродвигуна в ракурсі його впливу на період безвідмовної роботи [9, с. 55]. Саме тому питання контролю технічного стану приводу набуває особливої актуальності при роботі в умовах змінного та важкопрогнозованого навантаження.

Водночас експлуатаційні фактори створюють додаткові проблеми при виборі засобів діагностування та захисту електродвигунів від аварійних режимів. За останні роки було запропоновано велику кількість [3, с. 25] методів діагностування асинхронних електродвигунів. Поглиблений огляд та порівняння цих підходів свідчить, що не всі вони однаково ефективні в умовах реальної експлуатації. Аналіз сучасних практик технічного сервісу електродвигунів дає змогу виокремити найбільш ефективні методи, серед яких можна виділити наступні: вібраційний метод оцінки технічного стану електродвигуна, спектрострумний аналіз та спосіб моделювання [10, с. 52], який передбачає створення комп'ютерної моделі двигуна і її інтеграцію з устаткуванням за допомогою системи датчиків.

Слід зазначити, що в процесі експлуатації електроприводів змінюються їх динамічні і статичні характеристики через модифікації параметрів (опорів резисторів, індуктивностей, коефіцієнтів підсилення і передачі), а також впливів [11, с. 151] зовнішніх та внутрішніх збурюючих факторів.

Існуючі адаптивні алгоритми керування поділяються на три основні групи: безпошукові адаптивні системи з еталонною моделлю, що описується динамічною ланкою з бажаною передавальною функцією; безпошукові системи зі спостережним пристроєм, який виконує функцію ідентифікації об'єкта керування його частин і представляє собою відповідну математичну модель [12, с. 293]; пошукові адаптивні системи, у яких показник якості досягається шляхом введення в систему спеціальних пошукових сигналів. У безпошукових (аналітичних) системах критерій якості розраховується аналітично за допомогою спеціального обчислювального пристрою [11, с. 153]. Проте кожен із зазначених підходів, застосований окремо, не забезпечує перехід від реактивного технічного обслуговування до проактивного, що базується на безперервному зборі діагностичної інформації, ранньому виявленні небезпечних тенденцій та автоматичній адаптації керування за змінних умов роботи.

З огляду на недетермінований характер зміни технологічних параметрів [13, с. 42], а також наведені вище обмеження сучасних традиційних підходів, критично важливим є розроблення інтелектуальної системи, здатної у реальному часі контролювати температурний режим, вібраційні процеси, струмові навантаження та параметри якості живлення. Запропонована інтелектуальна система діагностування і адаптивного керування електродвигуном потужністю 30 кВт зі швидкістю обертання 1470 об/хв, який працює у складі електропривода головного робочого органу – шнеку екструдера, дозволяє своєчасно ідентифікувати аномалії, аналізувати темп зростання температури ізоляції та прогнозувати момент досягнення критичних значень, що суттєво знижує ймовірність відмови електродвигуна та підвищує надійність загального стану екструдера. Запропонована інтелектуальна система поєднує сучасні адаптивні алгоритми з методами оперативного діагностування і прогнозування технічного стану електродвигуна в режимі реального часу. Вона забезпечує оцінювання ступеня зношування його основних вузлів, своєчасне виявлення передаварійних станів, а також автоматичний захист від перевантажень і аварійних режимів роботи (табл. 1).

Таблиця 1

Типові несправності, які виявляє система

Тип несправності	Ознака	Методи виявлення
Міжвиткове коротке замикання у статорних обмотках	Збільшення струму, нагрів	Аналіз гармонік струму
Порушення симетрії або дисбаланс фаз живлення	Різниця струмів між фазами	Аналіз фазних струмів
Знос та руйнування підшипникових вузлів	Вібрації, шум	Спектральний аналіз вібрацій
Розбаланс ротора або механічна ексцентриситетність	Зміна частоти обертів, вібрації	Аналіз струмів та вібрацій
Перевантаження електродвигуна та перегрів обмоток	Температура обмотки	Термоконтроль

Окрім електромеханічних дефектів, система дозволяє ідентифікувати несправності, пов'язані із технологічним процесом екструзії. До них належать: заклинювання або часткове блокування гвинта шнека, що проявляється різким зростанням крутного моменту та споживаного струму, падінням частоти обертання і можливим спрацюванням теплового захисту; забивання робочої камери та накопичення матеріалу, при якому фіксуються нерівномірні зміни навантаження, характерні пульсації струму, періодичні піки вібрації, а також зміни тиску або моменту на виході, що свідчить про погіршення умов транспортування матеріалу.

Запропонована інтелектуальна система є комплексом апаратно-програмованих модулів, що взаємодіють у режимі реального часу з електродвигуном приводу екструдера, перетворювачем частоти, датчиками реєстрації технологічних параметрів та операторським інтерфейсом. Її архітектуру умовно поділено на декілька взаємопов'язаних функціональних блоків:

- блок збору інформації забезпечує реєстрацію контрольованих параметрів електродвигуна: $x(t) = \{i(t), u(t), \omega(t), T(t), M(t), s(t)\}$,

де $i(t)$ – струм фаз, $u(t)$ – напруга, $\omega(t)$ – кутова швидкість, $T(t)$ – температура, $M(t)$ – електромагнітний момент, $s(t)$ – ковзання (розрахункове значення);

- блок первинної обробки інформації виконує фільтрацію шумів, нормалізацію та перетворення сигналів у формат, придатний для подальшого аналізу: $X_{f(t)} = F(X(t))$,

де F – цифровий фільтр або оператор попередньої обробки;

- блок інтелектуальної діагностики проводить по реальних параметрах $\hat{R}_s, \hat{R}_r, \hat{X}_s, \hat{X}_r$ оцінювання поточного технічного стану електродвигуна на основі ідентифікації параметрів обмоток і магнітного кола:

$$\theta(t) = \theta(t-1) + \gamma e(t)x(t),$$

де $\theta = \{\hat{R}_s, \hat{R}_r, \hat{X}_s, \hat{X}_r\}$ – параметри, $e(t)$ – похибка між виміряною реальною та модельною величиною;

блок прогнозування та виявлення відхилень визначає ступінь розбіжності реальних параметрів із нормованими значеннями, виявляє аномальні режими та прогнозує ймовірність виникнення відмов

$$\hat{M}_s(t - \Delta t) = aM_c(t) + bM_c(t-1),$$

або з використанням моделей машинного навчання: $\hat{M}_s = f(i, \omega, s, T)$;

- блок моніторингу та інтерфейсу оператора забезпечує візуалізацію параметрів у режимі реального часу та надає оператору доступ до діагностичної та прогнозної інформації:

$$x(t) = \{i(t), u(t), \omega(t), T(t), M(t), s(t)\};$$

– блок адаптивного керування формує керуючі команди та регулює параметри частотно-регульованого електроприводу:

$$f(t) = f_0 + K_1 e_\omega + K_2 \int e_\omega dt,$$

де $e_\omega = \omega_{зад} - \omega(t)$, керування напругою $U(t) = U_0(1 + k_s s(t))$;

– блок апаратного захисту оперативно реагує на критичні режимні відхилення параметрів та забезпечує захист електродвигуна.

Захист активується, якщо $i(t) > K_I I_{ном}$, $T(t) > T_{max}$, $s(t) > s_{кр}$,

аварійний алгоритм $u(t) = 0 \Rightarrow M(t) = 0$;

– блок комунікації та архівації забезпечує обмін даними з системами верхнього рівня та запис у базу даних.

Узагальнений цикл функціонування описується системою:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Моніторинг: } x(t) \\ \text{Діагностика: } \hat{\theta}(t) = g(x(t)) \\ \text{Прогноз: } \hat{M}_s(t + \Delta t) = h(x(t)) \\ \text{Адаптивне керування: } u(t) = F(x, \hat{\theta}, \hat{M}_s) \\ \text{Захист: } u(t) = 0, \text{ якщо } x(t) - \text{зона небезпеки} \end{array} \right.$$

Таким чином, кожний блок включає як апаратну складову (сенсори, перетворювач частоти, контролери, модулі захисту), так і програмну складову (алгоритми обробки (фільтрації), діагностики, прогнозування, SCADA-візуалізація). Разом вони формують самонавчальний замкнений цикл моніторингу, оцінювання стану, оптимізації керування та багаторівневого захисту асинхронного електродвигуна (рис. 1).

Кожний з цих блоків виконує визначений набір функцій, а їх взаємодія забезпечує адаптивне керування електродвигуном. Така системна архітектура дає змогу мінімізувати кількість аварійних зупинок, підвищити енергоефективність обладнання та забезпечити прогнозовану, безвідмовну експлуатацію асинхронного електродвигуна.

Розроблена інтелектуальна система отримує інформацію від комплексу датчиків, які реєструють фактичні робочі параметри асинхронного електродвигуна приводу шнека екструдера у процесі виконання технологічної операції. Датчики фіксують наступні контрольовані параметри процесу:

- струм електродвигуна – для оцінки навантаження та виявлення перевантаження;
- температури обмоток та корпусу – для виявлення теплових перевантажень та ризику деградації ізоляції;
- вібраційні параметри та зміни струму – як індикатори розвитку механічних дефектів (знос підшипників, дисбаланс ротора, перекоси);
- крутний момент або тиск на виході шнека – для оцінки рівня технологічного навантаження;
- швидкості обертання – як відображення фактичного режиму та енергетичного стану приводу.

Порівнюючи зібрані параметри з паспортними та нормованими значеннями, система на основі математичної моделі визначає перевантаження за моментом і струмом. За величиною відхилення та темпом його зміни виконується прогноз можливого перегріву, механічної відмови або аварійної ситуації. Інтелектуальна система виконує безперервний моніторинг технічного стану електродвигуна та відображає ключові параметри в режимі реального часу (рис. 2), зокрема:

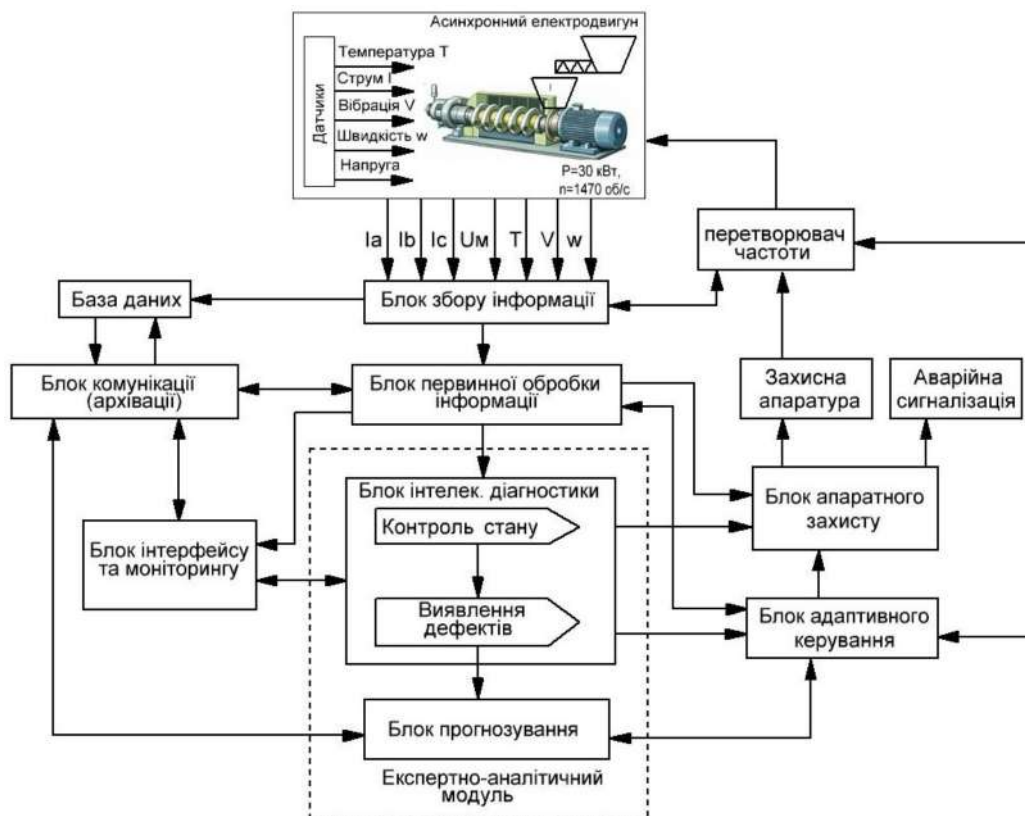


Рис. 1. Структурна схема інтелектуальної системи моніторингу, контролю, діагностики, прогнозування, адаптивного керування і захисту двигуна 30 кВт

– динаміка навантаження шнека екструдера (рис. 2, а) відображає коливання крутного моменту під час робочого циклу та ідентифікує ділянки підвищеного і зниженого опору матеріального потоку;

– зміна фазного струму електродвигуна (рис. 2, б) демонструє залежність споживаного струму від прикладеного навантаження. Короткочасні пікові значення струму свідчать про підсмоктування матеріалу, нерівномірну подачу, або пульсації тиску у робочій камері екструдера;

– тепловий режим обмоток та корпусу двигуна (рис. 2, в) характеризує зміну температури в залежності від навантаження. У фазах зменшення крутного моменту відбувається відповідне зниження тепловиділення та охолодження машини.

У разі виходу контрольованих параметрів за допустимі межі реалізується адаптивне втручання – автоматична корекція частоти обертання, зміни швидкості подачі сировини або навантаження на механізм (рис. 3). Одночасно система забезпечує захист електродвигуна від перевантаження, перегріву та аварійної зупинки. Всі виміряні параметри та події зберігаються в архіві, що дає можливість формувати історію експлуатації, проводити глибокий аналіз та підвищувати точність прогнозування на основі накопичених даних.

У ході досліджень спостерігалися характерні коливання струму, обумовлені нерівномірністю подачі сировини та змінами моменту опору на валу. Порівняльний аналіз (рис. 4) показав, що використання інтелектуальної системи керування дозволяє зменшити середній струм статора на 6–10 % та пікові значення на 15–20 %, а температура обмоток знижується на 8–12 % у всьому діапазоні навантажень, що свідчить про зниження теплових втрат і підвищення енергоефективності та надійності електропривода.

При прямому пуску асинхронного електродвигуна напруга мережі подається безпосередньо на обмотки статора. Як відомо, у початковий момент ковзання ротора дорівнює одиниці $s = 1$,

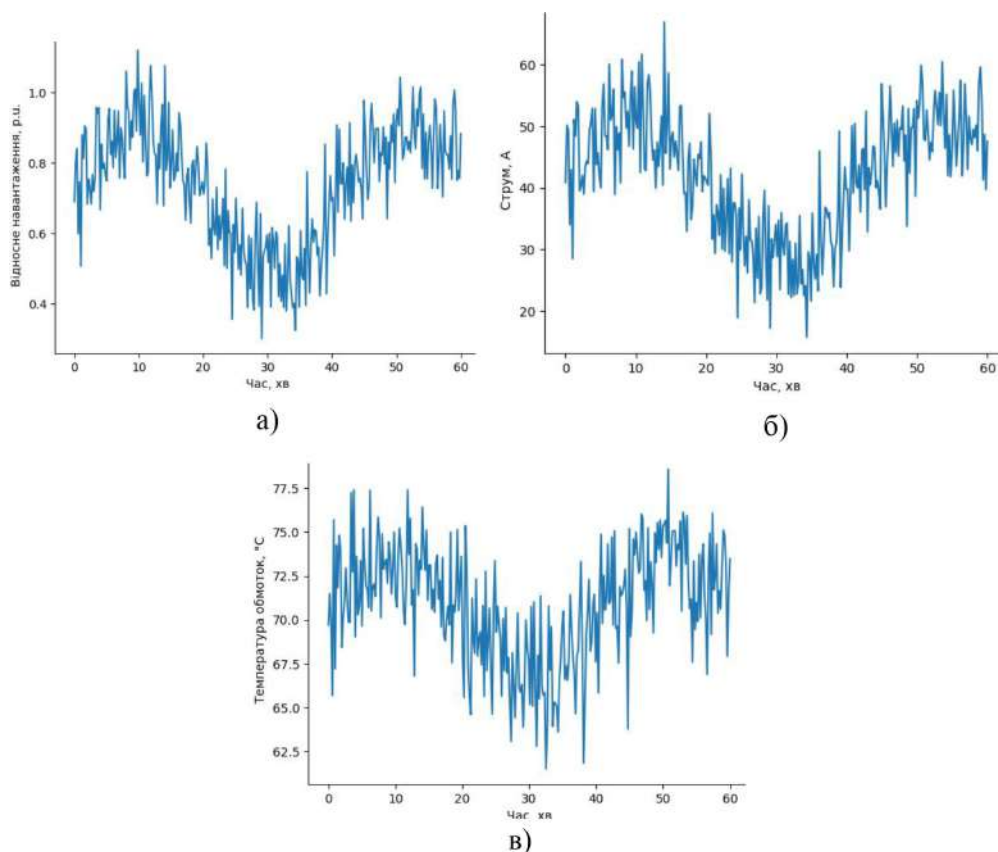


Рис. 2. Вихідні часові характеристики

а) – динаміка навантаження на шнек; б) – зміна фазного струму двигуна; в) – тепловий режим двигуна

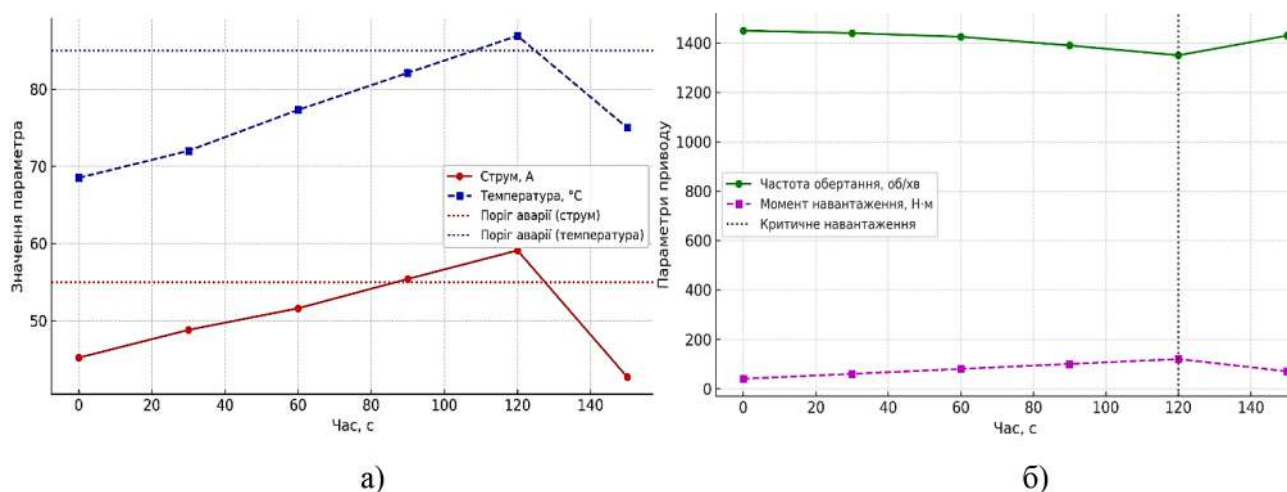


Рис. 3. Експериментальні результати електродвигуна приводу екструдера при зміні навантаження

а) – динаміка струму та температури; б) – динаміка частоти обертання та моменту навантаження

а швидкість обертання становить нуль. Це призводить до різкого зростання пускового струму, що сягає $\approx 7 \cdot I_n$, та створює значні теплові й електромагнітні перевантаження. Одночасно формується електромагнітний пусковий момент, який становить $\approx 2,2 \div 2,5 \cdot M_n$, який спричиняє ударні механічні навантаження. Сукупність цих факторів негативно впливає на надійність, енергоефективність, довговічність та безвідмовність електроприводу.

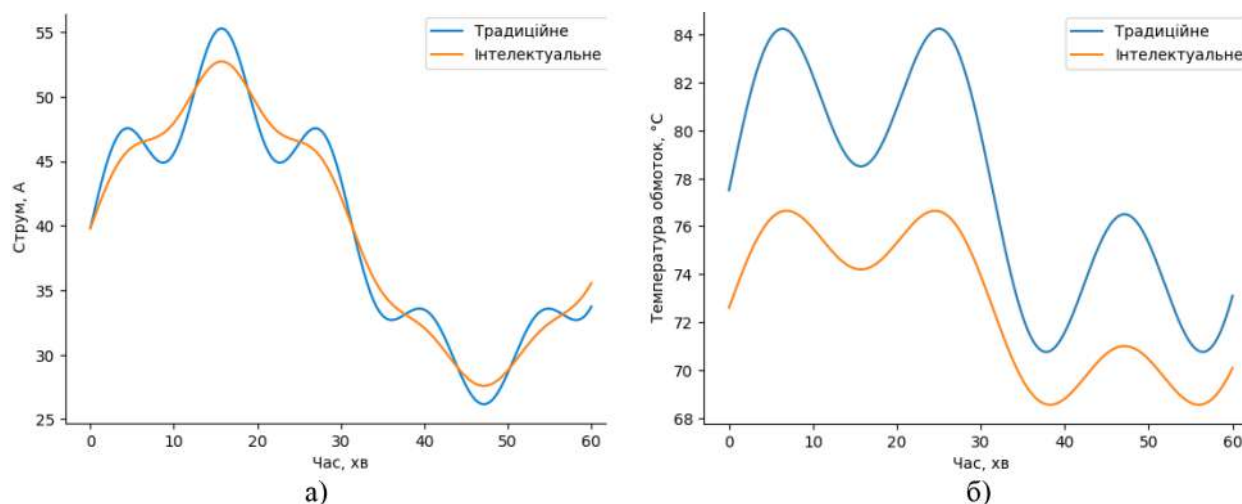


Рис. 4. Порівняльні результати досліджень із використанням традиційної системи керування та інтелектуальної системи

а) – динаміка струму; б) – динаміка температури обмоток

Застосування інтелектуального адаптивного керування приводом шнека екструдера дозволило істотно знизити струм під час пуску. Пусковий струм обмежується до рівня $2,2 \div 2,5 \cdot I_n$ (рис. 5, а), та пусковий електромагнітний момент – до $1,5 \cdot M_n$ (рис. 5, б), що безпосередньо зменшує електромеханічні напруження у валу та інших елементах механічної передачі.

Таким чином, у розробленій інтелектуальній системі реалізовано алгоритм плавного пуску на основі частотного перетворювача з контролером струмових параметрів у реальному часі.

За результатами експериментальних випробувань встановлено, що температура обмоток статора різко зростає при тривалих пікових навантаженнях, спричинених нерівномірністю подачі сировини. Використання алгоритмів інтелектуального діагностування та адаптивного регулювання дозволило знизити пікові значення струму приблизно на 65–70 %, а максимальний електромагнітний момент – на 40–45 %, що забезпечило стабілізацію теплового режиму та підвищення надійності електроприводу.

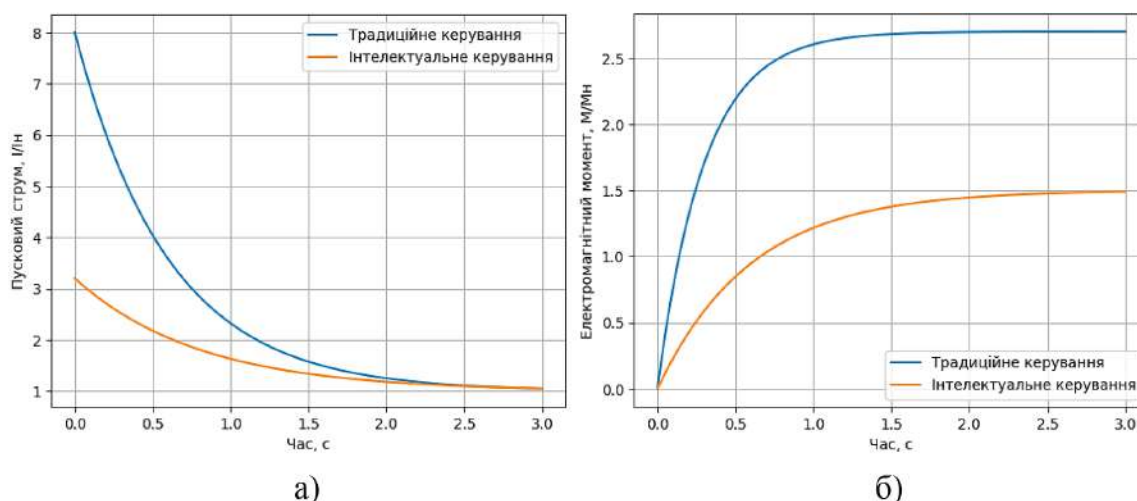


Рис. 5. Порівняльні характеристики пускових струмів та моментів асинхронного електродвигуна потужністю 30 кВт

а) – характеристики пускових струмів; б) – характеристики пускових моментів

При традиційному прямому пуску максимальні дотичні напруження у валу сягають близько 150 МПа, тоді як при адаптивному пуску вони знижуються до 100–105 МПа. Отже, зменшення механічних напружень становить приблизно 30 %, що сприяє продовженню ресурсу вала шнека, зменшенню зношування та підвищенню загальної надійності і довговічності електроприводу.

У перехідному режимі момент змінюється за експоненціальним законом:

$$M(t) = M_n + (M_{\text{пуск}} - M_n)e^{-t/\tau},$$

де τ – електромеханічна стала.

Аномальні режими функціонування асинхронних електродвигунів є ключовою передумовою виникнення аварійних ситуацій. У рамках дослідження було проведено імітацію основних типів порушень, зокрема перевантаження, заклинювання та блокування шнека, дефектів підшипникових вузлів, дисбалансу ротора, пропадання однієї фази та імпульсних провалів напруги живлення. Це дало змогу всебічно проаналізувати поведінку електроприводу у режимах, що потенційно призводять до відмови. У таблиці 2 наведено параметри стану асинхронного електродвигуна потужністю 30 кВт приводу екструдера для різних режимів його роботи.

Таблиця 2

Параметри стану електродвигуна потужністю 30 кВт для різних режимів роботи

Параметр	Холостий хід	Номінальне навантаження	Перевантаження +20 %	Аварійне гальмування (зростання моменту)
Швидкість, об/хв	1490	1470	1430–1450	1380 → 0
Ковзання s , %	0.7–1	2	4–6	8–12
Струм, A	18–22	56–60	68–75	80+ (захист)
Активна потужність P , кВт	3–4	30	35–40	40+
Реактивна потужність Q , кВАр	6–8	20	23–28	30+
$\cos\varphi$	0.25–0.35	0.85–0.87	0.78–0.82	0.7–0.75
Крутний момент M , Н · м	10–20	~195	230–260	280–300
Температура обмоток, °C	40–45	65–75	80–95	100+ (захист)
Вібрація, мм/с	1–2	2–3	3–5	>5 (підшипники/удари)
Нагрів підшипників	Мінімальний	Нормальний	Прискорений	Небезпечний
Режим охолодження	Недовантаження	Оптимальний	Напружений	Екстремальний
Стан	Стабільний	Нормальний	Критичний контроль	Аварійний/Вимкнення

Використання запропонованої інтелектуальної системи забезпечує перехід технологічних ліній екструдювання кормових сумішей і харчових продуктів від роботи за фіксованими режимами до концепції Smart-виробництва, що передбачає автоматичну адаптацію параметрів та функції самодіагностування. Для екструдерного обладнання такий перехід є критично важливим, оскільки продуктивність, стабільність параметрів готової продукції та енергоефективність безпосередньо визначаються рівнем автоматизації та інтелектуалізації електроприводу.

Висновки. Використання алгоритмів інтелектуального діагностування та адаптивного керування дало змогу виявляти передаварійні стани, пов'язані з перевантаженням і зростанням температури обмоток, на ранніх етапах та автоматично коригувати режими роботи електроприводу. Це забезпечило зниження питомих енерговитрат екструдера в середньому на 8–12 % та підвищення стабільності технологічного процесу екструдювання в умовах змінного навантаження. Запропонована інтелектуальна система дозволяє забезпечити більш високий рівень захисту та діагностування електродвигуна приводу екструдера порівняно з існуючими системами адаптивного керування. Вона дає можливість здійснювати безперервний моніторинг, глибоку аналітичну обробку параметрів, прогнозування технічного стану та адаптивну корекцію режимів роботи. Використання такої системи сприяє підвищенню енергоефективності,

надійності електродвигуна та продуктивності екструдера, зменшенню експлуатаційних витрат та продовженню ресурсу роботи електроприводу.

Результати досліджень підтверджують доцільність та ефективність запропонованої архітектури, можливість подальшого впровадження у промислові електроприводи де динамічні коливання навантаження є причиною підвищеної аварійності та зменшеного ресурсу роботи електродвигунів. Такі рішення на сьогоднішній день актуальні у контексті розвитку концепцій цифровізації виробництва, автоматизації й промислової аналітики. Такі інтелектуальні системи у сільському господарстві – це високоперспективне майбутнє.

Список використаних джерел

1. Боднар Б. Є., Очкасов О. Б. Інтелектуальні технології Industry 4.0: трансформація управління локомотивним господарством. *Прогресивні технології засобів транспорту*: матеріали 2-ої міжнародної науково-технічної конференції (Харків, 05–06 грудня 2024 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2024. С. 9–10. URL: <http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/28786/1/%d0%91%d0%be%d0%b4%d0%bd%d0%b0%d1%80.pdf>
2. Сумцов А. Л., Білоус Д. К. Перспективи розвитку систем діагностування ходових частин тягового рухомого складу. *Прогресивні технології засобів транспорту*: матеріали 2-ої міжнародної науково-технічної конференції (Харків, 05–06 грудня 2024 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2024. С. 25–26. URL: <http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/28794/1/%D0%A1%D1%83%D0%BC%D1%86%D0%BE%D0%B2.pdf>
3. Олейніков М. О. Система автоматичного керування електроприводом мостового крану з урахуванням пружних зв'язків. *Електротехніка та електроенергетика*. Розділ «Електротехніка». 2024. № 3. С. 25–35. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2024-3-3>.
4. Оріховський М. І., Грабко В. В. Модернізація системи керування електропривода механізму переміщення мостового крану. *Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2025)*: матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції (Вінниця, 15–16 червня 2025 р.). Вінниця: ВНТУ, 2025. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2025/paper/view/25572>
5. Ситнік Б. Т., Брикєн В. О., Давидов І. В. Моделі і методи створення систем реалізації графіків руху високошвидкісних поїздів з адаптивною корекцією швидкості за фактичними параметрами проїзду. Частина 2. Аналіз способів управління швидкістю поїзда з тяговими двигунами постійного та змінного струму. *Інформаційно – керуючі системи на залізничному транспорті*, 2022. № 1. С. 3–18. DOI: 10.18664/iksz.v27i1.254087. URL: <http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/8667/3/Sytnik.pdf>
6. Паранчук С. В., Ухачевич Я. П. Побудова адаптивної системи управління конкурентоспроможністю продукції регіону. *Регіональна економіка*, 2011. № 4. С. 48–56. URL: https://re.gov.ua/re201104/re201104_048_ParanchukSV,UkhachevychYaP.pdf
7. Моргунов М. М. Розробка методу передачі інформації всередині статичного зображення для мобільних роботів. Автоматизація та приладобудування («Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2023) [Електронний ресурс]: збірник студентських наукових статей / Харківський національний університет радіоелектроніки; [редкол.: І. Ш. Невлюдов та ін.]. Харків : ХНУРЕ, 2023. Вип. 2. С. 56–60. URL: <https://openarchive.nure.ua/handle/document/24975>
8. Павленко Т. П., Шавкун В. М., Петренко В. М. Шляхи підвищення експлуатаційної надійності тягових електродвигунів рухомого складу електричного транспорту. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. Харків, 2015. Вип. 6/10 (78). URL: <https://www.neliti.com/publications/307385/ways-to-improve-operation-reliability-of-traction-electric-motors-of-the-rolling>
9. Губаревич О. В., Голубєва С. М. Аналіз методів діагностики технічного стану ізоляції асинхронних двигунів. *Всеукраїнський науковий збірник «Наукові праці Донецького національного технічного університету»*. Серія «Електротехніка і енергетика», 2019. С. 55–63. DOI: <https://doi.org/10.31474/2074-2630-2019-1-55-63>
10. Черезов А., Окушко О. В. Спектроскопічний метод діагностування електричних двигунів. *Енергозабезпечення, електротехнології, електротехніка та інтелектуальні управляючі системи в АПК*: матеріали 75-ої науково-практичної онлайн-конференції студентів (Київ, 12-13 травня 2022 р.). Київ : НУБіП України, 2022. С. 52–53. URI: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u37/zbirnik_tez_75_studentska_konferenciya.pdf
11. Демішонков Я. В., Максимків О. Є., Бурмістенков О. П. Безпошукові та пошукові системи адаптивного керування електроприводу. Сучасні електромеханічні та інформаційні системи: монографія / за заг. ред.

І. В. Панасюка. Київ: КНУТД, 2021. С. 151–159. URL: https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/19944/1/SEIS_mono_2021_P151-159.pdf

12. Баховець Б. О. Автоматизований електропривод. Навч. посібник. Рівне : НУВГП, 2010. 238 с.

13. Рутило М. І. Адаптивна система керування регульованим електроприводом дозаторів компонентів горіння несертифікованого біопалива. *Диверсифікація джерел енергії на базі використання альтернативних видів палива*: матеріали міжнародної науково-технічної онлайн конференції (м. Тернопіль, 8 червня 2021 року). Тернопіль : ТНПУ ім. В. Гнатюка, 2021. С. 42–46. URL: <http://dspace.tnpu.edu.ua/bitstream/123456789/21559/1/Rutulo.pdf>

Дата першого надходження статті до видання: 03.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



S. Haidukevych, N. Semenova

**Separated Subdivision of the National University of Bioresources and Nature Management
of Ukraine “Berezhansky Agrotechnical Institute”**

INCREASING THE EFFICIENCY AND RELIABILITY OF THE ELECTRIC MOTOR BASED ON AN INTELLIGENT DIAGNOSTIC SYSTEM AND ADAPTIVE CONTROL

Summary

The article considers the problem of increasing the efficiency and reliability of the asynchronous electric motor driving the main working body of the extruder under conditions of variable technological load. The analysis of methods of control, diagnostics and management of electric drives is analyzed. An intelligent system for diagnosing and adaptive control of the extruder drive motor has been proposed, which provides a comprehensive approach to analytical assessment of the technical condition, prediction of the development of defects, optimization of operating modes and prevention of emergency situations based on multi-channel measurement, digital signal processing and intelligent analysis methods. This system is a complex of hardware and software modules that interact in real time with the electric motor, sensors of the corresponding technological parameters, and the operator interface.

Unlike existing methods of diagnosing technical condition and adaptive control systems, which mostly do not provide a transition from reactive to proactive maintenance, The proposed intelligent system is characterized by a significantly higher level of functionality, information richness, adaptability, and the ability to self-diagnose. Using such a system not only increases the reliability, energy efficiency, and durability of the electric motor, but also contributes to the stability of the technological process, reduced energy costs, and reduced routine maintenance.

This intelligent system of diagnostics and adaptive control of the electric motor allows you to timely identify anomalies, analyze the rate of increase in insulation temperature and predict the moment when critical values are reached, which significantly reduces the probability of electric motor failure and increases the reliability of the technological process as a whole.

The use of the proposed intelligent system makes it possible to transfer technological lines for the extrusion of feed mixtures and food products from the concept of operating according to a set mode to the principles of Smart systems with executive functions of automatic adaptation and self-diagnosis. For extruders, this transition is especially important, since their productivity, stability of final product parameters, and energy efficiency depend largely on the level of automation of the electric drive.

Keywords: intelligent system, adaptive control, diagnostics, reliability, modern technologies, extruder drive.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-21>

УДК 621.312.17

В. В. Гузенко^{1,2}, канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0001-8171-9487

С. В. Галько², канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0001-7991-0311

С. В. Чаусов², канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0003-3811-9077

М. С. Сорокін¹, канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0002-7524-7687

Ю. М. Хандола¹, канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0001-9158-2955

¹ Державний біотехнологічний університет² Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: hnaghv@btu.kharkov.ua

РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТЕМПЕРАТУРИ ДВИГУНА В ЕЛЕКТРОПРИВОДІ ЗМІННОГО СТРУМУ

Анотація. У статті аналізуються нестационарні теплові процеси електричних машин, побудована проста математична модель для розрахунку температури статорної обмотки в асинхронному двигуні. Проаналізовано систему контролю температури обмотки двигуна. Експериментально досліджені температурні процеси у двигуні при складних режимах його роботи. Зазначено, що результати розрахунку за спрощеною моделлю теплового динамічного процесу значно відрізняються від експерименту, що підтверджує необхідність контролю температури обмоток двигуна та реальний час для параметричної корекції системи векторного управління електроприводом змінного струму.

Ключові слова: асинхронний електродвигун, електропривод, математична модель, аграрно-промисловий комплекс, температурні процеси.

Постанова проблеми. Однією з проблем, пов'язаних із побудовою бездатчикового векторного електроприводу змінного струму на базі асинхронного двигуна, є залежність електроприводу від зміни електричних параметрів двигуна під час обертання. Як показують дослідження, це залежить від зміни температури активних опорів електричного двигуна, та від зміни намагнічування залежно від електричних параметрів ланцюга. Рішенням цієї задачі при побудові векторного аналізатора стану асинхронного двигуна є використання регуляторів для параметричних показників, які залежать від швидкості обертання, що функціонують у перехідних режимах [1, 2]. Найбільш контрольованим параметром є параметрична адаптація, що може здійснюватися у реальному часі під час роботи електроприводу [2]. Перехідні теплові процеси в електричних двигунах, як показують дослідження, можуть мати місце під час роботи. Перелічені процеси спостерігаються у режимах гальмування, пуску, зміни навантаження та частоти обертання електричного двигуна [3, 4]. Важливе місце займають процеси неконтрольованого нагрівання при перевантаженнях, при частих і тривалих запусках електричного двигуна, а також при роботі їх у режимі короткого замикання, що характерно для електроприводу підйомно-транспортних засобів, які працюють в умовах підвищених вібрацій та ударних механічних навантажень [5]. Важливістю перехідних теплових режимів, або нестійких перехідних процесів, електричних двигунів є їх інерційність, що спостерігається у відставанні змін параметрів від усталених перехідних режимів [6]. Підвищена температура обмоток викликає зміну їх електричних параметрів, що тягне збільшення помилки управління в системах з моделлю двигуна. Введення в алгоритм керування додаткового розрахунку температури обмоток є актуальним напрямком для покращення режимів роботи системи і вимагає побудову теплової моделі для асинхронного двигуна по нагріванню.

Аналіз останніх досліджень. Як показують дослідження метод еквівалентних величин набуває найбільшого розповсюдження через простоту і легкість розрахунків, які використовуються для вибору двигуна за потужністю. Така методика заснована на застосуванні теплових опорів [7, 8], які з'єднуються в теплову мережу, що моделює всі шляхи передачі теплових процесів у електричній машині. Основним недоліком такого методу зазначено в тому, що він може не давати повної картини температурних процесів, проте спостережені були деякі середні параметри температури окремих частин двигуна. Водночас він вимагає повних відомостей про конструкційні параметри реального двигуна, які з паспортних даних на двигуні визначити не можна, та відомості про початкові значення температури обмоток та навколишнього середовища. Алгоритм управління приводу з такою тепловою моделлю двигуна, як показують дослідження, втрачає універсальність.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Дослідження процесів реалізації системи контролю температури двигуна в електроприводі змінного струму.

Під час вирішення поставленої мети були проведені довготривалі дослідження температурних процесів в електроприводі на кафедрі Електромеханіки та робототехніки в ДБТУ.

Для реалізації поставлених цілей статті необхідно вирішити наступні задачі:

- Прямим методом (експериментально) дослідити характер протікання теплових процесів при нагріванні електродвигуна (ЕД), отримати дані залежності $\tau = f(t)$;
- Непрямими методами, на основі даних експериментів, визначити сталі часу нагрівання ЕД;
- Дослідити спрощену модель двигуна як тіла нагрівання та скласти систему рівнянь;
- Розробити систему контролю температури двигуна в електроприводі змінного струму.

Основна частина. У роботі запропоновано контролювати температуру двигуна датчиками температури у реальному часі. Температуру елементів двигуна без контролю розраховувати через постійні коефіцієнти [14]. В роботі застосована тепла модель електричної машини, яка складається з двох циліндрів (рис. 1)

Зовнішній елемент із теплоємністю C_2 характеризує масу заліза електричного двигуна. В той же час внутрішній елемент, який має теплоємність C_1 – обмотки нерухомої частини двигуна. Потужність теплового потоку від сталі до навколишнього середовища пропорційна коефіцієнту A_2 .

У внутрішньому циліндрі передбачений канал, що характеризує відведення теплоти потоками повітря від внутрішніх частин машини. Проходження теплового потоку від нерухомої частини двигуна і міді до навколишнього середовища пропорційна коефіцієнту A_1 . При цьому теплопередача від міді і внутрішньої частини двигуна визначається коефіцієнтом A_{12} , що характеризує термічний опір ізоляції. Показаний тепловій моделі відповідає система рівнянь [9, 10]:

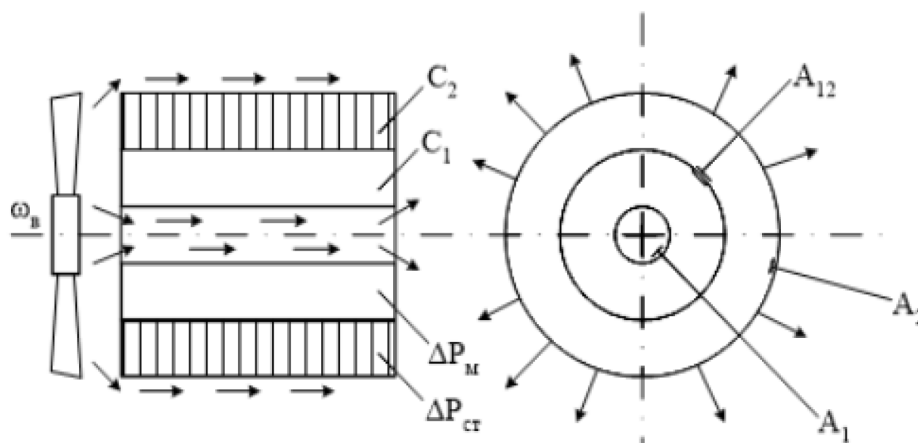


Рис. 1. Спрощена тепла модель електричної машини

$$\Delta P_m = A_{12}(\Delta\theta_m - \Delta\theta_{cm}) + A_1 \cdot \Delta\theta_m + C_1 \frac{d\theta_m}{dt}; \quad (1)$$

$$\Delta P_{cm} = A_2 \cdot \Delta\theta_{cm} - A_{12}(\Delta\theta_m - \Delta\theta_{cm}) + C_2 \frac{d\theta_{cm}}{dt}, \quad (2)$$

де $\Delta\theta_m$, $\Delta\theta_{cm}$ – перевищення температури міді та сталі більше ніж температура навколишнього середовища.

При дослідженні диференціальних рівнянь (1) та (2) з використанням комп'ютерних програм, наприклад, Simulink, яка відноиться до складу MatLab пакету, представили систему в операторній формі. Під час дослідження використовувались початкові параметри, такі як початкові показники температури міді та сталі:

$$A_{1*} \cdot \theta_m(p) - A_1 \cdot \theta_{\epsilon}(p) + A_{12} \cdot \theta_m(p) - A_{12} \cdot \Delta\theta_{cm}(p) + C_1[p \cdot \theta_m(p) - \theta_m(0)] = \Delta P_m(p); \quad (3)$$

$$A_{12} \cdot \theta_{cm}(p) - A_2 \cdot \theta_{\epsilon}(p) - A_{12} \cdot \theta_m(p) + A_{12} \cdot \Delta\theta_{cm}(p) + C_2[p \cdot \theta_{cm}(p) - \theta_{cm}(0)] = \Delta P_{cm}(p), \quad (4)$$

де $\theta_m(0)$ – початкова температура міді, °C;

$\theta_{cm}(0)$ – початкова температура сталі, °C.

Результати моделювання показників нагрівання з використанням у процесі досліджень асинхронного електричного двигуна марки Т2А80/2 представлені на рисунку 2.

Під час дослідження початкова температура повітря приймалася рівною 11 °C, початкові температури міді і сталі дорівнюють температурі навколишнього середовища.

В результаті дослідження було зафіксовано, що середня температура міді приймає значення 83 °C за 30 хв, постійна часу процесу 500 с.

При роботі приводу на низьких швидкостях та великих навантаженнях температурний режим двигуна швидко змінюється і для якісного керування необхідний контроль температури обмоток двигуна та параметрична адаптація системи, що здійснюється у реальному часі під час роботи приводу [11–18].

У роботі, під час вирішення завдання дослідження та побудови системи контролю температури, зупинилися на цифровому датчику температури DS18B20.

Запропоновано у блоці адаптації виконувати перерахунок параметрів регуляторів системи управління в залежності від зміни параметрів двигуна від реальної температури обмоток двигуна, що змінюється у процесі роботи приводу.

Контроль температури двигуна датчиками з аналоговими сигналами (термоперетворювач опору, термоелектричний перетворювач) вимагає складний фільтр електромагнітних перешкод [19, 20].

Датчик температури DS18B20 має цифровий інтерфейс та працює з контролером Arduino за протоколом передачі даних One-Wire® і дозволяє підключити кілька датчиків однією шиною.

У роботі використовувалося два датчики DS18B20: один кріпився на статорній обмотці, другий на корпусі статора. Програмований логічний контролер Arduino Uno та інструментальні засоби програмування забезпечують гнучкість, необхідне рішення широкого спектра завдань автоматизації, дозволяють реалізувати передачу даних WiFi. Віртуальний прилад для вимірювання температури обмотки двигуна створено в середовищі LabVIEW. Експериментальні дослідження температурного режиму двигуна (рис. 3) проводилися на лабораторному стенді, що включає перетворювач частоти VFD-У компанії Delta Electronics, асинхронний двигун Т2А80/2 ($P_{ном} = 1,1$ кВт, $n_{ном} = 2850$ об/хв, $I_{ном} = 7,4$ А, $M_{ном} = 30$ Н · м), навантажувальний агрегат, виконаний на основі генератора постійного струму (ГПТ) з незалежним збудженням 30М із вбудованими вимірником моменту та імпульсним датчиком швидкості. Стенд розроблений на основі апаратної платформи NI PXI компанії National Instruments, з програмним забезпеченням, розробленим з використанням технології віртуальних приладів у графічне середовище програмування NI LabVIEW.

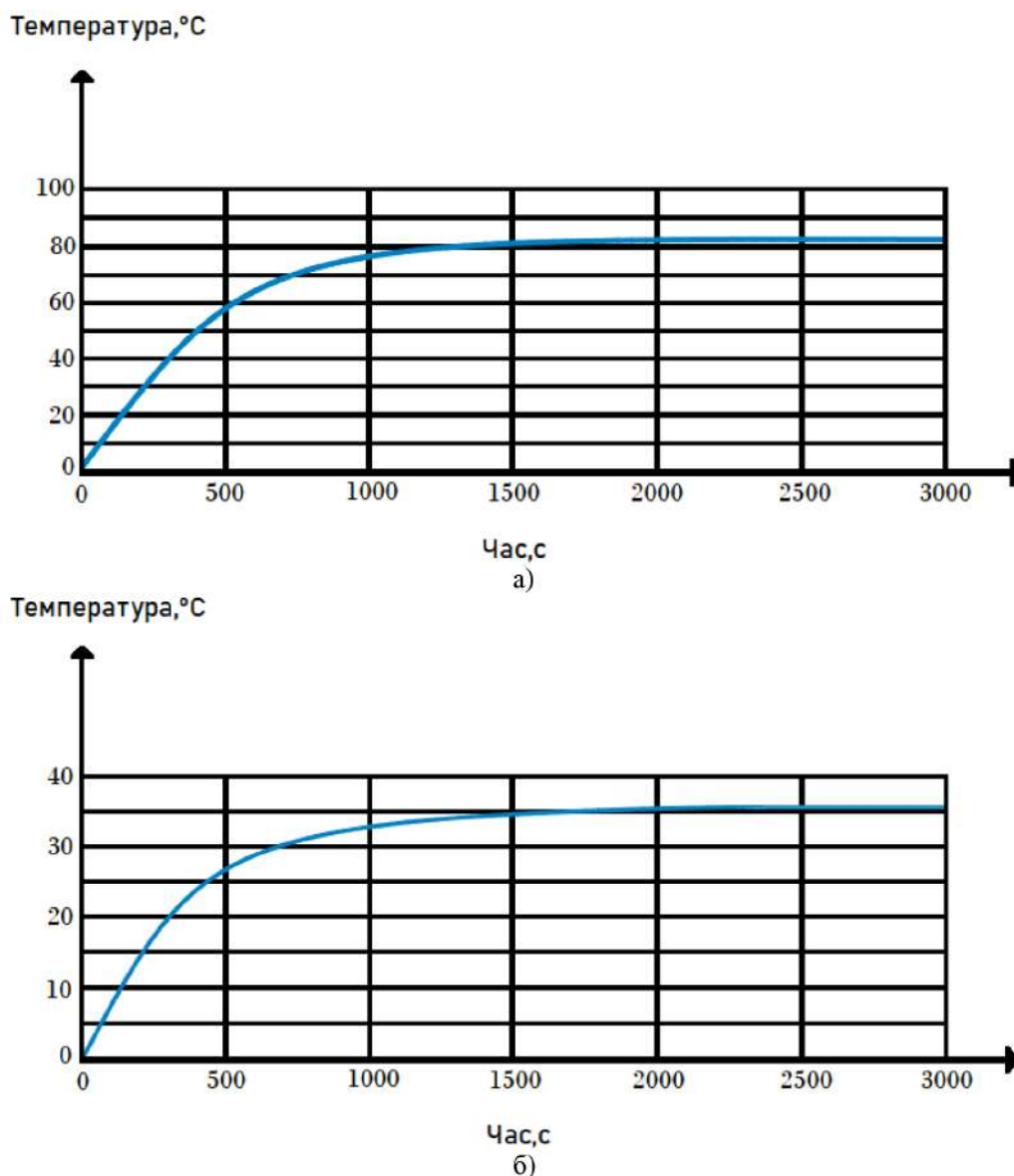


Рис. 2. Результати моделювання процесу нагрівання на прикладі асинхронного двигуна закритого виконання марки Т2А80/2
а) перевищення температури міді; б) перевищення температури сталі

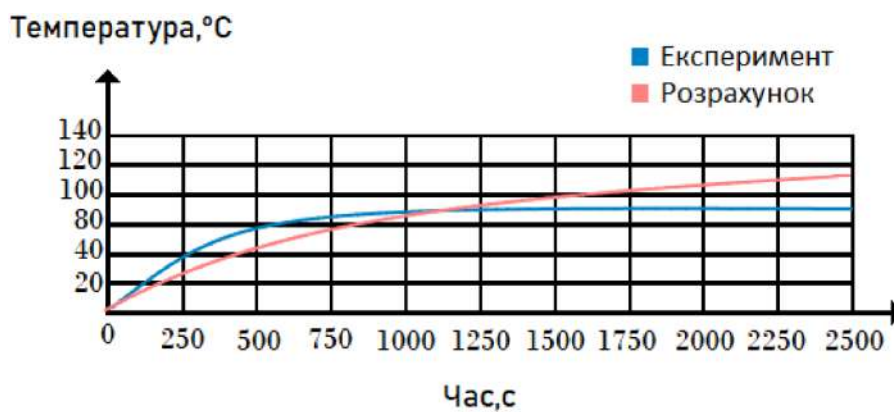


Рис. 3. Розрахункова та експериментальна перехідна характеристика перевищення температури міді обмотки статора

Висновки. Дослідження електромеханічної системи при номінальній швидкості обертання та 50 % номінального навантаження спостерігалось перевищенням температури статора на 10 °C (постійна часу процесу 400 с). При швидкості обертання ротора $0,3n_{\text{ном}}$ та 50 % номінальному навантаженні, значення перевищення температури статора на 40 °C (постійна стала часу процесу 280 с), статорної котушки на 85 °C (постійна стала часу процесу 200 с). Результати розрахунку за шуканою моделлю теплового динамічного процесу значно відрізнялися від експерименту (рис. 3), що підтверджує необхідність контролю температури обмоток двигуна у реальному часі.

Список використаних джерел

1. Berzoy A., Mohammed O. A. & Restrepo J. Analysis of the Impact of Stator Interturn Short-Circuit Faults on Induction Machines Driven by Direct Torque Control. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2018. 33. 1463–1474. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEC.2018.2827170>
2. Surya G. N., Khan Z. J., Ballal M. S., Suryawanshi H. M. A Simplified Frequency-Domain Detection of Stator Turn Fault in Squirrel-Cage Induction Motors Using an Observer Coil Technique. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2017. 64. 1495–1506. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2611585>
3. Dehghan H., Haghighi F., Cruz S. M. A Flux-Based Differential Technique for Turn-to-Turn Fault Detection and Defective Region Identification in Line-Connected and Inverter-Fed Induction Motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2018. 33. 1876–1885. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEC.2018.2837389>
4. Vovk O., Kvitka S., Halko S., Strebkov O. Energy-saving control of asynchronous electric motors of driving working machines. *Modern Development Paths of Agricultural Production: Trends and Innovations*. Cham: Springer International Publishing. 2019. 415–423. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-14918-5_43
5. Hussienat L. H., Aldaikh S. O., Qawaqzeh M., Vovk O., Halko S., Kvitka S., Sabo A., Ostroverkhov M., Miroshnyk O., Shchur T., Kiełbasa P. Asynchronous motor functional state monitoring based on the relative deviations of the power losses. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2024. 100 (7). 26–29. DOI: <https://doi.org/10.15199/48.2024.07.06>
6. Hussienat L. H., Qawaqzeh M., Vovk O., Halko S., Ostroverkhov M., Sabo A., Miroshnyk O., Shchur T., Tomczuk K., Tomczuk P., Chrzanowicz M. Preservation of the asynchronous motor operational resource and reduction of the additional thermal wear under reduced voltage starting. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2025. 100(8). 73–84. DOI: <https://doi.org/10.15199/48.2025.08.10>
7. Hmida M. A., Braham A. ARM based RSWPT implementation for embedded condition monitoring of induction motor. IECON 2016-42nd Annual Conference of the *IEEE Industrial Electronics Society*, 2016. 1464–1469. DOI: <https://doi.org/10.1109/IECON.2016.7794066>
8. Юрченко О., Лівенко Т., Матвеев О., Беркут Р., Бугайов В. Технологія ремонту електродвигунів різного призначення. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. 2023. 13(2). URL: <https://oj.tsatu.edu.ua/index.php/visnik/article/view/433>
9. Галько С. В. Технології та засоби перетворення відновлюваних джерел енергії для приватних домогосподарств: монографія / С. В. Галько, В. Я. Жарков, А. В. Жарков. Мелітополь : Люкс, 2019. 215 с.
10. Al-Issa H. A., Qawaqzeh M., Kurashkin S., Halko S., Kvitka S., Vovk O., Miroshnyk O. Monitoring of power transformers using thermal model and permission time of overload. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2022. 12(3). 2323–2334. DOI: <https://doi.org/10.11591/ijece.v12i3.pp2323-2334>
11. Al-Quraan T. M. A., Vovk O., Halko S., Kvitka S., Suprun O., Miroshnyk O., Nitsenko V., Zayed N. M., Islam A. Energy-Saving Load Control of Induction Electric Motors for Drives of Working Machines to Reduce Thermal Wear. *Inventions*. 2022. 7(4). 92. DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions7040092>
12. Guven Y., Atis S. Implementation of an embedded system for real-time detection of rotor bar failures in induction motors. *ISA transactions*. 2018. 81. 210–221. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2018.08.004>
13. Wang Z. M., Yang J., Li H., Zhen D., Gu F., Ball, A. Improved cyclostationary analysis method based on TKEO and its application on the faults diagnosis of induction motors. *ISA transactions*. 2021. 10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2021.10.026>
14. Bazan G. H., Goedel A., Scalassara P. R., Endo W., Nunes E. A., Takase V. T., Guedes J. J., Gentil, M. G. An Embedded System for Stator Short-Circuit Diagnosis in Three-Phase Induction Motors Using Information Theory and Artificial Neural Networks. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2022. 52. 582–592. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSMC.2022.3149851>

15. Burriel-Valencia J., Puche-Panadero R., Martínez-Román J., Sapena-Bano A., Riera-Guasp M., Pineda-Sánchez M. Multi-Band Frequency Window for Time-Frequency Fault Diagnosis of Induction Machines. *Energies*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12173361>
16. Моделювання електромеханічних систем: підручник / О. П. Чорний, А. В. Луговой, Д. Й. Родькін, Г. Ю. Сисюк, О. В. Садовой. Кременчук, 2001. 410 с.
17. Електропривод у питаннях і відповідях: навч. посіб. для студентів вищ.навч.закл. / М. Л. Лисиченко, П. І. Савченко, О. К. Тищенко, В. В. Гузенко. Х : ХНТУСГ; Факт, 2012. 500 с.
18. Регульований електропривод: підручник / І. М. Голодний, Ю. М. Лаврінченко, В. В. Козирський, Л. С. Червінський, Д. А. Абдураманов, А. В. Торопов, О. В. Санченко; За ред. І. М. Голодного. К. : ТОВ «ЦП «Компринт», 2015. 509 с.
19. Червінський Л. С. Моделювання регульованого електропривода, апаратів та поточкових ліній / Л. С. Червінський, І. М. Голодний, Ю. М. Лаврінченко [та ін.]. К. : Агроосвіта, 2013. 240 с.
20. Qawaqzeh M., Dudnikov S., Miroshnyk O., Moroz O., Savchenko O., Trunova I., Pazyi V., Danylchenko D., Halko S., Buinyi R. Development of algorithm for the operation of a combined power supply system with renewable sources. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 2022. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916372>

Дата першого надходження статті до видання: 22.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



V. Huzenko^{1,2}, S. Halko¹, S. Chausov¹, M. Sorokin², Yu. Khandola²

¹ **Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University**

² **State Biotechnological University**

IMPLEMENTATION OF ENGINE TEMPERATURE CONTROL SYSTEM IN AC ELECTRIC DRIVE

Summary

The purpose of this article is to build a model of a robotic mobile platform capable of navigating rough terrain. The article describes the components required to assemble a mobile robotic platform based on the Arduino Mega. Connection diagrams for the device's main electronic components are provided. A description of the connections for the device's main electronic components is provided. A modification of the electric drive is described that will allow this electronic component to be adapted to the task at hand. This article analyzes the transient thermal processes of electric motors and constructs a simple mathematical relationship for calculating the temperature parameters of the stator winding in an electric machine. A motor winding temperature control system is analyzed. Transient processes in the motor are investigated, and the results are experimentally confirmed under challenging operating conditions. It is shown that the calculation results, based on a simplified thermodynamic process relationship, differ significantly from the experimental results, demonstrating the need for real-time monitoring of the electric motor winding temperature for transient correction of the vector control system of an asynchronous AC drive. In this paper, we focused on the DS18B20 digital temperature sensor to address the problem of researching and constructing a temperature control system.

The study of the electromechanical system at the nominal speed of rotation and 50 % of the nominal load observed an excess of the stator temperature by 10° C (time constant of the process 400s). At a rotor rotation speed of 0.3 nm and a 50 % nominal load, the value of the stator temperature overshoot by 40°C (process time constant 280 s), stator coil by 85 °C (process time constant 200 s). The obtained calculations, which were based on the required characteristics of the temperature process, differed significantly from the experimental results, which confirms the importance of monitoring the temperature of the electric motor windings under real conditions.

Keywords: asynchronous electric motor, electric drive, mathematical model, agro-industrial complex, temperature processes.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-22>

UDC 621.375.826

S. A. Kazbekova, Phd student
Azerbaijan Technical University
e-mail: sevda.kazbekova@aztu.edu.az

ORCID: 0000-0002-3200-145X

THEORETICAL ISSUES AND DESIGN OF LASER SYSTEMS (LS)

Summary. During the last decade, significant achievements in quantum electronics have made it possible not only to create unique ranging systems based on lasers but also to effectively apply them in various fields of science and technology. In particular, laser ranging systems enable reliable observation of the motion of objects with different target purposes.

It is well known that any ranging system is intended to obtain information about a remote object. This information is delivered by a ranging signal and extracted through special signal-processing techniques. The main feature of lidar systems is that the received signal is not generated by the observed object specifically to transmit information. Instead, it represents either the object's own radiation or the result of reflection of probing radiation from the surface of the object.

Depending on the type of ranging radiation used, different types of information about the object can be obtained. The efficiency of a ranging system is determined, on the one hand, by the amount of information received as well as the speed and accuracy with which this information is obtained, and on the other hand, by how technically feasible it is to implement such a system.

From these perspectives, laser ranging systems have increasingly been preferred in recent years. These systems allow high-precision measurement of the coordinates and velocity of objects, provide information about their shape, and determine the characteristics of their surfaces.

At the same time, laser ranging systems can have relatively compact dimensions and are energetically efficient. This advantage is largely due to the fact that their probing signal can be concentrated within a narrow beam angle, which is often comparable to the angular region in which the observed object is visible.

Keywords: laser ranging systems, lidar, signal processing, receiver systems, optical design, measurement accuracy.

Introduction. During the last decade, significant achievements in quantum electronics have made it possible not only to create unique ranging systems based on lasers, but also to effectively use them in various fields of science and technology. In particular, laser ranging systems enable reliable observation of the motion of objects with different target purposes.

It is well known that any ranging system serves to obtain information about a remote object. This information is delivered by a ranging signal and is extracted from it through specialized signal processing. The main feature of all lidar systems (LS) is that the received signal is not generated by the observed object specifically for transmitting the required information. Instead, it is merely the result of the object's own radiation or arises due to the reflection of the probing radiation from the surface of the object.

Depending on the type of ranging radiation used, different types of information about the object can be obtained. In this case, the efficiency of the ranging system itself is determined, on the one hand, by the amount of information obtained, as well as by the speed and accuracy with which this information is acquired, and on the other hand, by how technically simple it is to implement the given lidar system.

From precisely these perspectives, laser ranging systems have increasingly been given preference in recent years. These systems make it possible to measure with high accuracy the coordinates and

velocity of an object, obtain information about its shape, and determine the characteristics of its surface.

At the same time, laser ranging systems may have relatively compact dimensions and are energetically efficient. The latter is largely due to the fact that their probing signal can be concentrated within a narrow beam angle, which is often comparable to the angular region within which the observed object is visible.

Recent Research and Publications Analysis. Recent research in the field of laser ranging systems (lidar technologies) demonstrates a steady progression toward higher accuracy, improved signal processing techniques, and expanded application areas. Analysis of contemporary publications indicates that modern studies are primarily focused on enhancing detection performance, increasing noise immunity, and optimizing system architecture.

A significant body of recent work is devoted to advanced signal processing methods. In particular, adaptive and Bayesian detection algorithms have been developed to improve target detection under uncertainty and interference conditions. As shown in [17], adaptive threshold control and multi-channel processing significantly increase detection efficiency compared to conventional single-channel approaches. Similarly, statistical signal processing methods described in [9], [14] allow for effective extraction of useful signals in the presence of strong background noise.

Another important research direction concerns the improvement of receiver systems and optical configurations. Studies such as [20] demonstrate that optimization of receiving optics – particularly multi-element and combined mirror–lens systems – can significantly enhance system sensitivity and reduce dimensional constraints. In addition, the use of multi-telescope configurations and optical fiber coupling, as reported in [26], provides improved signal collection efficiency and spatial resolution.

Modern publications also emphasize the development of coherent and Doppler lidar systems. These systems enable precise measurement of velocity parameters, including wind speed and object motion, which are critical for atmospheric and environmental applications. Research presented in [6] shows that coherent Doppler lidar systems can achieve high accuracy in velocity estimation, although new estimation methods are required to eliminate systematic biases under complex atmospheric conditions.

Furthermore, frequency-modulated and phase-coded signal techniques have gained considerable attention in recent years. According to [29] and [30], these methods improve target recognition reliability, increase resolution, and reduce the influence of interference. The application of coding techniques and modulation schemes enhances system robustness and allows more efficient extraction of information from reflected signals.

Recent studies also highlight the growing importance of environmental and atmospheric applications of lidar systems. Multi-wavelength and Raman-based lidar techniques, as described in [15], enable detailed analysis of atmospheric parameters such as aerosol concentration, temperature, and humidity. These systems are widely used for environmental monitoring and climate research.

In addition, there is a clear trend toward the miniaturization and energy efficiency of laser systems. Modern lidar devices are becoming more compact while maintaining high resolution and performance characteristics. This makes them increasingly suitable for integration into aerospace systems, autonomous navigation technologies, and mobile platforms.

Overall, the analysis of recent research confirms that laser ranging systems continue to evolve rapidly due to advances in optics, electronics, and computational methods. Future developments are expected to focus on real-time data processing, integration with intelligent systems, and further improvements in accuracy, reliability, and system autonomy.

Purpose of the Research. The purpose of this study is to analyze the theoretical foundations and design principles of laser ranging systems, with a particular focus on signal processing methods,

receiver system configurations, and factors affecting measurement accuracy. The work aims to summarize existing approaches and identify key parameters that influence the performance and efficiency of lidar systems. Special attention is given to the relationship between system design and practical application capabilities in modern engineering and environmental monitoring tasks.

Results and discussion. Theoretical Issues and Design of Laser Systems (LS). In the work [1], a brief history of the development of laser rangefinders beginning from 1963 is presented. The authors then attempt to evaluate the influence of the nature of the target, propagation conditions, and other factors on the resulting performance characteristics of such rangefinders.

An optimal relationship between the divergence of the laser beam and the angular size of the target is determined. The influence of the probing pulse duration and the extent of the target on measurement accuracy is also analyzed. In addition, an algorithm that ensures automatic target selection and identification is described. During the discussion of the results obtained in the study, the possibility of creating laser rangefinders capable of both automatic target detection and target identification is emphasized.

The theory of vision in scattering media and issues related to image formation of an object taking into account the shadow created by it are considered in the work [2]. Studies involving the observation of an underwater object have shown that the shadow contrast against the background of backscattering noise from the medium, when observed using a pulsed laser–television vision system with temporal gating, depends on the position of the temporal gate, which determines the shadow depth. The contrast reaches its maximum at a certain specific depth.

A computer program for engineering calculations of laser ranging systems is described in [3]. The proposed software makes it possible to calculate the geometric function of a laser locator with an arbitrary transmitter–receiver geometry and to evaluate the potential capabilities of laser locators. As an example, the results of testing an Italian infrared differential absorption and scattering laser locator are presented.

The structure and characteristics of the maximum likelihood detector for a target with unknown range and velocity were determined in the work [4]. The dependence of detection efficiency on the parameters of the sequence of probing optical pulses was investigated.

In the work [5], the problem of estimating the range to a target using an optical locator during the reconstruction of the target image (configuration) is considered. The process of computer simulation of atmospheric phenomena and target parameters influencing the accuracy of range measurements when using a pulsed optical locator with direct signal detection in the receiver channel employing PIN diodes or avalanche photodiodes is presented.

During computer simulation, images were obtained that functionally depend on a large set of varying parameters of the atmosphere, targets, and sensitive elements of the optical locator, with range measurement accuracy corresponding to fractions of the signal pulse duration. The simulation made it possible to obtain arbitrary target configurations and to take into account the influence of diffraction image spots, medium turbulence, and effects occurring in both the near and far zones. A comparison of simulation results with actual range measurement errors obtained during field experiments was also carried out.

The efficiency of estimation functions for the mean wind velocity was determined in the work [6] through computer modeling of measurements performed by a solid-state coherent optical locator with a Gaussian-shaped probing pulse for wind fields at the cloud interface with deterministic profiles of velocity and aerosol scattering.

The efficiency of the velocity estimates is characterized by the standard deviation from the mean estimate and by the bias relative to the input velocity. The study shows that for evaluating conditions created by clouds, a new class of estimation functions is required, since the use of traditional techniques

leads to biased estimates. Data with high signal energy were considered, resulting in negligibly small random deviations.

In [7], the intensity of light signals reflected by objects and the intensity of reflected light at the receiver location are calculated based on the theory of radiation and reflection of a collimated light beam. The results of these calculations form the basis for theoretical estimates of the operational range of an underwater laser locator.

The dependence of the operational range on the main parameters of the locator such as the target observation angle of the receiver, the distance between the laser transmitter and the receiver, and the light reflection coefficient of the object is analyzed. A relationship (in logarithmic form) between the operational range and the radiation power in a real laser locator is obtained.

Signal Processing Methods. A review of several aspects of information processing in pulsed laser rangefinders, which makes it possible not only to measure distances but also to perform target selection and recognition, is presented in [8]. The articles in this collection present research results on the influence of the atmosphere on ranging measurements, studies of coherent reception, and the development of the component base for coherent locators. Papers on optical processors, including those implemented in integrated-optical form, are also presented.

In [9], methods of statistical description and processing of laser locator signals in the presence of interference are considered. The specific characteristics inherent to atmospheric laser sounding systems are discussed. Possibilities for improving measurement accuracy and reducing measurement time under conditions of intense background interference and low signal-to-noise ratios at the input of the receiver system are demonstrated.

In the work [10], the development of a microprocessor-based system is reported, which makes it possible to track variations in the parameters of the transmitting and receiving paths of a laser locator and to take them into account during the processing of the obtained results. This approach leads to increased accuracy in the measurement of atmospheric parameters.

In the report [11], the changes in narrowband noise spectra under phase modulation are investigated. It is shown that due to phase manipulation, the noise spectrum expands in the absence of a signal, whereas in the presence of a signal ($S/N > 1$) it remains unchanged. Experimental results confirmed that in the absence of a useful signal at the input of the receiver device, the noise spectrum at the output of the phase switch is twice as wide as the spectrum at its input. A relationship between the output spectrum width and the signal-to-noise ratio at the receiver input was determined.

In [12], it is noted that the spectral differences between the mixture of useful signal and noise and pure noise can be used to improve the sensitivity of receiving devices. A method for increasing the noise immunity of a laser locator receiver is proposed. The method is based on the creation of an additional channel that utilizes the structural differences between the signal-noise mixture and pure noise to control the main reception channel. The operation of the additional channel is based on the phenomenon of narrowband noise spectrum expansion under phase modulation.

In [13], two lasers scanning alternately in orthogonal planes are used for remote measurement of the spatial orientation of an object. Photosensitive elements mounted on the object receive the laser radiation. Characteristic points of the receiving part of the photosensitive elements are considered as reference points, whose positional parameters are known a priori. The signal from the illuminated reference point is processed by a computing unit, where the angular coordinates of the reference point are determined from the reconstructed projections corresponding to the current angular position of the scanning strip.

In [14], multichannel detection systems for optical signals reflected from a target in the presence of aerosol interference are considered. The reflected signal may appear in one of the spatial observation channels. For the synthesis of the interchannel signal processing algorithm, an energy contrast criterion

was introduced. It was established that the optimal processing according to the selected criterion is the weighted summation of signals from the channel outputs. A system of equations for calculating the optimal weighting coefficients for arbitrary interchannel correlation coefficients of noise signals was obtained. Solutions of this system were found for cases of strong and weak correlation.

In [15], a description and analysis of a version of the standard Raman method – a combined reception method of elastic backscattered lidar signals – is presented. In the new version, in addition to emission at a single wavelength and reception at two wavelengths, which is characteristic of the original method, emission at a second wavelength is introduced. The second wavelength is exactly equal to the wavelength of the second reception channel the Raman reception channel. The second wavelength of the reflected signal is formed due to the Raman shift, which corresponds to the frequency shift of radiation in molecular nitrogen or oxygen. The additional radiation at this wavelength in the new version makes it possible to suppress effects associated with difference frequencies, which cause systematic errors in the original version of the method. *Конец формы*

In the work [16], the possibility of applying standard signal processing methods of a CO₂ optical locator is demonstrated. A specific feature of these systems is the presence of intrapulse frequency modulation (FM). Compression of the frequency-modulated signal spectrum is performed using a matched filter. An expression for the matched filter with a cosine weighting function is presented. Simulation of the processing of the FM-modulated signal confirms the calculated values of the range resolution of the optical locator (0.57 m) and the velocity resolution (0.04 m/s).

In the work [17], the problem of detecting a laser signal reflected from an extended object under conditions of incomplete a priori information about its statistical characteristics is reduced to the problem of distinguishing laser signals reflected from objects and from the underlying surface in the presence of noise. Based on the adaptive Bayesian approach, an optimal detection algorithm was obtained. It is shown that the optimal algorithm requires two-channel processing with adaptive control of the detection threshold. Using a particular example, it is demonstrated that the synthesized algorithm provides a significant gain in detection efficiency compared with the traditionally used single-channel algorithm.

In the work [18], it was established that the phenomenon of overlap of output pulses of the photomultiplier tube in the receiver of a laser locator leads to a significant limitation of the capabilities of such locators. The construction of a receiver system that eliminates this phenomenon through the use of additional conversion of input signals into single-frequency damped oscillations is described. A detailed analysis of the system implementing this method is presented, including investigation of the statistical characteristics of the output signals, evaluation of the dynamic range of the system, and its amplitude resolution capability. The main advantages of the considered system are evaluated, including high amplitude and temporal resolution, reduced non-stationary background fluctuations, and high sensitivity.

Issues related to information acquisition and processing in pulsed laser rangefinders for the purpose of extracting characteristic features of the ranging object, as well as target selection and recognition under interference conditions, are considered in the work [19]. In this study, the influence of the spatial extent of the target, inhomogeneity of the radiation beam, and random errors in aiming the rangefinder at the target was taken into account. Algorithms and schemes for automatic target selection are analyzed. A principle for signal extraction from the target and recognition based on information contained in the reflected pulse is proposed.

Receiver Systems and Beam Switching Methods. In [20], various receiving objectives of a laser locator are considered: three types of lens systems, two types of mirror systems, three types of mirror–lens systems, and two types of multi-element composite systems. A comparative analysis of these systems is carried out using generalized quality criteria.



The proposed comparison method and the diagram of energy and dimensional characteristics make it possible to select the optimal objective according to the introduced relative efficiency coefficient or according to the minimum longitudinal dimension (for equal optical diameters). It is shown that the most compact objectives are those based on the Mangin mirror configuration, Fresnel lenses, and multi-element composite systems (in order of increasing size).

In [21], it is proposed to use a digital method of channel switching instead of the amplitude switching method. This approach makes it possible to reduce the switching time between channels to 5–10 ns, which practically eliminates errors arising from channel switching and completely removes switching transients.

In [22], calculations of the main characteristics of a receiver device based on a quadrant detector are presented. This makes it possible to select optimal elements of a laser locator from the standpoint of accuracy and response speed.

In [23], estimates of the capabilities of frequency-modulated laser locators with frequency conversion implementing various environmental monitoring methods are presented. Principles of system design and approaches for improving the metrological characteristics of continuous laser locators are discussed.

In [24], a description of the ALOMAR optical locator located in Andenes (northern Norway) is presented. The system is operated by a joint research group from Germany, the United Kingdom, and France.

The ALOMAR lidar includes Rayleigh, Mie, and Raman channels and has been operating as part of a research station since 1995. The schemes for frequency and beam direction stabilization of the three-color laser transmitter (1064 nm, 532 nm, and 355 nm) are discussed. Receiver channel configurations of the telescope, improved daylight detectors, and automation schemes for subsystem control are also presented.

Statistical data obtained during two years of observations, including measurements of polar stratospheric clouds and noctilucent clouds, are presented. Measurements of air mass density at different wavelengths are discussed. Atmospheric layer temperatures were determined using different methods, and the spatial wind vector was measured. Results of studies on the morphology and structure of atmospheric layers, as well as the properties of cloud particles and aerosols, are also presented.

In [25], the results obtained using the Bonn University optical locator installed in Kiruna (Sweden) are discussed. The system is used to study the aerosol content in the middle and upper troposphere, including cirrus clouds in the troposphere, polar stratospheric clouds, the formation region of variable clouds in the winter stratosphere, noctilucent clouds in the summer mesopause, and stratospheric aerosols, including possible volcanic aerosols.

The optical locator uses an Nd:YAG laser emitting pulsed signals with linear polarization at wavelengths of 1064 nm, 532 nm, and 355 nm, together with a 50 cm diameter telescope, allowing measurements at altitudes from 5 to 100 km. A narrow field of view and special narrowband spectral filters enable measurements during daytime conditions. During the period January–March 1997, several dozen polar stratospheric clouds were detected. Signals received by three telescopes were converted by photomultiplier tubes and stored in the memory of a PC operating under MS-DOS.

In [26], an experimental evaluation of the aperture synthesis of a receiving telescope for a Rayleigh lidar system based on an Nd:YAG laser with a pulse energy of 400 mJ at a wavelength of 532 nm and a repetition frequency of 20 Hz is presented. Three telescopes with 350 mm apertures were integrated using optical fibers. Measurements of density and temperature in the middle atmosphere (30–80 km altitude) demonstrated improved system performance as a result of the synthesized receiving aperture, confirming the predicted results.

In [27], the dependence of lidar signals within the field of view on aperture size is analyzed. Observation results for Newtonian and Cassegrain telescopes are presented. Analytical expressions

describing the geometric configurations of lidar systems are derived and show good agreement with experimental data.

In the work [28], the results of Doppler measurements of wind and temperature obtained using the ALOMAR Arctic research optical locator for observing the middle atmosphere are presented. Located in Andøya (Norway), the ALOMAR lidar has been conducting observations since 1996, employing Rayleigh, Raman, and Mie channels.

The system includes a two-channel Nd:YAG laser transmitter (type GCR6-30) with an output power of 12 W at a wavelength of 532 nm. After modernization, the lidar was equipped with a scanning two-channel telescope with a diameter of 1.8 m, forming a fan-shaped radiation pattern for monitoring winds in the stratosphere. The obtained data confirm the presence of predominant westerly wind flows in winter and weak easterly flows in late spring and early summer. Measurements were mainly performed at a wavelength of 532 nm. The results confirm the effectiveness of Doppler interferometric imaging using lidar systems and demonstrate the possibility of measuring wind and temperature of atmospheric layers both during daytime and nighttime.

In [29], the phenomenon of reflection of frequency-modulated light waves is considered. This phenomenon makes it possible to detect the presence of targets within visually opaque media containing suspended diffusely scattering particles.

Signals at the modulation frequency $I(f)$ and at the first harmonic $I(2f)$ allow the difference in intensities of orthogonal vectors of circular and linear polarization to be measured almost instantaneously. Studies of reflections from different types of targets show that the sensitivity of imaging systems using signals with different polarizations depends on: sharp edges of targets, surface texture, and polarization-dependent absorption of the detected object.

The penetration depth of optical beams with linear and circular polarization when using polarization-optical methods for studying turbid media depends on the laser beam intensity, the size of diffusion particles, and the nature of the target.

In the work [30], a comprehensive methodology for target recognition based on laser beam coding in a laser locator system is considered. Beam coding makes it possible to solve problems associated with electromagnetic interference and synchronous noise, which occur during target recognition, to increase recognition resolution, and to reduce errors of single-signal reception.

A method for coding the laser beam using a modulating M-sequence is proposed, ensuring the operation of the recognition system. The proposed method significantly increases the reliability and security of information transmission, improves the quality of interrogation and response signals, and enhances the stability of the system. Block diagrams of the coding system, the use of the code for modulation of the laser emitter, the receiver channel (including a preamplifier, filter, automatic gain control unit, gating circuit, and signal conversion for the single-chip microprocessor 80C31), as well as the control center for code generation and M-sequence formation, are presented.

In the work [31], the principle of constructing an optical rangefinder based on measuring the phase difference between transmitted and received signals is presented. A table containing parameters of optical locators of this type produced by different manufacturers is provided.

The operational range varies from 20 m to 1 km, the measurement accuracy ranges from 3 mm to 5 cm, and the resolution reaches 1 mm. Applications of these optical locators are discussed, and it is noted that they are used as part of onboard equipment of ships and aircraft in combination with the Global Positioning System (GPS).

In the work [32], it is noted that when laser locators are used for detecting targets at long ranges or small targets at moderate distances, the geometric dimensions of the laser beam often exceed the geometric dimensions of the target. Under such conditions, a crucial parameter in the design of laser locators becomes the effective reflective surface of the target.



A method is proposed for estimating this parameter for geometrically complex targets based on a series of images obtained using the same laser locator at short distances. The essence of the proposed method is described in detail, and the problems arising when applying this approach are discussed.

In the work [33], information on new developments related to laser locators is presented. In particular, the development of a laser locator for monitoring atmospheric conditions and determining the concentration of harmful substances is reported.

The described locator includes a telescope system capable of obtaining information on the spatial and temporal distribution of pollution concentrations. Experimental results from testing this laser locator are presented. Additionally, the development of a laser triangulation system is reported, which enables measurements in the range of 80 to 203 mm with a resolution of 0.00025 of the measured distance.

In the work [34], the results of applying a scanning Raman laser locator for probing the atmospheric boundary layer with high spatial and temporal resolution are presented. Developed methods for analyzing the obtained sounding results are described.

The possibility of measuring the absolute humidity content and rapidly calculating the evaporation flux velocity and other atmospheric parameters over a relatively large area based on these measurements is demonstrated. Examples of atmospheric sounding and data analysis are presented, including determination of the spatial and temporal resolution required for remote sensing measurements in the atmospheric boundary layer.

Conclusion. The review of modern laser ranging systems demonstrates the rapid development of lidar technologies and their wide application in scientific, environmental, and engineering fields. The analysis shows that the performance of laser locator systems strongly depends on the design of receiver systems, signal processing algorithms, and methods of beam control and modulation.

Advanced signal processing techniques, including adaptive detection algorithms, coherent reception, and frequency-modulated signal processing, significantly improve detection accuracy, range resolution, and noise immunity. In addition, improvements in receiver optics, multi-channel detection systems, and polarization-based analysis contribute to enhanced system sensitivity and reliability.

Modern lidar systems are increasingly used for atmospheric monitoring, environmental studies, and remote sensing applications. The development of compact, high-resolution, and energy-efficient laser locator systems, along with improved data processing methods, will further expand their capabilities for precise remote measurements and target recognition.

Bibliography

1. Melnikov L. Y., Shteinshleiger V. B., Podolnyy E. A. Airborne Early Warning Radar Scientific Research and Development in Russia *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. 1993. Vol. 8, No. 4.
2. Katsev I. L., Zege E. P., Prikhach A. S. Observation of the shadow of an object in a scattering medium using an active vision system *Proc. 3rd Inter-Republican Symposium "Optics of the Atmosphere and Ocean"*. Tomsk, Russia, July 1996.
3. Razenkov I. A., Andreev Y. M., Shefer N. A. Software for engineering calculations of laser ranging systems *Optics of the Atmosphere and Ocean*. 1996. Vol. 9, No. 10. P. 1423–1427.
4. Trifonov A. P., Bepalova M. B. Target detection characteristics when probing with a sequence of optical pulses *Izvestiya VUZ Radioelectronics*. 1997. Vol. 40, No. 3–4. P. 46–52.
5. Der S., Redman B., Chellappa R. Simulation of error in optical radar range measurements *Applied Optics*. 1997. Vol. 36, No. 27. P. 6869–6874.
6. Lottman B. T., Frehlich R. G. Extracting vertical winds from simulated clouds with ground-based coherent Doppler lidar *Applied Optics*. 1998. Vol. 37, No. 36. P. 8297–8305.



7. Liu X., Tan Z., Hu Z. Theoretical analysis of the operational range of an underwater laser locator with synchronous scanning *Dongnan Daxue Xuebao*. 1996. Vol. 26, No. 6. P. 29–34.
8. Stoyanov D. V. Lidar receivers without overlap of the photomultiplier's single pulses *Applied Optics*. 1992. Vol. 31, No. 3. P. 358–366.
9. Agishev R. R., Polsky Y. E. Features of signal and background noise processing in lidar systems *Radioelectronic Devices and Systems*. 1996. P. 74–81.
10. Glakteev S. E., Morozov O. G. Lidar measurement complex *Proc. 3rd Inter-Republican Symposium "Optics of the Atmosphere and Ocean"*. Tomsk, Russia, July 1996.
11. Ilyin G. A. Change in the spectrum of narrowband noise during heterodyne reception of lidar signals *Proc. 3rd Inter-Republican Symposium "Optics of the Atmosphere and Ocean"*. Tomsk, Russia, July 1996.
12. Ilyin A. G. Reduction of false alarm probability in lidar systems with heterodyne reception *Proc. 3rd Inter-Republican Symposium "Optics of the Atmosphere and Ocean"*. Tomsk, Russia, July 1996.
13. Kulik V. P., Lipnitsky A. K., Yasnetsky E. A. Determination of the spatial orientation of an object *Proc. Scientific and Technical Conference of Bauman Moscow State Technical University*. Moscow, Russia, Nov. 1995.
14. Leontievsky E. G., Mitsenko I. D., Kharlamov A. I. Synthesis of multichannel optical signal detection systems in aerosol interference *Izvestiya VUZ Electronics*. 1996. No. 1–2. P. 153–159.
15. Moosmüller H., Wilkerson T. D. Combined Raman–elastic backscatter lidar method for the measurement of backscatter ratios *Applied Optics*. 1997. Vol. 36, No. 21. P. 5144–5147.
16. Reuter R., Willkomm R., Krause G., Ohm K. Development of a shipboard lidar: Technical layout and first results *EARSel Advances in Remote Sensing*. 1995. Vol. 3. P. 15–25.
17. Zeng X., Lin W. Radar equation and signal design for the electromagnetic missile *Proc. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*. Chicago, USA, July 1992.
18. Yanishevsky A. A. Radar system for airborne target detection *Military Technology*. 1992. Vol. 16, No. 11. P. 44–47.
19. Khaitun F. I., Pleshanov Y. V. Discrete signal accumulation in laser locators *Optical Journal*. 1993. No. 10. P. 55–56.
20. Abramochkin A. I., Tikhomirov A. A. Optimization of a lidar receiver system: evaluation of receiving objectives *Optics of the Atmosphere and Ocean*. 1998. Vol. 11. P. 899–908.
21. Dorogov N. V., Ilyin G. I. Lidar signal registration system *Proc. 3rd Inter-Republican Symposium "Optics of the Atmosphere and Ocean"*. Tomsk, Russia, July 1996.
22. Ilyin G. I., Morozov O. G., Polsky Y. E. Investigation of frequency-modulated lidar with frequency conversion *Proc. 3rd Inter-Republican Symposium "Optics of the Atmosphere and Ocean"*. Tomsk, Russia, July 1996.
23. Ilyin G. I., Shadrin A. N. Determination of the angular position of luminous points in atmospheric sounding *Proc. 3rd Inter-Republican Symposium "Optics of the Atmosphere and Ocean"*. Tomsk, Russia, July 1996.
24. Fiedler J. et al. Status of the ALOMAR Rayleigh/Mie/Raman lidar *Proc. 13th ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research*. Öland, Sweden, May 1997.
25. Müller K.-P., Baumgarten G., Siebert J., Fricke K. H. The new lidar facility at Esrange, Kiruna *Proc. 13th ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research*. Öland, Sweden, May 1997.
26. Ishii S., Shibata T., Mizutani K., Itabe T. Optical fiber coupled multitelescope lidar system: Application for a Rayleigh lidar *Review of Scientific Instruments*. 1996. Vol. 67. P. 3270–3273.
27. Kuze H., Kinjo H., Sakurada Y., Takeuchi N. Field-of-view dependence of lidar signals by use of Newtonian and Cassegrainian telescopes *Applied Optics*. 1998. Vol. 37. P. 3128–3132.
28. Proctor P. Compact lidars search for air pollution *Aviation Week and Space Technology*. 1996. Vol. 145. P. 59–60.
29. Sun D., Qiao L., Hu J., Liu Z. Signal processing method with linear frequency modulation in coherent optical locators *Harbin Institute of Technology Journal*. 1996. Vol. 28. P. 29–32.
30. Silverman M. P., Strange W. Object delineation within turbid media by backscattering of phase-modulated light *Optical Communications*. 1997. Vol. 144. P. 7–11.
31. Shi Jianliang, Wang Zhixing, He Anzi. Laser beam coding method for high-resolution and highly reliable target recognition *Guangxue Xuebao*. 1997. Vol. 17, No. 1. P. 58–63.



32. Ermakov B. A., Voznitsky M. V. Obtaining and processing information in pulsed laser rangefinders *Optical Engineering*. 1992. Vol. 31, No. 4. P. 768–781.
33. Osche G. R., Seeber K. N., Lok Y. F., Young D. S. Laser radar cross-section estimation from high-resolution image data *Applied Optics*. 1992. Vol. 31, No. 14. P. 2452–2460.
34. Henderson S. W., Suni P. J. M., Hale C. P., Hannon S. M., Magee J. R., Bruns D. L., Yuen E. H. Coherent laser radar at 2 μm using solid-state lasers *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1993. Vol. 31, No. 1. P. 4–15.

Дата першого надходження статті до видання: 14.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 10.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



С. Казбекова

Азербайджанський технічний університет

ТЕОРЕТИЧНІ ПИТАННЯ ТА ПРОЄКТУВАННЯ ЛАЗЕРНИХ СИСТЕМ (LS)

Анотація

Протягом останнього десятиліття значні досягнення в галузі квантової електроніки дали змогу не лише створювати унікальні далекомірні системи на основі лазерів, але й ефективно застосовувати їх у різних сферах науки і техніки. Зокрема, лазерні далекомірні системи забезпечують надійне спостереження за рухом об'єктів різного призначення.

Відомо, що будь-яка далекомірна система призначена для отримання інформації про віддалений об'єкт. Ця інформація передається за допомогою зондувального сигналу та вилучається за допомогою спеціальних методів обробки сигналів. Основною особливістю лідарних систем є те, що прийнятий сигнал не генерується спостережуваним об'єктом спеціально для передавання інформації. Натомість він являє собою або власне випромінювання об'єкта, або результат відбиття зондувального випромінювання від його поверхні.

Залежно від типу використовуваного зондувального випромінювання можна отримати різні види інформації про об'єкт. Ефективність далекомірної системи визначається, з одного боку, обсягом отриманої інформації, а також швидкістю й точністю її отримання, а з іншого – технічною можливістю реалізації такої системи.

З огляду на ці аспекти, останніми роками все більшого поширення набувають лазерні далекомірні системи. Вони забезпечують високоточне вимірювання координат і швидкості об'єктів, надають інформацію про їхню форму та дозволяють визначати характеристики їхніх поверхонь.

Водночас лазерні далекомірні системи можуть мати відносно компактні розміри та є енергетично ефективними. Ця перевага значною мірою зумовлена тим, що їхній зондувальний сигнал може бути зосереджений у вузькому куті променя, який часто є співмірним із кутовою областю, в якій спостерігається об'єкт.

Ключові слова: лазерні далекомірні системи, лідар, обробка сигналів, приймальні системи, оптичне проєктування, точність вимірювань.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-23>

УДК 681.5 / 620.9 / 621.311

С. В. Кравцов¹, магістрР. В. Жесан¹, канд. техн. наук, доцентО. П. Голик¹, канд. техн. наук, доцентВ. О. Зубенко², канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0009-0009-0215-3944

ORCID: 0000-0002-9212-7361

ORCID: 0000-0001-5308-8227

ORCID: 0000-0002-8401-755X

¹ Центральноукраїнський національний технічний університет² Херсонський державний аграрно-економічний університет

e-mail: zherom@ukr.net

ЗАСТОСУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ БУДІВЕЛЬ ІЗ СИСТЕМАМИ КЕРУВАННЯ У РОЗПОДІЛЕНІЙ ЕЛЕКТРОГЕНЕРАЦІЇ МАЙБУТНЬОГО

Анотація. У статті розглянуто питання ролі та місця сучасних енергоефективних будівель із системами керування у післявоєнній реформованій енергосистемі України. Узагальнено професійну термінологію і принципи побудови систем електропостачання (централізоване та децентралізоване (розподілене) електропостачання). Проведений аналіз існуючих конструкцій енергоефективних будівель і зроблені висновки щодо їх ролі та місця у системах електропостачання майбутнього. Намічено шляхи подальших досліджень. Зроблено висновки.

Ключові слова: електрична енергія, енергетична система, електропостачання централізоване та децентралізоване, відновлювані джерела енергії, автоматизоване керування, пасивний будинок, будівля нульової енергії, активний будинок, розумний дім.

Постановка проблеми. Серед видів енергії, що існують в природі, найбільш універсальною і звичною для нас є електрична, яка легко може бути перетворена в інші види енергії (теплову, механічну, хімічну). Окрім того, електрична енергія зручна в транспортуванні на великі відстані. Електрична енергія є рушієм безлічі технологічних процесів, сприяє підвищенню комфорту та безпеці життєдіяльності людини. Без неї практично неможливе функціонування промислового виробництва, народного господарства та інших життєво важливих сфер людської діяльності.

Війна, яку розв'язала російська федерація проти України, 64 масовані руйнівні атаки ворога на енергетичну інфраструктуру держави [1] чітко окреслили головні напрямки державної політики на найближчий час [1, 2], серед яких є і модернізація енергетичної галузі. Саме тому перспективною метою в Україні на найближчі роки буде створення системи розподіленої генерації електроенергії [1–5]. Зокрема, нинішній перший віцепрем'єр-міністр – міністр енергетики України Д. А. Шмигаль схематично окреслює ключові пріоритети вітчизняної енергетики наступним чином: «Захист енергооб'єктів, децентралізована генерація та диверсифікація, створення стратегічного резерву» [5]. Важливе місце у енергосистемі займатиме так звана «зелена генерація» – енергетика на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), адже саме сонячні та вітрові установки, поряд із АЕС, допомогли втримати напівзруйновану агресором вітчизняну енергосистему від колапсу [4, 6, 7]. З іншого боку, гостро постає питання забезпечення дбайливого ставлення до наявних енергоресурсів, підвищення енергоефективності всіх технологічних процесів та виробництв, а також енергозбереження у побуті [8, 9]. Це пов'язано як зі станом нашої енергетики, так і з задекларованим державою курсом на інтеграцію до ЄС

та Євроатлантичних структур. Важливим аспектом всього, переліченого вище, є забезпечення енергоефективності будівель і споруд [4, 10, 11].

Аналіз останніх досліджень. Різні аспекти електропостачання енергоефективних будівель досліджували чимало зарубіжних та вітчизняних науковців [4, 10, 12–18]. Особливо хотілося б акцентувати на двох моментах: у працях [13, 16, 18] робиться наголос на необхідності використання сучасної концепції інтелектуальних мереж – Smart Grid, а визначна роль цифрових технологій і автоматизованого керування, в тому числі інтелектуального, обґрунтовується, зокрема, у працях [10, 17, 18].

Формулювання мети статті (постановка завдання). Не зважаючи на численні наукові публікації з питань електропостачання енергоефективних будівель, залишається достатньо широке поле для досліджень щодо місця енергоефективних будівель в післявоєнній вітчизняній системі децентралізованої (розподіленої) генерації енергії, особливостей використання ВДЕ та організації автоматизованого керування. Необхідно узагальнити професійну термінологію і принципи побудови систем електропостачання, провести аналіз існуючих конструкцій енергоефективних будівель та зробити висновки щодо можливості їх гармонійного використання у системах електропостачання майбутнього.

Виклад основного матеріалу. Згідно із ДСТУ 3440-96. «Системи енергетичні. Терміни та визначення» [19], залежно від зв'язку споживача з джерелом енергії, існує два способи організації електропостачання:

- централізоване;
- децентралізоване.

Централізоване електропостачання – електропостачання від енергетичної системи. Воно відображає традиційну систему електропостачання, в якій споживач отримує електроенергію від районних (міських) електричних станцій (рис. 1).

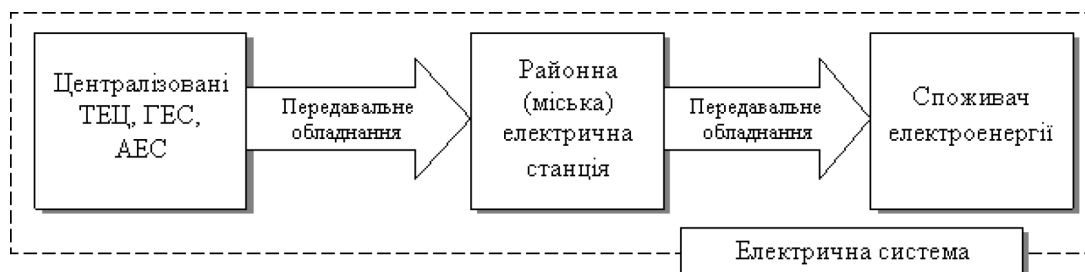


Рис. 1. Структурна схема централізованого електропостачання

Електропостачання споживачів здійснюється через електричні мережі, що живляться здебільшого від енергетичних систем, які об'єднують кілька електростанцій. Ці системи одночасно постачають електроенергію великі райони, передаючи їх на значні відстані [4, 20]. Генерація енергії здійснюється великими ГЕС, ТЕС, АЕС. Між електростанціями або потужними державними енергосистемами і споживачами розміщене передавальне обладнання, що складається з підвищувальних і понижувальних трансформаторних підстанцій та ліній передачі електроенергії різної напруги. Сукупність генераторів, розподільних пристроїв, підстанцій, ліній електричних мереж і споживачів електроенергії, називається електричною системою.

Децентралізоване електропостачання – електропостачання від джерела, що не має зв'язку з енергетичною системою (рис. 2).

Децентралізоване або розподілене виробництво енергії (англ. *Distributed power generation*) – концепція будівництва джерел енергії та розподільчих мереж, яка має на увазі наявність великої кількості користувачів, які виробляють теплову і електричну енергію для власних потреб, а також спрямовують надлишки в загальну мережу (електричну або теплову). Підключені до

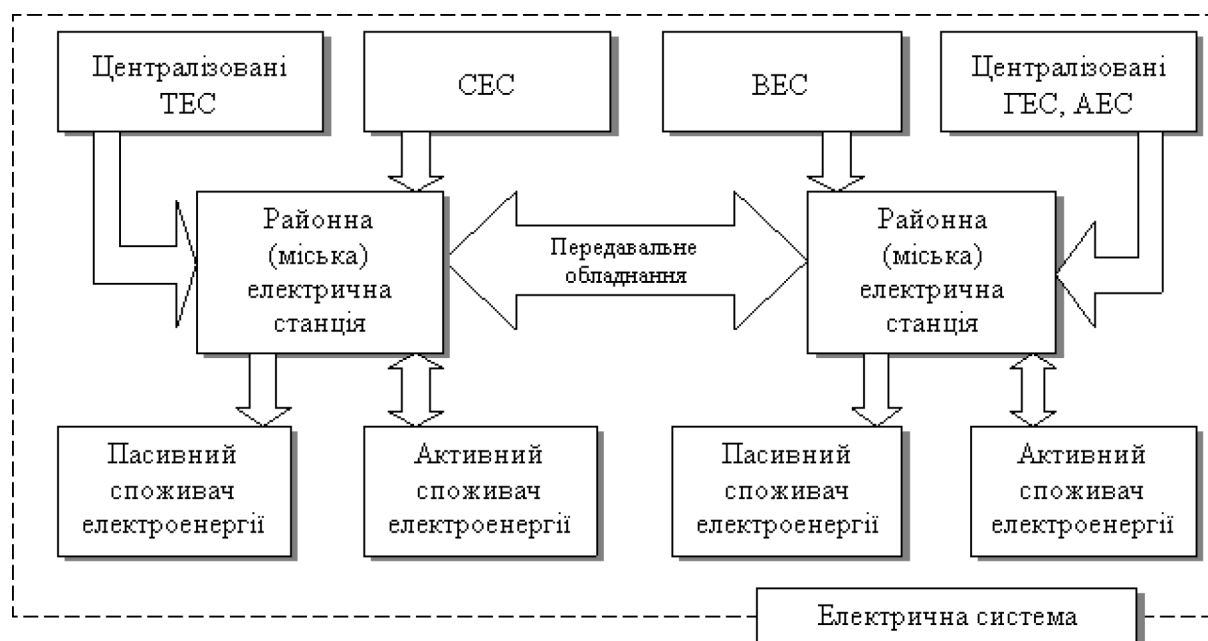


Рис. 2. Структурна схема децентралізованого (розподіленого) електропостачання

загальних мереж локальні джерела енергії, в поєднанні з засобами накопичення, зберігання та перетворення енергії, визначаються як розподілені енергетичні ресурси (англ. *Distributed Energy Resources – DER*) [21].

Дана концепція передбачає будівництво додаткових джерел електроенергії в безпосередній близькості від споживачів. Потужність таких джерел обирається, виходячи з очікуваної потужності споживача, з урахуванням наявних певних обмежень, і може варіюватись у широких межах (від двох-трьох до сотень кіловат) [10, 12, 17]. При цьому споживач не від'єднується від загальної мережі електропостачання.

На рівні з традиційними когенераційними установками, в якості розподілених енергетичних ресурсів та додаткових джерел енергії можуть виступати засоби альтернативної енергетики (сонячні електростанції (СЕС), вітрові електростанції (ВЕС) та інші ВДЕ), дизельні, бензинові й газові генератори, акумуляторні системи зберігання електроенергії, електричні транспортні засоби та керовані навантаження, такі як системи опалення, кондиціонування, та електричні водонагрівачі. Вони можуть використовуватися автономно, для оптимізації енергоспоживання індивідуально визначеного об'єкта, або через певні агрегатори у сукупному розподілі електроенергії [10, 12, 13].

Таким чином, у структурі розподіленого електропостачання суттєве місце займає споживач електроенергії, який, з розвитком технологій відновлюваної енергетики та систем керування розподілом, якістю та надійністю постачання енергії, може не тільки пасивно споживати електроенергію від зовнішніх джерел, а й бути активним учасником функціонування електроенергетичної системи. При цьому наявність зв'язку із загальною електричною мережею, дозволяє компенсувати нестачу електроенергії, за рахунок її споживання від загальної мережі, а, в разі надлишкового виробництва електроенергії власним джерелом, видавати її до мережі, з можливістю отримання відповідного зиску [13, 16].

Чи не найбільшими споживачами енергії є будівлі різного призначення. За даними Європейського Союзу [22], близько 40 % всієї енергії споживають саме будівлі та споруди. В цьому контексті можна стверджувати, що будівлі, за певних умов, можуть займати одне з провідних місць в системі розподіленої генерації енергії. Проте, визначальним фактором впливу будівель, як споживачів, на розподілену генерацію є ступінь їх енергоефективності.

Під *енергоефективністю будівлі* розуміють властивість будівлі, яка характеризується кількістю енергії, необхідної для створення належних умов проживання та/або життєдіяльності людей у такій будівлі [23]. Близьким є поняття *енергоекономічна споруда* – це споруда, яка спроектована таким чином, щоб її енергетичне споживання, з метою опалення, кондиціонування повітря, освітлення і гарячого водопостачання, задовольнялося при мінімальному використанні покупної енергії, тобто споруда, яка може експлуатуватися при мінімальних витратах на енергоносії [24]. Відповідно до Директиви Європейського Союзу про енергетичну ефективність будівель (EPBD) [22], починаючи з 2021 року енергетичні показники всіх нових будинків мають відповідати показникам будівель з мінімальним або нульовим споживанням енергії, на шляху до енергетичної нейтральності.

Сучасні будівлі за енергоефективними технологіями побудови поділяють на [21]: *пасивний будинок*, попит енергії на опалення якого не може перевищувати $15 \text{ кВт} \cdot \text{год} / (\text{м}^2 \cdot \text{рік})$; *будівля нульової енергії* (будівля, що зовсім не потребує додаткової енергії на опалення $\{0 \text{ кВт} \cdot \text{год} / (\text{м}^2 \cdot \text{рік})\}$, крім тієї, що сама виробляє); *будівля плюсової енергії* (тобто така, що виробляє, за допомогою встановлених на ній ВДЕ, більше енергії, ніж сама потребує).

Пасивний будинок (англ. *Passive House (PH)*) – енергоефективна будівельна технологія, яка створює комфортні умови проживання та одночасно є економічною і мінімально впливає на навколишнє природне середовище [25, 26]. Джерело [21] дає наступне визначення стандарту PH: «Пасивний Будинок – будівля, в якій тепловий комфорт (ISO 7730) досягається виключно за рахунок додаткового попереднього підігріву (або охолодження) маси свіжого повітря, необхідного для підтримання в приміщеннях повітря високої якості, без його додаткової рециркуляції». При цьому, ВДЕ можуть виступати ідеальним доповненням до пасивного будинку та є новою вимогою для сертифікації пасивних будівель.

Будівля з нульовою енергією (англ. *Zero Energy Building (ZEB)*), також відома як *споруда з чистою нульовою енергією* (англ. *Net Zero Energy (NZE)* або *Zero Net Energy (ZNE)*), – це будинок, у якому загальна кількість енергії, споживаної ним на річній основі, дорівнює кількості відновлюваної енергії створюваної ним же або на відстані, завдяки ВДЕ за межами майданчика з використанням таких технологій, як теплові насоси, високоефективні вікна та будівельна ізоляція, а також сонячні панелі [11, 21, 27]. Будинки з нульовим споживанням енергії не використовують викопне паливо й отримують необхідну енергію з ВДЕ [27, 28].

Активний будинок (англ. *Active House*), також *будинок з позитивним енергобалансом (Energy Plus House)*, *будинок за стандартом «енергія плюс»* – будівля, яка виробляє енергії для власних потреб більш, ніж в достатній кількості. Загальний річний обсяг енергоспоживання є позитивним, на відміну від будинку з низьким енергоспоживанням [21]. Основою для активного будинку є об'єднання рішень, розроблених Інститутом пасивного будинку (Німеччина), і технологій «розумного дому». *Розумний дім (розумний будинок / Smart Home, Digital House)* – система домашніх пристроїв, здатних виконувати дії й вирішувати певні повсякденні завдання без участі людини. Функціонально пов'язуються між собою усі електроприлади будівлі, якими можна керувати централізовано. Завдяки інтеграції інформаційних технологій у домашні умови, усі системи та прилади узгоджують виконання функцій між собою, порівнюючи задані програми та зовнішні показники (обстановки) [15, 21], а поєднання згадуваних технологій, дозволяє спроектувати будівлю, яка мінімально споживаючи та витрачаючи енергію здатна «інтелектуально» розпоряджається нею.

Поступова відмова від потужних центральних електростанцій і остаточна децентралізація енергосистем є можливою за умов впровадження інтелектуальних механізмів керування розподілом енергетичних ресурсів та їх системної інтеграції [10, 15]. В цьому контексті, роль та місце енергоефективних будівель, як споживачів і постачальників електроенергії в системі

розподіленої генерації, окрім застосування ВДЕ, має визначатись також рівнем автоматизації процесу розподілу енергії (табл. 1).

Таблиця 1

Роль та місце енергоефективної будівлі в системі розподіленої генерації

Енергоефективна будівля	Роль та місце будівлі в системі розподіленої генерації
Пасивний будинок	Інтелектуальні механізми розподілу енергетичних ресурсів відсутні. Енергоефективність досягається переважно архітектурними та конструктивними способами. Використання ВДЕ та систем керування розподілом є додатковою опцією, без активного зв'язку з центральною електромережею, що практично унеможлиблює використання даного типу будівель в системі розподіленої генерації
Будівля з нульовою енергією	Використання ВДЕ є обов'язковою умовою. Проте рівень споживання енергії будівлею дорівнює обсягу її автономного виробництва без участі центрального електропостачання. Системи керування забезпечують лише внутрішній розподіл енергії. Поруч з пасивним будинком, даний тип будівель також об'єктивно неможливо використовувати в системі розподіленої генерації
Активний будинок	Даний тип будівель, шляхом впровадження комбінованого використання ВДЕ з інтелектуальними системи керування, оптимально доповнюють систему розподіленої генерації енергії, як самостійне джерело енергії

З метою ефективного та надійного забезпечення функцій автоматизації, які підвищують комфорт та безпеку, при значному зменшенні енергоспоживання, в сучасній практиці слід застосовувати інтелектуальні системи автоматизації будівель (англ. *BAS – Building Automation System*), також відомі як системи керування будівлями (англ. *BMS – Building Management Systems*) та системи керування енергоспоживанням будівель (англ. *BEMS – Building Energy Management Systems*) [13, 14, 29].

Висновки. Зважаючи на технології побудови, нормативні вимоги до енергоефективних будівель, активний будинок, побудований за концепцією «Smart home» оптимально виступає в ролі активного споживача енергії, що також передбачає використання його як самостійного джерела енергії в системі розподіленої генерації. Враховуючи специфіку роботи ВДЕ активних будинків, яка має полягати в надійному та якісному забезпеченні технологічного процесу електропостачання внутрішнього та зовнішнього споживача, повноцінного впровадження активних будівель можна досягти шляхом комбінованого використання різних видів ВДЕ та високого рівня інтелектуального керування всіма процесами електропостачання та енергоспоживання. У подальших дослідженнях слід приділити увагу питанням поєднання систем керування локальними системами життєзабезпечення будинків у систему інтелектуального керування, на основі технологій нечіткої логіки, штучного інтелекту, Інтернету речей та ін.

Список використаних джерел

1. Моїсєєв В. Чотири роки повномасштабної війни та 64 масовані атаки на енергетику: основні цифри. *The Page*. 24 лютого 2026. URL: <https://thepage.ua/ua/news-energy/chotiri-roki-rovnomasshtabnoyi-vijni-ta-masovani-ataki-na-energetiku>
2. «Комфортні часи скінчилися»: війна в Україні веде до енергетичної кризи чи трансформації галузі? *Radio Свобода*. 13 вересня 2024. URL: <https://www.radiosvoboda.org/a/enerhetychna-kryza-chy-transformatsiya-haluzi/33119314.html>
3. Розподілена електрогенерація буде пріоритетом на найближчі роки – Олексій Кулеба. *Укрінформ*. 26 жовтня 2024. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3920187-rozpodilena-elektrogeneracia-bude-prioritetom-na-najblizci-roki-oleksij-kuleba.html>
4. Кравцов С., Жесан Р., Голик О., Зубенко В. Місце енергоефективних будівель із системами керування в розподіленій генерації енергії. *Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві* : збірн. тез допов. Всеукр. наук.-практ. on-line конф., м. Кропивницький, 13–14



листопада 2024 р. Кропивницький : ЦНТУ, 2024. С. 181–183. URL: <https://kntu.kr.ua/file/content/13789/zbirnyk-tez.pdf>

5. Малиновська А. Україна планує побудувати більш захищену та стійку енергосистему – Шмигаль. *Факти*. 26 березня 2026. URL: <https://fakty.com.ua/ua/ukraine/20260326-ukrayina-planuye-pobuduvati-bilsh-zahishhenu-ta-stijku-energosistemu-shmigal/>

6. Україні треба прискорювати будівництво «зеленої» генерації. *МінПром (MinProm)*. 4 жовтня 2024. URL: <https://minprom.ua/news/317204.html>

7. Держава має підтримати прискорення будівництва 4 ГВт вітроенергетики – експерти. *ГОРДОН*. 29 вересня 2024. URL: <https://gordonua.com/ukr/news/money/derzhava-maje-pidtrimati-priskorennja-budivnistva-4-hvt-vitroenerhetiki-investori-1720380.html>

8. Ткачук Я. Енергонеалежність та енергоефективність увійшли до програми на €50 млрд. – Шмигаль. *Kosatka.Media : Новини енергетики*. 20 липня 2023. URL: <https://kosatka.media/category/elektroenergiya/news/energonealezhnist-ta-energoeektivnist-uvijshli-do-programi-na-50-mlrd>

9. «Енергоефективність – передусім!» : ключовий принцип комплексної відбудови України! Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України : веб-сайт. URL: <https://saee.gov.ua/news/energoeektivnist-peredusim-kliucovii-princip-kompleksnoyi-vidbudovi-ukrayini>

10. Кравцов С. В., Жесан Р. В., Голик О. П. Відновлювані джерела енергії й інші базові компоненти зростання енергоефективності та енергонеалежності. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. Вип. 8(39). Ч. І. Кропивницький : ЦНТУ, 2023. С. 48–56. ISSN 2664-262X(Print), 2707-9449(Online). DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.48-56](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.48-56), URI: [http://mapica.kntu.kr.ua/pdf/8\(39\)_I/8.pdf](http://mapica.kntu.kr.ua/pdf/8(39)_I/8.pdf)

11. Енергоефективні будинки: в Україні розробили вимоги для будівництва за стандартом ЄС. Укрінформ : веб-сайт. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3923242-energoeektivni-budinki-v-ukraini-rozrobili-vimogi-dla-budivnictva-za-standartom-es.html> (

12. Twidell J., Weir T. Renewable Energy Resources. 2nd ed. London and New York : Routledge Taylor & Francis Group, 2006. 601 с. ISBN 0-419-25320-3.

13. Gevorkian P. Alternative Energy Systems in Building Design, 1st ed. New York : McGraw-Hill Companies, Inc., 2009. 512 с. ISBN 978-0-07-162524-1.

14. Levermore G. J. Building Energy Management Systems: Applications to Low-energy HVAC and Natural Ventilation Control. Abingdon : E & FN Spon, 2000. 519 p. ISBN 0419261400, 9780419261407.

15. Басок Б. І., Беляєва Т. Г., Божко І. К., Недбайло О. М., Новіков В. Г., Хибіна М. А. Система електрозабезпечення експериментального будинку типу 0-енергії (площею 300 м²) на основі використання відновлювальних і альтернативних джерел енергії. *Наука та інновації*. 2015. Т. 11, № 6. С. 29–39. ISSN 1815-2066.

16. Денисюк С. П., Базюк Т. М. Особливості формування активного споживача в сучасних електромережах. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2014. № 3. С. 75-79. ISSN 1997-9266.

17. Василенко В. І., Ремізов І. А. Особливості побудови інтелектуальних енергетичних систем будівель та споруд. *Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку* : матеріали VI Міжнар. наук.-тех. та навч.-метод. конф. м. Київ, 04-07 черв. 2019 р. Київ : КП ім. Ігоря Сікорського, 2019. С 21–22.

18. Костик Л. М., Вакуленко О. О., Фіголь П. М. Підвищення надійності систем електропостачання на базі цифрових технологій. *Актуальні задачі сучасних технологій* : збірн. тез доповідей VII Міжнар. наук.-техн. конф. молод. учених та студ., м. Тернопіль, 28-29 лист. 2018 р. Том III. Тернопіль : ТНТУ, 2018. С. 13–14. URL: <http://m.tntu.edu.ua/storage/pages/00000742/Book-3-2018.pdf>

19. ДСТУ 3440-96. «Системи енергетичні. Терміни та визначення». Київ : Держстандарт України, 1997, 45 с.

20. Козирський В. В., Волошин С. М. Основи електропостачання : підруч. Київ : Компринт, 2021. 497 с.

21. Вікіпедія. Вільна енциклопедія : веб-сайт. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/>

22. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/31/oj/eng>

23. Про енергетичну ефективність будівель : Закон України від 2 черв. 2017 р. № 2118. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19>

24. Конспект лекцій з навчальної дисципліни «Енергозбереження та використання поновлюваних джерел енергії». Частина 1 : для студент. 4 курсу спец. 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка /



[уклад. : Р. В. Жесан, О. П. Голик]. Кропивницький : ЦНТУ, 2023. 63 с. URL: <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/12696>

25. Мхитарян Н. М. Человек и жилище. [Нац. акад. наук Украины, Ин-т возобновляемой энергетики]. Киев : Наук. думка, 2012. 309 с. ISBN 978-966-00-1181-6.

26. Мхитарян Н. М. Среда обитания: образы комфорта : монография. НАН Украины, Ин-т возобновляемой энергетики. Киев : Наук. думка, 2018. 572 с. ISBN 978-966-00-1656-9.

27. Шамілов П. Огляд вимог nZEB в Європі, беручи до уваги, що ці стандарти ще не прийняті в Україні : аналітичний звіт. Київ : Громадянська мережа ОПОРА, 2024. 59 с. URL: https://rehouse.org.ua/sites/default/files/1.zvit_nzeb.pdf

28. Энергоефективні технології : навч. посіб. / за заг. ред. А. С. Мандрики. Суми : Сумський держ. унів-т, 2021. 330 с. ISBN 978-966-657-884-9.

29. Shengwei Wang. Intelligent Buildings and Building Automation. 1. *Intelligent buildings*. 2. *Buildings – Mechanical equipment – Automatic control*. I. Title. TH 6012. W 36, 2010. 696 с. dc 22. ISBN 0-203-89081-7.

Дата першого надходження статті до видання: 19.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



S. Kravtsov¹, R. Zhesan¹, O. Holyk¹, V. Zubenko²

¹ **Central Ukrainian National Technical University**

² **Kherson State Agrarian and Economic University**

APPLICATION OF ENERGY-EFFICIENT BUILDINGS WITH CONTROL SYSTEMS IN THE DISTRIBUTED POWER GENERATION OF THE FUTURE

Summary

The article considers the current issue of the role and place of modern energy-efficient buildings with automatic control systems in the future post-war reformed energy system of Ukraine. The professional terminology and basic principles of building power supply systems are presented and summarized. Structural diagrams of centralized and decentralized (distributed) power supply are presented. An analysis of existing types of energy-efficient buildings, known as Passive House (PN), Zero Energy Building (ZEB), Active House and of their analogues, is carried out.

Justifications for the gradual abandonment of powerful central power plants and the decentralization of energy systems, the introduction of intelligent mechanisms for managing the distribution of energy resources and their system integration are expressed. In this context, the role and place of energy-efficient buildings, as consumers and suppliers of electricity in the distributed generation system, is determined by the use of various renewable energy sources and the level of automation of the energy distribution process.

Based on the above, conclusions were drawn. In particular, that the «Smart Home» optimally acts as an active consumer and an independent source of energy in distributed generation systems.

In further scientific research, it is planned to pay attention to the issues of combining control systems for local life support systems of buildings into an intelligent control system, based on fuzzy logic technologies, artificial intelligence, the Internet of Things, etc., as well as improving the processes of energy redistribution between individual objects of decentralized generation.

Keywords: electric energy, energy system, centralized and decentralized power supply, renewable energy sources, automated control, smart grid, passive house, zero-energy building, active house, smart home.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-24>

УДК 621.311

О. О. Мірошник¹, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-6144-7573

В. Г. Пазій¹, ст. викладач

ORCID: 0000-0002-7336-0854

О. А. Савченко¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-6401-0852

Д. Г. Миргород¹, аспірант

ORCID: 0000-0002-5494-6227

Т. І. Галько², ст. викладач

ORCID: 0009-0002-6438-9636

¹ Державний біотехнологічний університет² Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: omiroshnyk@btu.kharkiv.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МІКРОПРОЦЕСОРНОГО ПРИСТРОЮ РС83-В1 КОМПАНІЇ «РЗА СИСТЕМЗ» ДЛЯ МОНІТОРИНГУ АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ МЕРЕЖ 6–10 КВ

Анотація. У статті виконано аналітичне дослідження мікропроцесорного пристрою релейного захисту та автоматики РС83-В1, розробленого компанією «РЗА СИСТЕМЗ». Описано особливості застосування мікропроцесорного пристрою релейного захисту за напругою РС83-В1 для підвищення ефективності моніторингу аварійних режимів повітряних ліній електропередачі 6–10 кВ. Проведено порівняльний аналіз технічних характеристик сучасного цифрового термінала та традиційних електромеханічних реле. Виконано техніко-економічне обґрунтування доцільності модернізації систем захисту за напругою з огляду на зниження експлуатаційних витрат та зменшення часу ліквідації аварій. Стаття містить детальний опис практичних рекомендацій щодо використання пристрою у конкретних умовах експлуатації.

Ключові слова: мікропроцесорний пристрій, релейний захист, захист за напругою, РС83-В1, електроенергетична система.

Постановка проблеми. В процесі експлуатації розподільних електромереж 6–10 кВ однією з найскладніших задач залишається оперативне виявлення та моніторинг аварійних режимів, зокрема однофазних замикань на землю та несиметрії напруг. Традиційна електромеханічна база, яка масово використовується на існуючих підстанціях, не здатна забезпечити необхідну точність вимірювань, функцію осцилографування та інтеграцію в сучасні системи диспетчеризації. Це ускладнює пошук пошкоджених ділянок повітряних ліній та збільшує час перерви в електропостачанні [1]. Відповідно, актуальним є дослідження технічних та економічних аспектів впровадження спеціалізованих цифрових терміналів напруги, таких як РС83-В1 від компанії «РЗА СИСТЕМЗ».

В процесі функціонування електроенергетичної системи (ЕЕС) [2–4] неминуче виникають аварійні режими, які порушують нормальну роботу обладнання та можуть призвести до значних наслідків для всієї системи. Однією з найнебезпечніших аварій у розподільних мережах середньої напруги 6–10 кВ з ізольованою або компенсованою нейтраллю є однофазні замикання на землю (ОЗЗ). Такі пошкодження супроводжуються появою напруги нульової послідовності ($3U_0$) та значною зворотною симетрією напруг (U_2), що призводить до поширення аварійного режиму на великі ділянки мережі та створює серйозну загрозу для стабільності електропостачання.

Особливо критичними однофазні замикання на землю стають в умовах воєнного стану. Енергетична інфраструктура України зазнає систематичних атак, що призводить до приско-

реного зносу обладнання, зниження загальної надійності мережі та обмеження ресурсів для її відновлення. Водночас вимоги до надійності електропостачання суттєво зростають, оскільки необхідно забезпечувати безперебійну роботу об'єктів критичної інфраструктури – засобів зв'язку, банківських установ, державних органів, а також систем водо- та теплопостачання, особливо в опалювальний період [5].

Для оперативної локалізації пошкоджених елементів і запобігання розвитку аварій у електроенергетичних системах широко застосовуються пристрої релейного захисту та автоматики (РЗА). Релейний захист є ключовим елементом забезпечення надійності ЕЕС і виконує функцію автоматичного виявлення аварійних ситуацій з подальшим відокремленням пошкодженої ділянки від справної частини системи. Це дозволяє мінімізувати наслідки аварії, зберегти працездатність більшої частини мережі та створити умови для швидкого відновлення нормального режиму роботи [6].

На сьогодні пристрої РЗА виготовляються на трьох основних елементних базах: електромеханічній, електронній та мікропроцесорній (цифровій). Електромеханічні реле є найстарішою технологією і, попри свій вік, досі становлять значну частку парку обладнання в Україні – за різними оцінками, до 70 % усіх пристроїв релейного захисту в ЕЕС країни продовжують експлуатуватися саме в електромеханічному виконанні. Електронні пристрої РЗА, які свого часу розглядалися як проміжне рішення, через низку технічних обмежень не отримали широкого поширення.

Найсучаснішим і перспективним напрямком розвитку є мікропроцесорні (цифрові) пристрої релейного захисту. Вони активно впроваджуються в українській енергетиці останніми роками, тоді як у розвинених країнах такі системи успішно експлуатуються вже понад 30 років. Цифрові РЗА забезпечують вищий рівень точності, швидкодії, надійності, функціональності та самодіагностики порівняно з попередніми поколіннями. Основними перевагами мікропроцесорних рішень є висока точність (похибка до 2 %), універсальність, самодіагностика, осцилографування, інтеграція в АСУ ТП та низьке енергоспоживання [7–9].

Формулювання мети статті. Проведення комплексного порівняльного аналізу технічних характеристик мікропроцесорного пристрою релейного захисту РС83-В1 та традиційних електромеханічних пристроїв захисту за напругою. Аналіз має встановити рівень ефективності, надійності, технічних переваг, а також техніко-економічної доцільності впровадження сучасних мікропроцесорних рішень для моніторингу та реагування на аварійні режими в електричних мережах напругою 6–10 кВ.

Аналіз останніх досліджень. Надійна та безаварійна експлуатація електроустановок безпосередньо залежить від підвищення технічного рівня систем релейного захисту та автоматики (РЗА), а також від впровадження комплексної автоматизації керування нормальними, аварійними та післяаварійними режимами роботи [2]. Така необхідність зумовлена безперервністю технологічних процесів виробництва, транспортування, розподілу та споживання електричної енергії.

Сучасні автоматизовані системи РЗА базуються переважно на мікропроцесорних (МП) пристроях, які інтегрують у собі десятки, а іноді й сотні функцій захисту, протиаварійної автоматики, контролю та управління в одному компактному терміналі. Важливою перевагою таких пристроїв є можливість їх інтеграції в єдину інформаційну мережу підстанції, що створює умови для реалізації концепцій «цифрова підстанція» та «Smart Grid» [7, 10, 11].

Ще однією ключовою особливістю сучасних МП-пристроїв є використання вільно-програмованої логіки (ВЛ). Ця технологія дозволяє користувачеві самостійно створювати або модифікувати алгоритми роботи пристрою відповідно до специфічних вимог об'єкта, що значно підвищує гнучкість застосування обладнання [12, 13].

Перехід на нову елементну базу не змінює фундаментальних принципів дії захисту та автоматики, а лише суттєво розширює їх функціональні можливості, спрощує експлуатацію та

обслуговування. При цьому в усіх поколіннях РЗА (від електромеханічних до цифрових) зберігаються три основні складові: схемотехніка, логіка роботи (алгоритми) та розрахунок уставок. Різниця полягає лише в їх співвідношенні та реалізації.

В електромеханічних пристроях логіка захисту повністю зрозуміла безпосередньо з принципової схеми – алгоритми прості й наочні. У мікропроцесорних терміналах зовнішня схема значно спрощується, а складні логічні взаємозв'язки «ховаються» всередині програмного забезпечення. Кількість реалізованих алгоритмів у одному пристрої різко зростає, що, з одного боку, підвищує функціональність, а з іншого – висуває значно вищі вимоги до кваліфікації персоналу служби РЗА. Фахівці повинні досконало володіти не лише знаннями електромеханіки, а й сучасними технологіями: правилами роботи з вільно-програмованою логікою, конфігуруванням програмного забезпечення, особливостями живлення, дискретними входами/виходами та питаннями електромагнітної сумісності (ЕМС) [14, 15].

Цифрова підстанція сьогодні є основним елементом інтелектуальної енергетики. У сучасних умовах від безперебійної роботи мережі залежить не лише локальна надійність окремого вузла, а й стабільність обміну інформацією та узгоджена робота всіх елементів енергосистеми в цілому. Саме тому вимоги до функціональності та надійності пристроїв РЗА постійно зростають [16, 17].

Основна частина. На сьогоднішньому ринку України представлено широку номенклатуру мікропроцесорних терміналів РЗА різних виробників, які відрізняються як за функціональними можливостями, так і за вартістю. Одним із перспективних вітчизняних рішень є багатофункціональний мікропроцесорний пристрій РС83-В1 виробництва компанії «РЗА-СИСТЕМЗ» [8].

Пристрій РС83-В1 призначений для реалізації повного комплексу захисту за напругою однієї секції шин у мережах 6–10 кВ (може застосовуватися й в мережах інших класів напруги). Він встановлюється безпосередньо в релейних відсіках комплектних розподільчих пристроїв (КРУ, КРУН, КСО), на панелях, у шафах або в релейних шафах зовнішньої установки. Пристрій може працювати як автономно, так і в складі комплексної системи РЗА [18].

РС83-В1 – це сучасний багатофункціональний цифровий пристрій, виконаний на високопродуктивній елементній базі із застосуванням технології поверхневого монтажу (SMD). Він поєднує в собі функції захисту за напругою, автоматики управління, контролю та сигналізації. Загальний вигляд пристрою РС83-В1 наведено на рис. 1.



Рис. 1. Загальний вигляд пристрою РС83-В1

Основні експлуатаційні можливості пристрою РС83-В1:

- виконання функцій захисту за напругою (ЗМН, ЗПН, ЗНЗ, ОБР) з можливістю гнучкого налаштування логіки спрацювання («І»/«АБО»);
- локальне та дистанційне конфігурування внутрішньої логіки, налаштування аварійного осцилографа, функцій світлодіодної індикації тощо з подальшим збереженням конфігурації;
- дистанційне перемикання двох груп уставок;
- сигналізація спрацювання захистів і автоматики через вихідні реле, світлодіоди та по каналу зв'язку з АСУ;
- реєстрація та зберігання осцилограм у форматі COMTRADE з можливістю перегляду через програму ComTradeViewer;
- ведення журналу подій (до 100 аварійних записів з фіксацією параметрів);
- контроль та індикація положення вимикача, місцеве та дистанційне керування вимикачем;
- вимірювання поточних значень електричних величин (фазні та лінійні напруги, $3U_0$, U_2);
- автоматичне визначення виду пошкодження (дугове/металеве однофазне замикання на землю, несиметрія);
- безперервна самодіагностика та контроль працездатності;
- гальванічна розв'язка всіх входів і виходів;
- висока міцність ізоляції та великий опір ізоляції;
- вбудований астрономічний годинник і календар з енергонезалежним живленням та можливістю синхронізації за протоколами АСУ.

Пристрій забезпечує автоматичну синхронізацію внутрішнього годинника з сигналом зовнішнього джерела точного часу, що гарантує високу точність фіксації подій. Крім того, пристрій повністю реалізує всі функції, наведені в табл. 1.

Аналізуючи функціональні можливості мікропроцесорних пристроїв релейного захисту та автоматики (РЗА) в цілому та терміналу РС83-В1 зокрема, слід підкреслити їх значні переваги. Під час моніторингу повітряної лінії 6–10 кВ за допомогою мікропроцесорних (МП) терміналів у разі спрацювання захисту чи автоматики у внутрішній енергонезалежній пам'яті пристрою автоматично зберігається детальна інформація: точний момент спрацювання, найменш активованого захисту або автоматики, а також осцилограми електричних величин (фазні та лінійні напруги, напруга нульової послідовності $3U_0$, напруга зворотної послідовності U_2) у періоди до аварійної ситуації, під час неї та після її завершення. Завдяки цьому оператор отримує можливість точно відновити хронологію подій, визначити характер пошкодження (дугове чи металеве коротке замикання), а також суттєво звузити зону пошуку пошкодженої ділянки лінії. Реєстрація аварійних режимів здійснюється з високою часовою роздільною здатністю, що дозволяє проводити глибокий післяаварійний аналіз [19].

Додатково термінал РЗА оснащений розвинутою системою самодіагностики, яка постійно контролює справність апаратної частини, входних і вихідних кіл. У разі виявлення будь-яких відхилень пристрій негайно формує відповідне повідомлення. На відміну від традиційних електромеханічних реле, де несправності часто залишаються непоміченими до моменту аварійної ситуації, мікропроцесорні пристрої забезпечують проактивний контроль технічного стану. Зміна уставок захисту в МП-терміналах здійснюється зручно та оперативно через інтуїтивне меню достатньо обрати необхідні значення без механічного втручання в реле. Однією з ключових переваг є можливість повної інтеграції терміналу з системами диспетчерського керування та збору даних (SCADA) за допомогою інтерфейсу RS-485 з протоколом Modbus RTU, що дозволяє здійснювати дистанційний моніторинг, керування та передачу даних у реальному часі.

Для об'єктивної оцінки ефективності сучасних рішень проведено порівняльний аналіз функціональних можливостей пристроїв РЗА на базі класичних електромеханічних реле



Таблиця 1

Перелік функцій, що виконуються пристроєм PC83-B1

№ п/п	Функція	Кількість ступенів захисту	Код ANSI
1	Захист мінімальної напруги (ЗМН U_{ϕ} , U_n) з логікою «І»/«АБО»	2	27
2	Захист максимальної напруги (ЗПН U_{ϕ} , U_n) з логікою «І»/«АБО»	2	59
3	Захист по напрузі нульової послідовності (ЗНЗ $3U_0$) від замикань на землю	2	59N
4	Захист по напрузі зворотної послідовності (ЗНЗП U_2)	1	59-2 / 46V
5	Журнал аварій та реєстрація подій	+	-
6	Осцилографування аварійних процесів	+	-
7	Блокування несправності напруги (БНН)	+	VTs
8	Керування та сигналізація	+	-

Таблиця 2

Порівняння характеристик електромеханічних реле та мікропроцесорних пристроїв

№	Параметр	Електромеханічні реле	Мікропроцесорні пристрої
1	Принцип дії	Грунтується на контактах і електромагнітах	Працюють за алгоритмами, заданими програмою
2	Швидкість реакції	Обмежена механічними процесами	Висока швидкість обробки
3	Гнучкість і налаштування	Обмежені механічною конструкцією	Висока гнучкість конфігурації та програмування
4	Складність алгоритмів захисту	Базові алгоритми	Широкий спектр, включаючи гармонічний аналіз та осцилографування
5	Надійність	Надійні, але зношуються з часом	Залежить від електронних компонентів + самодіагностика
6	Інтеграція та дистанційне керування	Відсутні	Легко інтегрується в SCADA/АСУ
7	Технічне обслуговування	Періодичне калібрування та чистка	Самодіагностика + оновлення ПЗ

(зокрема, серій РН-53, РН-54, а також реле часу типу ЕВ) та мікропроцесорних терміналів на прикладі пристрою РС83-В1. Результати порівняння основних технічних характеристик наведено в табл. 2 (адаптовано під функції захисту за напругою).

Електромеханічні реле мають переваги простоти та перешкодостійкості, але обмежену швидкість, точність, потребують обслуговування та не забезпечують осцилографування чи журнал аварій. На відміну від них, мікропроцесорні термінали (РС83-В1) мають високу точність (до 2 %), гнучкість, інтеграцію, низьке споживання (5 Вт), самодіагностику, реєстрацію осцилограм та журналу подій [20, 21].

Оцінка доцільності впровадження мікропроцесорного терміналу РС83-В1 замість традиційної електромеханічної схеми захисту за напругою (наприклад, комплект реле РН-53/РН-54 для ЗМН/ЗПН, реле типу РН-59 або аналог для ЗНЗ по ЗУ0, реле часу серії ЕВ та проміжні реле) вимагає комплексного порівняння капітальних витрат, експлуатаційних витрат, енергоспоживання та непрямих економічних ефектів від скорочення часу ліквідації аварій. Аналіз проведено на основі офіційних технічних характеристик виробника (РС83-В1: споживання 5 Вт + 0,25 Вт/реле, маса $\leq 1,8$ кг, ресурс ≥ 25 років, самодіагностика, журнал 100 подій, осцилографування), ринкових цін на аналогічне обладнання в Україні станом на 2025–2026 рр. та типових показників експлуатації розподільних мереж 6–10 кВ [22, 23].

1. Порівняння капітальних (початкових) витрат

Традиційна електромеханічна схема для захисту однієї секції шин 6–10 кВ вимагає щонайменше 6–8 окремих реле + панель + монтажні роботи:

- 2–3 реле напруги (РН-53/РН-54) – 350...1320 грн/шт. (в середньому 800 грн);
- реле для ЗНЗ по ЗУ0 – 1000...1500 грн;
- 2–3 реле часу (ЕВ-212, ЕВ-217) – 500...700 грн/шт.;
- проміжні реле + допоміжні елементи – 1500 грн;
- монтажна панель + проводка + налагодження – 4000...6000 грн.

Загальна вартість традиційної схеми: 12 000...18 000 грн (з урахуванням робіт).

Мікропроцесорний термінал РС83-В1 (один компактний пристрій масою 1,8 кг, ІР54, модульна конструкція):

- вартість пристрою (за ринковими пропозиціями аналогів серії РС83 та оптимальним співвідношенням ціна/якість від виробника) – 22 000...28 000 грн;
- монтаж + налаштування (значно простіше, 1–2 дні) – 3000...5000 грн.

Загальна вартість впровадження РС83-В1: 25 000...33 000 грн.

Різниця початкових інвестицій: +13 000...15 000 грн на користь мікропроцесорного рішення (одноразова переплата).

2. Порівняння річних експлуатаційних витрат

Електромеханічні реле:

- планово-попереджувальні перевірки (2–3 рази на рік: калібрування пружин, чистка контактів, перевірка характеристик) – 4000...6000 грн/рік на одну секцію (з урахуванням праці, приладів, транспортних витрат);
- ремонт/заміна зношених елементів (контакти, котушки) кожні 3–5 років – 2000...3000 грн;
- відсутність самодіагностики → додаткові витрати на позапланові перевірки після аварій – 1500 грн/рік у середньому.
- Мікропроцесорний термінал РС83-В1:
 - самодіагностика + контроль входів/виходів 24/7 → перехід до обслуговування «за фактичним станом» (1 перевірка кожні 5 років);
 - річні витрати на обслуговування – 800...1200 грн (перевірка загальних характеристик + оновлення ПЗ);



– журнал аварій та осцилограми дозволяють дистанційний аналіз через RS-485 (Modbus RTU) → економія на виїздах персоналу 2000 грн/рік.

Річна економія на обслуговуванні: 4000...6000 грн (зниження на 60...70 %).

3. Економія на енергоспоживанні оперативного струму

Традиційна схема (6–8 котушок реле): сумарне споживання 20–40 ВА (постійно). РС83-В1: 5 Вт (≈ 5 ВА) у режимі очікування + максимум +2 Вт при спрацюванні всіх реле.

Річна економія (при тарифі оперативного струму $\approx 0,5$ грн/кВт·год, 8760 год/рік): $25 \text{ ВА} \times 8760 \text{ год} \times 0,5 \text{ грн} \approx 110 \text{ грн/рік}$ (немає суттєвого впливу, але при великій кількості приєднань на підстанції накопичується).

4. Непрямий економічний ефект – скорочення збитків від аварій та недовідпуску електроенергії.

Найсуттєвіша складова (за даними обленерго та наукових робіт з модернізації РЗА):

– традиційні реле не фіксують осцилограми та журнал подій → час пошуку пошкодження на ПЛ 6–10 кВ (особливо ОЗН) становить 4...8 год.;

– РС83-В1: фіксує точні значення $3U_0$, U_2 , осцилограми з роздільною здатністю мілісекунди + журнал 100 подій → час локалізації скорочується до 1...2 год. (зниження на 50...75 %).

Середній показник SAIDI в розподільних мережах України – 3...6 год/споживача/рік. Зниження на 0,5–1 год на приєднання завдяки швидкому аналізу аварійних режимів. Вартість 1 год недовідпуску для середнього промислового/комунального споживача – 5000...15 000 грн (штрафи, простій обладнання, втрати населення).

Таблиця 3

Техніко-економічні показники

Показник	Електромеханічна схема	РС83-В1 (МП)	Економія за 10 років
Початкові капітальні витрати, грн.	12000...18000	25000...33000	-13 000 (переплата)
Річні експлуатаційні витрати, грн.	6000...9000	1000...1500	+50000...75000
Енергоспоживання (річне, вартість), грн.	150...300	30...50	+1200...2500
Збитки від аварій (річні), грн.	20000...50000	5000...15000	+150000...350000
Загальна економія за 10 років (ТСО), грн.	-	-	+180000...400000
Термін окупності, років	-	2,0...3,5	-

Річна економія від зменшення часу аварій: 15 000...40 000 грн на одну секцію шин (залежно від навантаження). Основні техніко-економічні показники наведені у табл. 3.

Термін окупності складає:

$$T = (\Delta_{\text{Капітал}}) / (\Delta_{\text{Експлуатація}} + \Delta_{\text{Збитки від аварій}}) = 13\,000 \dots 15\,000 \text{ грн} / (5000 + 15\,000 \dots 25\,000 \text{ грн}) \approx 2,0 \dots 3,5 \text{ роки.}$$

5. Додаткові якісні та стратегічні переваги:

- Зниження ризиків кібератак та помилок персоналу завдяки самодіагностиці та дистанційному моніторингу.
- Можливість інтеграції в АСУ ТП/SCADA без додаткових витрат (RS-485 Modbus RTU вже вбудований).
- Підвищення надійності (середнє напрацювання на відмову $\geq 100\,000$ год, термін служби 25 років).
- Відповідність вимогам Smart Grid та цифрової підстанції (IEC 61850 при подальшій модернізації).
- Екологічний аспект: менше міді та матеріалів, менше енергоспоживання.

Отже, впровадження РС83-В1 є технічно обґрунтованим і економічно вигідним рішенням. Переплата на старті повністю окупиться протягом 2–3,5 років за рахунок різкого зниження експлуатаційних витрат та збитків від аварій. За 10 років експлуатації чиста економія на одну секцію шин становить 180 000...400 000 грн. У масштабах підстанції з 10–20 приєднаннями ефект зростає в рази. Це дозволяє рекомендувати РС83-В1 як оптимальний вибір для модернізації розподільних мереж 6–10 кВ в умовах воєнного стану та переходу до концепції Smart Grid.

Висновок. Порівняння сучасних мікропроцесорних пристроїв релейного захисту та автоматики, зокрема на прикладі пристрою РС83-В1, з традиційними електромеханічними реле свідчить, що останні мають низку суттєвих обмежень, серед яких обмежені функціональні можливості, механічний знос, а також відсутність можливостей осцилографування та ведення журналу подій. Водночас прийняття рішення щодо переходу на мікропроцесорні пристрої повинно здійснюватися з урахуванням конкретних вимог до системи, її складності та необхідного рівня інтеграції, оскільки у деяких випадках доцільним може бути комбіноване використання різних типів захисту для досягнення оптимального техніко-економічного балансу. Сучасні мікропроцесорні пристрої поступово витісняють традиційні рішення, поєднуючи в собі функції захисту, моніторингу та сигналізації, що дозволяє підвищити чутливість системи, скоротити час ліквідації аварійних режимів і створює передумови для впровадження концепцій Smart Grid. При цьому ефективний вибір обладнання має базуватися на комплексній оцінці витрат протягом життєвого циклу, включаючи початкові інвестиції, витрати на обслуговування та програмне забезпечення протягом щонайменше десяти років. Проведені дослідження та тестування пристрою РС83-В1 підтвердили його відповідність сучасним експлуатаційним вимогам, високу надійність та відносну простоту освоєння, що дозволяє рекомендувати його як ефективне рішення для модернізації електричних мереж напругою 6–10 кВ.

Список використаних джерел

1. Al Issa H. A., Pazyi V., Miroshnyk O., Moroz O., Savchenko O., Halko S. Determination of a Line with a Single-Phase Short Circuit in the Distribution Network Using the Method of Signal Input. *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine. 2023. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312925>
2. Лежнюк П. Д., Рубаненко О. Є., Гунько І. О. Оптимізація режимів електричних мереж з відновлюваними джерелами електроенергії. Монографія. Вінниця : ВНТУ, 2018. 174 с.
3. Savchenko O., Miroshnyk O., Moroz O., Trunova I., Sereda A., Dudnikov S., Kozlovskiy O., Buinyi R., Halko S. Improving the Efficiency of Solar Power Plants Based on Forecasting the Intensity of Solar Radiation Using Artificial Neural Networks. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine. 2021. 137–140. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570009>
4. Галько С. В. Технології та засоби перетворення відновлюваних джерел енергії для приватних домогосподарств: монографія / С. В. Галько, В. Я. Жарков, А. В. Жарков. Мелітополь : Люкс, 2019. 215 с.

5. Ding Y., Chen F. F., Zhang Y., Yu H. W., Lan J. B. Design of substation-area protection and control equipment based on backboard bus. *Autom. Elect. Power Syst.* 2014. 38(24). 102–107.
6. Teca G., Natkaniec M. StegoBackoff: Creating a Covert Channel in Smart Grids Using the Backoff Procedure of IEEE 802.11 Networks. *Energies*. 2024. 17(3). 716. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17030716>
7. Miroshnyk O., Moroz O., Shchur T., Chepizhnyi A., Qawaqzeh M., Kocira S. Investigation of Smart Grid Operation Modes with Electrical Energy Storage System. *Energies*. 2023. 16(6). 2638. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16062638>
8. Мікропроцесорні пристрої релейного захисту та автоматики серії PC83. Пристрій PC83-B1. <https://rzasystems.com/product/rs83-v1/>
9. Мірошник О. О., Пазій В. Г., Миргород Д. Г., Галько С. В., Ганус Р. О. Дослідження та порівняння характеристик мікропроцесорного пристрою релейного захисту PC830-ДЗ компанії «РЗА СИСТЕМЗ» з електромеханічними та сучасними цифровими аналогами. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Технічні науки*. Запоріжжя: ТДАТУ, 2025. 25(2). 62–70. DOI: <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-7>
10. Pazyi V., Miroshnyk O., Shchur T., Halko S., Nikolov M., Idzikowski A. Development of Simulation Model of Single-Phase Circuit Lock in the DigSILENT POWERFACTORY Program. *System Safety: Human – Technical Facility – Environment*. 2023. 5(1). 350–358. DOI: <https://doi.org/10.2478/czoto-2023-0038>
11. Siemens. SIPROTEC 7SJ80 – Overcurrent Protection Relay. URL: <https://www.siemens.com/global/en/products/energy/energy-automation-and-smart-grid/protection-relays-and-control/siprotec-compact/overcurrent-and-feeder-protection/overcurrent-protection-siprotec-7sj80.html>
12. Siemens. SIPROTEC 7SJ80 – User Manual. URL: <https://www.manualslib.com/manual/1945624/Siemens-Siprotec-7sj80.html>
13. Schneider Electric. Easergy P3 – Technical Data Sheet [Електронний ресурс]. URL: <https://www.se.com/us/en/download/document/P3TDSxxxxxEN>
14. Schneider Electric. Easergy P3 – User Manual for P3U10, P3U20, and P3U30. URL: https://www.se.com/us/en/download/document/P3U_en_M-NAM
15. Schweitzer Engineering Laboratories (SEL). SEL-751 – Feeder Protection Relay [Електронний ресурс]. URL: <https://selinc.com/products/751>
16. Schweitzer Engineering Laboratories (SEL). SEL-751 Technical Datasheet [Електронний ресурс]. URL: <https://selinc.com/api/download/10734>
17. IEEE Power System Protective Relays: Principles and Practices [Електронний ресурс]. URL: <https://site.ieee.org/sas-pesias/files/2016/12/PowerSystemProtectiveRelaysPrinciplesAndPractices.pdf>
18. Xiong C., Su Y., Zhang D., Chen L., Zhang H., Li Q. A New Distributed Robust Power Control for Two-Layer Cooperative Communication Networks in Smart Grids with Reduced Utility Costs. *Energies*. 2023. 16(6). 2911. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16062911>
19. Liu Y., Gao H., Gao W., Peng F. Development of a Substation-Area Backup Protective Relay for Smart Substation. *IEEE Trans. Smart Grid*. 2017. 8. 2544–2553.
20. Popescu C., Apostu S. A., Rădulescu I. G., Mureșan J. D., Brezoi A. G. Energizing the Now: Navigating the Critical Landscape of Today's Energy Challenges – An In-Depth Review. *Energies*. 2024. 17(3). 675. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17030675>
21. Lima D. A. C., Bernardon D. P., Morais A. P., Oliveira A. L., Hokama W. S., Conceição J. B. R., Sartori Â. F. Review of Bus Differential Protection Using IEC 61850. *Energies*. 2022. 15(24). 9537. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15249537>
22. Kim M.-S., Kang S.-H. Centralized Multiple Back-Up Protection Scheme with Sharing Data between Adjacent Substations Based on IEC 61850. *Energies*. 2022. 15(12). 4195. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15124195>
23. Cao R.B. Implementation of digital integrated protection and control system. *Elect. Power Autom. Equip.* 2014. 34(5). 149–155.

Дата першого надходження статті до видання: 17.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 10.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)





O. Miroshnyk¹, V. Pazyi¹, O. Savchenko¹, D. Myrgorod¹, T. Halko²

¹ State Biotechnological University

² Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

RESEARCH ON THE EFFICIENCY OF USING THE MICROPROCESSOR DEVICE PC83-B1 OF THE “RPA SYSTEMS” COMPANY FOR MONITORING EMERGENCY MODES OF 6–10 KV GRIDS

Summary

This paper presents a comprehensive study of the effectiveness of applying the PC83-B1 microprocessor-based relay protection and automation device developed by “RPA Systems” for monitoring emergency operating conditions in 6–10 kV distribution networks. The relevance of the research is conditioned by the increasing requirements for reliability, selectivity, and speed of fault detection in medium-voltage networks, especially under conditions of aging infrastructure and heightened operational risks. The main objective of the study is to perform a detailed comparative analysis between conventional electromechanical voltage protection schemes and the modern PC83-B1 microprocessor-based device, with a focus on technical performance, operational reliability, and economic efficiency. Particular attention is paid to the device’s ability to detect and monitor typical emergency modes, such as single-phase-to-ground faults and voltage asymmetry, which are common in networks with isolated or compensated neutral. The PC83-B1 device is analyzed as a multifunctional digital terminal that integrates protection, control, monitoring, and signaling functions within a single compact unit. Its key features include high measurement accuracy (up to 2 %), built-in self-diagnostics, flexible programmable logic, and the ability to measure phase and line voltages. The device also supports remote configuration and integration into supervisory control and data acquisition systems via RS-485 using the Modbus RTU protocol, enabling its use within modern digital substations and Smart Grid environments. A comparative assessment demonstrates that, unlike electromechanical relays, the PC83-B1 provides advanced functionalities such as oscillography, detailed fault analysis, and continuous condition monitoring, which significantly improve the accuracy and speed of fault localization. This leads to a substantial reduction in outage duration and enhances overall system reliability. In addition to quantitative benefits, the study highlights qualitative advantages such as improved operational safety, reduced human error due to automation and self-diagnostics, enhanced data availability for post-fault analysis, and compliance with modern digitalization trends in power engineering. The device’s adaptability and scalability make it suitable for a wide range of applications in distribution networks and support the transition toward Smart Grid concepts. The results of the research confirm that the PC83-B1 microprocessor-based device meets modern technical requirements and provides a reliable, efficient, and economically justified solution for upgrading relay protection systems in 6–10 kV networks.

Keywords: microprocessor device, relay protection, voltage protection, PC83-B1, power system.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-25>

УДК 378.147

Н. О. Перетяка, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-3370-2140

*Мелітопольський коледж Таврійського державного агротехнологічного університету
імені Дмитра Моторного*

e-mail: peretiaka.nataliia@mctsau.org

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО АКТИВІЗАЦІЇ НАВЧАЛЬНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ СТУДЕНТІВ ТЕХНІЧНИХ НАВЧАЛЬНИХ ЗАКЛАДІВ

Анотація. У статті розглянуто метод проєктів як сучасний освітній інструмент для викладання фізики у коледжі. Показано його значення для формування дослідницьких компетентностей, розвитку критичного мислення та підвищення мотивації студентів. Проаналізовано класифікацію дослідницьких, практико-орієнтованих, інформаційних, творчих проєктів та запропоновано алгоритм їх організації: постановка проблеми, планування, виконання, презентація та оцінювання. Визначено переваги проєктного навчання – інтеграція знань, практична спрямованість, розвиток командної роботи. Надані рекомендації з організації проведення конкурсу проєктів з фізики. Окреслено основні переваги та недоліки впровадження методу проєктів. Практичне значення дослідження полягає у можливості використання запропонованих рекомендацій викладачами фізики для вдосконалення навчального процесу.

Ключові слова: компетентності, метод проєктів, мотивація студентів, конкурс проєктів, фізика.

Постановка проблеми. В статті 6 «Засади державної політики у сфері освіти та принципи освітньої діяльності» Закону про Освіту визначено компетентнісний, особистісно орієнтований та практико-орієнтований підходи, що створюють основу для використання методу проєктів. Стаття 55 «Права та обов'язки педагогічних працівників» гарантує академічну свободу, включно з правом обирати форми, методи і засоби навчання, що закріплює можливість застосування методу проєктів [1].

Метод проєктів широко використовується в технічних закладах освіти, оскільки він поєднує теоретичні знання з практичними навичками та сприяє формуванню професійних компетентностей здобувачів освіти. Така освітня технологія активізує навчальну діяльність, мотивує до самостійного пошуку рішень і дозволяє інтегрувати дисципліни у міждисциплінарні проєкти.

Аналіз останніх досліджень. Проєктне навчання як складова освітнього процесу забезпечує самостійне здобуття й систематизацію знань, розвиток умінь орієнтуватися в інформаційному просторі, бачити проблему і приймати ефективні рішення [2]. Проєктне навчання полягає у постановці задачі групі студентів, яку вони мають презентувати й продемонструвати рішення. У процесі роботи застосовуються набуті знання та вдосконалюються навички розв'язання задач, важливі для майбутнього працевлаштування [3]. Проєктне навчання у вишах сприяє розвитку професійних та особистісних компетентностей, формує дослідницькі навички й самостійне мислення, забезпечуючи практичне застосування знань у міждисциплінарних завданнях. [4]. Дослідження [5] підкреслює важливість впровадження проєктного навчання в університетах для розвитку метакогнітивної обізнаності та підвищення мотивації студентів. Особливої важливості проєктна діяльність набуває при викладанні фізики, як базової природничої науки [6], [7], [8], [9], [10]. Результати дослідження [11] свідчать про те, що проєктне навчання суттєво покращує як когнітивні, так і практичні навички, сприяючи розвитку критичного мислення

та командної роботи. Проте проблеми практичного впровадження методу проєктів у вищій та професійній освіті залишаються невирішеними.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою статті є обґрунтування ефективності використання методу проєктів у викладанні фізики та визначення його ролі у формуванні професійних і загальних компетентностей здобувачів освіти. Для досягнення поставленої мети сформульовані завдання дослідження: визначити особливості застосування методу проєктів у викладанні фізики, виявити недоліки запровадження методу проєктів та запропонувати шляхи їх подолання.

Основна частина. Застосування методу проєктів в закладах освіти II–IV рівня акредитації, на відміну від загальноосвітніх навчальних закладів, має свої особливості.

1. Компетентнісний підхід. Метод проєктів сприяє формуванню фахових компетентностей студентів: уміння працювати з інформацією, застосовувати знання на практиці, критично мислити та бути креативними.

2. Практико-орієнтованість. Проєктна діяльність наближує навчання до реальних виробничих і професійних ситуацій за спеціальністю.

3. Інтеграція знань. Виконання проєктів потребує міждисциплінарного підходу: студенти поєднують знання з різних предметів (фізика, математика, інформатика, технології), що формує цілісне бачення професійних завдань.

4. Розвиток комунікативних навичок. Робота над проєктами передбачає співпрацю в групах, презентацію результатів, захист і аргументацію власних рішень, що формує навички командної роботи та професійної комунікації.

5. Академічна свобода викладача. Викладач має можливість самостійно визначати тематику, структуру та методику реалізації проєктів, адаптуючи їх до освітньої програми та потреб конкретної спеціальності.

6. Мотиваційний ефект. Практична значущість результатів роботи підвищує інтерес студентів до навчання та формує їхню мотивацію.

7. Формування навичок самоосвіти. Метод проєктів стимулює пошук інформації, роботу з джерелами, використання сучасних технологій, що готує студентів до безперервного професійного розвитку.

Для формування професійних компетентностей студентів коледжів доцільно використовувати такі методи проєктів:

- Дослідницькі (експериментальні роботи, моделювання фізичних процесів).
- Практико-орієнтовані (проєкти, пов'язані з майбутньою професією).
- Інформаційні (створення презентацій, відео, буклетів з фізичних тем).
- Творчі (інтеграція фізики з дизайном, технічними проєктами тощо).

Організація проєктної діяльності у коледжі передбачає реалізацію послідовних етапів (рис. 1):

На етапі «Постановка проблеми» викладач формулює навчальну тему проєкту у вигляді проблемного запитання або практичного завдання. Студенти аналізують умови, мету завдання та очікувані результати. Для постановки проблеми, яку необхідно розв'язати, рекомендується використовувати мозковий штурм або SWOT-аналіз.

На етапі «Планування» студенти складають план реалізації проєкту, розподіляють ролі в групі, визначають джерела інформації. Викладач допомагає структурувати етапи виконання

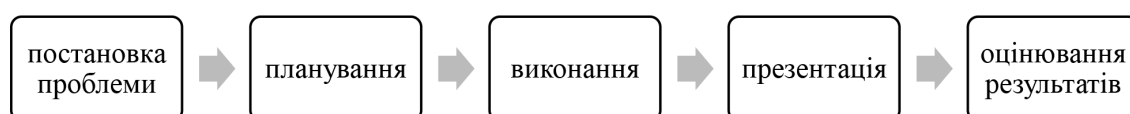


Рис. 1. Етапи виконання проєктів



проєкту, надає терміни та критерії оцінювання. Для планування проєкту доцільно оформити план у вигляді таблиці або дорожньої карти.

На етапі «Виконання» студенти проводять дослідження, експерименти, створюють моделі тощо. Викладач здійснює супровід: консулює, коригує та заохочує самостійність. При виконанні важливо фіксувати проміжні результати у щоденнику проєкту.

На етапі «Презентація» студенти готують захист: демонстрацію проєкту у вигляді презентації, пояснюють рішення, відповідають на запитання. Презентація може відбуватися в різних форматах: презентація в Power Point, Canva, усна презентація, відео тощо. Презентацію готового проєкту необхідно подавати як комплексну роботу і оцінювати не лише зміст та комунікативні навички, а й уміння використовувати сучасні технології для виконання та оформлення проєкту. Зокрема, використання таких цифрових технологій, як онлайн-симуляції, мультимедійні презентації, віртуальні лабораторії тощо.

На етапі «Оцінювання» викладач оцінює зміст, оформлення, інноваційність та командну роботу. Також, можливе самооцінювання та взаємооцінювання студентів. Викладач здійснює зворотний зв'язок і надає рекомендації студентам для подальшого вдосконалення проєктної роботи.

Вказані рекомендації організації проєктної діяльності можна адаптувати при використанні методу проєктів до будь-якої дисципліни або спеціальності.

У відокремленому структурному підрозділі «Мелітопольський коледж Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного» при викладанні курсу фізики для студентів першого та другого курсу активно використовується метод проєктів. Так, при завершенні вивчення кожного розділу студентам пропонується зробити проєкт на запропоновану тему, або на вільну тему з тематики розділу. Метою виконання тематичного проєкту є закріплення та систематизація отриманих знань; формування навичок самостійного пошуку та аналізу інформації; розвиток умінь застосовувати теоретичні положення на практиці; стимулювання творчого мислення та самостійного вирішення завдань.

Проєкт може мати різні форми: дослідницька робота з аналізом літературних джерел та власними висновками; практична розробка (модель, алгоритм); презентація або доповідь, що узагальнює результати вивчення теми; колективний проєкт, який передбачає співпрацю студентів у групі.

Оцінювання тематичних проєктів здійснюється за такими критеріями: Актуальність та відповідність темі розділу. Самостійність виконання та оригінальність ідей. Якість оформлення та дотримання стандартів (графічних, текстових, бібліографічних). Практична значущість результатів. Вміння презентувати та аргументувати власні висновки.

Аналіз впливу проєктної діяльності на якість засвоєння знань представлено у вигляді порівняльної таблиці (табл. 1).

З таблиці видно, що проєктне навчання трансформує освітній процес у активну, творчу та практично орієнтовану форму, що сприяє глибшому засвоєнню знань.

В Мелітопольському коледжі Таврійського державного агротехнологічного університету проводиться щорічний конкурс студентських проєктів з фізики. Кращі проєкти надалі інтегруються у навчальний процес, забезпечуючи підвищення його ефективності та практичної спрямованості.

Організація конкурсу складається з шести етапів, які наведені у вигляді структурованої схеми (рис. 2). Вказані етапи придатні для проведення подібного заходу з будь-якої дисципліни як в офлайн-, так і в онлайн-формі.

Конкурс проєктів з фізики є потужним активатором навчання, бо поєднує мотивацію, діяльність, компетентності, емоції та практичний результат.

Таблиця 1

Порівняння засвоєння матеріалу студентами

Аспект навчання	Традиційне засвоєння	Засвоєння через проєкт
Мотивація	Залежить від викладача, часто пасивна	Висока, студент сам обирає тему та форму роботи
Рівень активності	Переважно слухання та відтворення	Активна діяльність: пошук, аналіз, створення продукту
Глибина знань	Запам'ятовування фактів	Усвідомлене застосування та інтеграція знань
Критичне мислення	Обмежене, орієнтоване на готові відповіді	Розвинене: аналіз, порівняння, аргументація
Практична значущість	Теорія без прямого застосування	Реальні приклади, моделі, презентації, розробки
Комунікативні навички	Мінімальні (відповіді на запитання)	Розвиток через групові проєкти та захист результатів
Якість засвоєння знань	Короткочасна пам'ять	Довготривала пам'ять завдяки практиці та досвіду



Рис. 2. Етапи проведення конкурсу проєктів

Мотиваційний ефект від конкурсу проєктів відбувається завдяки створенню ситуації успіху: студенти прагнуть показати себе, що стимулює їх до глибшого опрацювання матеріалу. З'являється зовнішня мотивація – визнання, нагороди та внутрішня мотивація – цікавість, самореалізація.

Проектна діяльність є формою активного навчання завдяки тому, що студенти не просто відтворюють знання, а конструюють власні рішення. Відбувається інтеграція теорії та практики:



фізичні закони застосовуються у реальних моделях, експериментах, винаходах. Формується дослідницьке мислення: постановка проблеми, гіпотеза, експеримент, аналіз результатів.

Завдяки конкурсу проєктів відбувається розвиток ключових компетентностей. Критичне мислення: студенти порівнюють різні підходи, шукають оптимальні рішення. Комунікація: захист проєкту вимагає чіткої аргументації та презентації. Командна робота: більшість конкурсів передбачає співпрацю, що формує соціальні навички. Цифрова грамотність: використання симуляцій, графіків, презентацій, онлайн-інструментів.

Крім того розвивається емоційний та креативний аспект. Конкурс сприяє емоційній залученості: студенти переживають за результат, що підсилює запам'ятовування. Стимулює креативність: пошук нестандартних рішень,

В результаті підвищується освітній результат. Знання стають функціональними: студенти бачать, як фізика працює в житті. Формується довготривала пам'ять: інформація закріплюється через практику та емоції. Виникає ефект навчання через діяльність, який є найефективнішим.

Таким чином конкурс проєктів є не лише навчальним, а й святковим заходом, який активує навчання, підкреслює практичну цінність фізики, розвиває дослідницькі навички, підвищує мотивацію до навчання, інтегрує знання, формує у студентів компетентності XXI століття: критичне мислення, комунікацію, креативність та співпрацю.

У процесі запровадження методу проєктів виявлено основні недоліки: обмеженість можливостей технічних ресурсів, потреба у додатковому часі та складність оцінювання групових проєктів.

Для подолання цих недоліків застосовано такі шляхи. За відсутності у студента доступу до мережі Інтернет при онлайн захисті проєктів презентацію демонструє викладач, а студент доповідає та відповідає на запитання приєднавшись з телефону, використовуючи мобільний інтернет, який є доступним і стабільним для відеозв'язку.

Для скорочення часу роботи студента над проєктом викладач має надавати теми міні-проєктів, рекомендувати та демонструвати можливості графічних інтернет-платформ для швидкого створення презентації доповіді.

Для скорочення часу на організацію конкурсу проєктів, варто оптимізувати процеси та використати готові інструменти. Зокрема, застосовувати єдине положення та стандартні шаблони документів (правила, критерії оцінювання, форма заявки тощо), які можна використовувати щороку без значних змін. Використовувати цифрові технології: виконувати онлайн-реєстрацію Google Forms або Microsoft Forms для швидкого збору заявок та автоматичного формування списків учасників. Використовувати автоматизовані нагадування: розсилка через електронну пошту або месенджери для учасників і журі. Технічна оптимізація організації конкурсу полягає у обранні однієї системи (Zoom, Microsoft Teams) зі створенням єдиного посилання на відеоконференцію. Для оптимізації роботи організаторів конкурсу пропонується конкурсні проєкти, організаційні документи та сертифікати учасників розташувати на Google диску із зазначенням посилання в програмі конкурсу та запрошенні.

Для оптимізації часу на проведення конкурсу пропонується використовувати тайм-менеджмент: час захисту проєкту до 7 хвилин.

Для оптимізації часу оцінювання проєктів пропонується ввести єдині критерії оцінювання з такими показниками: інноваційність, практична значущість, презентація, міждисциплінарний підхід для мінімізації тривалості дискусії. Членам журі зручно оцінювати проєкти в електронній таблиці Google Sheets чи Excel, що дозволяє автоматично підрахувати бали.

Таким чином, завдяки цифровізації, автоматизації та чіткому таймінгу відбувається скорочення часу на організацію і проведення конкурсу проєктів.

Висновки. Метод проєктів є ефективним освітнім інструментом для активізації навчальної діяльності здобувачів освіти, оскільки поєднує теоретичні знання з практичними навичками.

Запровадження проєктної діяльності при викладанні фізики сприяє формуванню дослідницьких компетентностей, розвитку критичного мислення та підвищенню мотивації до навчання. Класифікація проєктів «дослідницькі, практико-орієнтовані, інформаційні, творчі» дозволяє адаптувати метод до різних освітніх цілей і рівнів підготовки студентів. Алгоритм організації проєктної діяльності «постановки проблеми, планування, виконання, презентація, оцінювання» забезпечує системність та прозорість процесу. Цифровізація, автоматизація та таймінг дозволяє подолати недоліки запровадження навчання через проєкти. Практичне значення дослідження полягає у можливості використання запропонованих рекомендацій викладачами фізики для вдосконалення навчального процесу. Подальші дослідження полягають у дослідженні проєктно-орієнтованого навчання для міждисциплінарних проєктів.

Список використаних джерел

1. Закон України «Про освіту». 05 вересня 2017 р. № 2145-VIII. Відомості Верховної Ради України. 2017. № 38–39. С. 380.
2. Кобцева О. Проєктно-орієнтоване навчання у вищій медичній освіті. *SWorldJournal*. 2024. № 2 (26-02). С. 88–93.
3. Upadhye, Vaishali & Madhe, Swati & Joshi, Dr.Atul. (2022). Project Based Learning as an Active Learning Strategy in Engineering Education. *Journal of Engineering Education Transformations*. 36. 18–24. 10.16920/jeet/2022/v36is1/22169
4. Карпенко О. Г., Сальник І. В., Дещенко О. М. Стратегії впровадження проєктного навчання в освітній процес закладів вищої освіти. Педагогічна академія: *Наукові записки. Вип. 16*. 2025. С. 1–21. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15017511>
5. Čavić, Milan & Beljin, Milica & Horvat, Sasa & Bogdanovic, Ivana & Stanisavljevic, Jelena. The impact of project-based learning in physics education on university students' motivation to learn and metacognition. *Zbornik Instituta za pedagogika istrazivanja*.> 55. 2023. 275–299. 10.2298/ZIP12302275C
6. Molina, Vanessa & Guzman, Daniel & Montalvo, Teodoro & García-Salcedo, Ricardo. 2025. Teaching competencies in physics for engineering education: A qualitative analysis from teaching practice. 10.48550/arXiv.2510.27674
7. Тарадуда А., Тарадуда О. Метод наукових проєктів при викладанні фізики в закладах освіти. Матеріали конференції МЦНД. Херсон. 20 березня 2020. С. 50–51. URL: <https://ojs.ukrlogos.in.ua/index.php/mcnd/article/view/1428>
8. Орлова Н. В. Використання проєктних технологій на уроках фізики для розвитку інноваційної особистості. III Міжнародної науково-практичної конференції «Підготовка майбутніх учителів фізики, хімії, біології та природничих наук в контексті вимог Нової української школи». 26-27.05.2022. С. 193–196. URL: http://dspace.tnpu.edu.ua/bitstream/123456789/25766/1/56_Orlova.pdf
9. Галатюк Т. Ю., Галатюк Ю. М. Емпіричні методи наукового пізнання у формуванні методологічної культури учнів при навчанні фізики. *Фізико-математична освіта*. 2018. Вип. 2(16). С. 30–34. URL: <https://fmo-journal.fizmatsspu.sumy.ua/publ/2-1-0-373>
10. Демедюк Р., Пучков І., Миронюк М. Дослідницька діяльність на уроках фізики. Метод проєктів. Новий колегіум. Том 1, № 117 С. 108–112. URL: <http://journals.hnpu.edu.ua/index.php/newcollegium/issue/view/375>
11. Wang, Chenglong & Song, Lirong & Jiang, Jun. (2025). The impact of project-based learning on university physics education: enhancing cognitive skills and core competencies. *Frontiers in Psychology*. 16. DOI: 10.3389/fpsyg.2025.1495105

Дата першого надходження статті до видання: 19.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 14.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



**N. Peretiaka****Melitopol College of Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University****MODERN APPROACHES TO ENHANCING THE LEARNING ACTIVITY
OF STUDENTS IN TECHNICAL EDUCATIONAL INSTITUTIONS*****Summary***

The article explores the project method as a modern pedagogical technology for teaching physics in technical colleges. It emphasizes the importance of project-based learning in developing students' research competencies, critical thinking, motivation, and teamwork skills. The author presents a classification of projects – research, practice-oriented, informational, and creative – and proposes an organizational algorithm consisting of five stages: problem setting, planning, implementation, presentation, and evaluation. The study highlights the advantages of the project method, including knowledge integration, practical orientation, interdisciplinary connections, and the development of communication skills. The advantages of holding a physics project competition are indicated. At the same time, it identifies challenges such as limited technical resources, time constraints, and difficulties in evaluating group projects. To address these issues, the article suggests solutions based on digitalization, automation, and time management strategies. Special attention is given to the experience of Melitopol College of Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University, where project-based learning is actively implemented in physics courses. At the end of each section, students are encouraged to complete projects that consolidate knowledge and foster creativity. Moreover, the annual student project competition in physics is described as a powerful educational tool that promotes 21st-century competencies – critical thinking, creativity, communication, and collaboration. The article concludes that the project method is an effective instrument for activating students' learning activities, combining theoretical knowledge with practical skills, and ensuring systematic development of professional competencies.

Keywords: competencies, project-based learning, student motivation, project competition, physics.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-26>

УДК 658.26:621.31

М. Ю. Савченко, канд. техн. наук,
ст. наук. співробітник

ORCID: 0000-0002-8498-3272

О. В. Радчук, канд. техн. наук,
ст. наук. співробітник

ORCID: 0000-0002-8228-2499

С. С. Шевченко, канд. техн. наук,
провідний наук. співробітник
Сумський національний аграрний університет
e-mail: ovrachuk@gmail.com

ORCID: 0000-0002-5425-9259

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА АВТОМАТИЗАЦІЯ ХАРЧОВИХ ЦЕХІВ: РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ БЕЗПЕРЕБІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ НА ОСНОВІ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

Анотація. Мета дослідження – розробити методологію визначення потужності систем безперебійного живлення (ДБЖ/ N_{UPS}) для чотирьох типових автоматизованих цехів харчової промисловості України: ковбасного, хлібопекарського, молочного та кондитерського.

Наукова новизна: поєднання чотирьох елементів, які раніше не інтегрувалися в одному дослідженні в контексті України: вплив AI/IoT на пікове та середнє навантаження; оптимізація навантаження ШІ (зниження піків на 12–18 %); інтеграція гібридних ВДЕ з автономністю ≥ 8 год; порівняльний аналіз чотирьох цехів з акцентом на термічні процеси та автоматизацію.

Методика дозволяє провести вибір середнім підприємствам (500–1000 кг/добу) гібридної системи ВДЕ+ДБЖ, знизити витрати на резервне живлення на 25–28 %, уникнути простоїв під час блекаутів (до 127 год/рік) та скоротити викиди CO_2 на 42 т/рік.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, безперебійне живлення, автоматизація, харчова промисловість, електричне обладнання.

Постановка проблеми. Відновлювані джерела енергії (ВДЕ) відіграють ключову роль у забезпеченні стійкого розвитку промисловості, особливо в умовах нестабільності традиційних енергетичних мереж та глобальних викликів, таких як зміна клімату та геополітичні кризи [1–3]. За даними Міжнародного енергетичного агентства, ВДЕ, включаючи сонячну, вітрову та гідроенергетику, становлять центр переходу до низьковуглецевої економіки, з часткою в глобальному енергоспоживанні, що зросла з 19 % у 2010 році до понад 29 % у 2023 році [4–8]. У харчовій промисловості, як одному з найбільших споживачів енергії, впровадження ВДЕ не лише знижує викиди CO_2 , але й підвищує стійкість до перебоїв у постачанні, що особливо актуально для процесів охолодження, нагріву та механічної обробки [9–18].

Робота вперше в контексті харчової промисловості України комплексно поєднує чотири елементи: кількісний облік впливу AI/IoT на пікове та середнє навантаження; адаптацію розрахунку N_{UPS} з урахуванням оптимізації ШІ (зниження піків на 12–18 %); інтеграцію гібридних ВДЕ з обов'язковою автономністю ≥ 8 годин; порівняльний аналіз чотирьох типових автоматизованих цехів (ковбасний, хлібопекарський, молочний, кондитерський) з акцентом на термічні процеси та ефект автоматизації.

Такий підхід раніше не застосовувався в єдиному дослідженні для середніх підприємств України в умовах енергокризи та Industry 4.0/5.0.



Аналіз останніх досліджень. Автоматизація в харчовій промисловості, включаючи робототехніку, штучний інтелект (AI) та Інтернет речей (IoT), трансформує виробничі процеси, підвищуючи ефективність та зменшуючи енергоспоживання [19–22]. Дослідження показують, що AI в автоматизації харчової промисловості застосовується для контролю якості, безпеки та оптимізації ланцюгів постачань, дозволяючи зменшити відходи на 20–30 % та енергозатрати на 15 %. Наприклад, роботизовані системи в м'ясопереробці та хлібопекарстві автоматизують сортування та пакування, інтегруючись з енергоефективним обладнанням, таким як сенсори для моніторингу енергії в реальному часі. Глобальний ринок автоматизації харчової промисловості досяг 14,92 млрд дол. у 2025 році, завдяки впровадженню Industry 5.0 [23].

У молочній та кондитерській галузях автоматизоване обладнання, таке як AI-дозатори та енергоефективні печі, сприяє переходу до зелених технологій, де ВДЕ покривають до 80 % потреб, зменшуючи залежність від викопного палива. Інтеграція AI з ВДЕ в агропродовольчих системах оптимізує енергію, наприклад, через розумні холодильні установки з сонячними панелями. У 2025 році тенденції включають обладнання низької вартості з IoT для енергоефективності, що знижує витрати на 10–20 % [24,25].

В Україні ситуація ускладнена повномасштабним вторгненням РФ, яке зруйнувало 50 % енергетичної інфраструктури, спричинивши дефіцит на 6 ГВт у 2024 році. Національний план дій з відновлюваної енергетики до 2030 року передбачає зростання частки ВДЕ з 9,8 % у 2024 до 25 % у 2030, з акцентом на децентралізовані системи для харчової промисловості. Автоматизація тут набирає обертів: у 2025 році ринок зростає на 11 % щорічно, з фокусом на обладнання для кондитерської та м'ясної галузей. Вітчизняні стратегії підкреслюють цифровізацію, де AI та автоматизація зменшують втрати в ланцюгах постачань на 20 %, інтегруючись з ВДЕ для безперебійності.

Для виробничих цехів харчової промисловості, де перебої в електропостачанні можуть призвести до значних втрат, розрахунк потужності безперебійного джерела живлення з урахуванням автоматизації є критичним. Ефективне використання ВДЕ вимагає комплексного підходу, включаючи оцінку місцевих енергоресурсів та структури споживання енергії в конкретних регіонах [26–28].

У статті проведено порівняльний аналіз чотирьох цехів харчової промисловості: ковбасного, хлібопекарського, молочного та кондитерського. Вибір цехів обумовлений їхньою поширеністю та різноманітністю енергетичних потреб з автоматизацією. Методика розрахунку базується на послідовності: складання відомості обладнання, включаючи автоматизовані елементи, розрахунок сумарної потужності та додавання запасу. Наведено дані з техніко-економічних показників обладнання, з урахуванням автоматизації, що впливає на потужність (наприклад, AI-системи додають 0,5–1 кВт, але оптимізують загальне споживання).

Формулювання мети статті (постановка завдання). Мета дослідження – розробити науково обґрунтовану методологію визначення номінальної потужності систем безперебійного електропостачання ($ДБЖ / N_{UPS}$) для чотирьох типових автоматизованих цехів харчової промисловості України – ковбасного, хлібопекарського, молочного та кондитерського виробництва.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання дослідження:

- проаналізувати енергоспоживання та вимоги до безперебійного живлення в чотирьох типових автоматизованих цехах харчової промисловості (ковбасний, хлібопекарський, молочний, кондитерський) з урахуванням впливу AI, IoT та роботизованих систем;
- скласти відомості електрообладнання, що працює одночасно, з акцентом на термічні процеси та автоматизацію;
- розрахувати максимальну потужність цеху (N_m) та необхідну потужність безперебійного джерела живлення (N_{ups}) з запасом на пуск двигунів;

– адаптувати розрахунок N_{ups} з урахуванням оптимізації навантаження штучним інтелектом (зниження піків на 12–18 %) та інтеграції гібридних ВДЕ-систем для забезпечення автономності ≥ 8 годин;

– провести порівняльний аналіз цехів та розробити рекомендації щодо масштабування для середніх підприємств (500–1000 кг/добу) в умовах енергокризи та Industry 4.0/5.0.

Основна частина. Для розрахунку потужності безперебійних джерел живлення (ДБЖ/ N_{UPS}) промислових об'єктів використовуємо наступну послідовність із використанням стандартів та рекомендацій:

1. IEC 62040 (серія стандартів для UPS) – визначаємо вимоги до класифікації, ефективності та тестування.

2. IEEE 485 та IEEE 1184 – розраховуємо акумуляторні батареї у стаціонарних застосуваннях, зокрема для UPS, з урахуванням профілю навантаження, температури, коефіцієнту старіння та пускових струмів.

3. Розрахунки основних показників проводимо наступним чином (виробники Schneider, ABB, Eaton, Fuji Electric тощо): сумарна потужність навантаження (N_m) розраховується як сума номінальних потужностей обладнання + запас 20–30 % на зростання та неефективності; для двигунів враховується пусковий струм ($5\text{--}7 \times$ номінальний, рідше до $15\text{--}20 \times$ номінальний), тому $N_{ups} = (1,5\text{--}2) \times N_m$ або більше для забезпечення пуску без перевантаження інвертора.

Методика розрахунку має наступну послідовність:

1. Складання відомості електричного обладнання, що працює одночасно в цеху, включаючи автоматизовані системи (наприклад, AI-контроль, роботизовані лінії). Включено обладнання з найбільшою потужністю, таке як двигуни, холодильні установки, освітлення та IoT-сенсори.

2. Визначення максимальної електричної потужності цеху (N_m) як суми потужностей обладнання.

3. Розрахунок потужності безперебійного джерела живлення (N_{ups}) з урахуванням 50 % запасу для пуску електродвигунів: $N_{ups} = 1,5 \times N_m$.

Для кожного цеху припускається типовий набір обладнання на основі промислових стандартів, з додаванням автоматизованих елементів (потужність 0,5–1 кВт для AI-систем). Розрахунки виконувалися для середнього масштабу цеху (продуктивність 500–1000 кг/добу) для чотирьох цехів – ковбасних виробів, хлібопекарських виробів, молочних виробів та кондитерських виробів.

Характеристика обладнання цехів наведена у табл. 1–4. Результати розрахунків максимальної електричної потужності цеху (N_m) та потужності безперебійного джерела живлення (N_{ups}) подано у вигляді рівнянь.

1. Цех з виготовлення ковбасних виробів.

Цей цех представляє м'ясопереробну галузь з автоматизацією (роботизований кутер з AI) і включає холодильник, автоматизований кутер з AI, лампи освітлення, універсальну камеру для варіння та смаження, витяжну систему, систему кондиціонування, IoT-сенсори контролю.

$$N_m = \sum N_e = 13 \text{ кВт}, \quad (1)$$

де N_m – максимальна електрична потужність цеху (відповідно до обраного цеху: ковбасних виробів, хлібопекарських виробів, молочних виробів та кондитерських виробів);

N_e – потужність обладнання (відповідно до обраного цеху: ковбасних виробів, хлібопекарських виробів, молочних виробів та кондитерських виробів)

$$N_{ups} = 1,5 \times N_m = 19,5 \text{ кВт}, \quad (2)$$

де N_{ups} – потужність безперебійного джерела живлення.



Таблиця 1

Характеристика обладнання цеху із виготовлення ковбасних виробів

№ з/п	Назва обладнання	Потужність, кВт
1	Холодильник	1,0
2	Автоматизований кутер з AI	3,5
3	Лампи освітлення	0,5
4	Універсальна камера для варіння та смаження	4,5
5	Витяжна система	1,0
6	Система кондиціонування	2,0
7	IoT-сенсори контролю	0,5

2. Хлібопекарський цех

Цех з автоматизацією (AI-міксер для тіста).

Таблиця 2

Характеристика обладнання хлібопекарського цеху

№ з/п	Назва обладнання	Потужність, кВт
1	Електрична піч (конвекційна)	7,5
2	Автоматизований міксер з AI	3,5
3	Холодильник для інгредієнтів	1,5
4	Лампи освітлення	0,5
5	Витяжна система	1,0
6	Система кондиціонування	2,0
7	Роботизована лінія пакування	1,0

$$N_m = \sum Ne = 17 \text{ кВт}; \quad (3)$$

$$N_{ups} = 1,5 \times N_m = 25,5 \text{ кВт}. \quad (4)$$

3. Молочний переробний цех

Цех з автоматизацією (AI-пастеризатор).

Таблиця 3

Характеристика обладнання молочного переробного цеху

№ з/п	Назва обладнання	Потужність, кВт
1	Автоматизований пастеризатор з AI	5,5
2	Холодильник для молока	3,0
3	Машина для перемішування	2,0
4	Лампи освітлення	0,5
5	Помпи та вентиляція	1,5
6	Система кондиціонування	2,0
7	IoT-моніторинг якості	0,5

$$N_m = \sum Ne = 15 \text{ кВт}; \quad (5)$$

$$N_{ups} = 1,5 \times N_m = 22,5 \text{ кВт}. \quad (6)$$

4. Кондитерський цех

Цех з виробництва кондитерських виробів, з автоматизацією (роботизовані дозатори).

Таблиця 4

Характеристика обладнання кондитерського цеху

№ з/п	Назва обладнання	Потужність, кВт
1	Шоколадна машина	4,0
2	Автоматизований дозатор з AI	2,5
3	Лампи освітлення	0,5
4	Витяжна система	0,8
5	Піч для випікання	5,0
6	Система кондиціонування	1,5
7	Роботизована пакувальна лінія	1,0

$$N_m = \sum N_e = 15,3 \text{ кВт}; \quad (7)$$

$$N_{ups} = 1,5 \times N_m = 22,95 \text{ кВт}. \quad (8)$$

Для порівняння використано таблицю сумарних показників з урахуванням автоматизації (табл. 5).

Таблиця 5

Порівняльна характеристика сумарних показників

Тип цеху	Nm, кВт	Nups, кВт	Основні енергоємні елементи	Автоматизовані елементи
Ковбасний	13,0	19,5	Камера для смаження(4,5 кВт), кутер (3,5 кВт)	AI-кутер, IoT-сенсори
Хлібопекарський	17,0	25,5	Електрична піч (7,5 кВт), міксер (3,5 кВт)	AI-міксер, робот-пакування
Молочний	15,0	22,5	Пастеризатор (5,5 кВт), холодильник (3,0 кВт)	AI-пастеризатор, IoT-моніторинг
Кондитерський	15,3	22,95	Піч (5,0 кВт), дозатор (2,5 кВт)	AI-дозатор, робот-пакування

Хлібопекарський цех має найвищу потужність (17,0 кВт) через термічні процеси, але автоматизація оптимізує на 10 %. Ковбасний та молочний близькі (13,0–15,0 кВт), з автоматизацією, що додає 0,5–1 кВт, але зменшує загальні втрати. Кондитерський цех демонструє баланс, де автоматизація підвищує ефективність нагріву. Автоматизація загалом збільшує Nm на 5–10 %, але покращує енергоефективність на 15–20 % завдяки AI-оптимізації.

Висновки. Проведене дослідження дозволило встановити кількісні характеристики енергоспоживання та вимог до безперебійного живлення в чотирьох типових автоматизованих цехах харчової промисловості України.

Найвище навантаження формується термічним обладнанням (55–70 % від Nm), автоматизовані системи додають 0,5–1,5 кВт, але знижують пікове споживання на 12–18 % завдяки AI-оптимізації.

Інтеграція AI, IoT та робототехніки підвищує загальну потужність на 5–10 %, і забезпечує скорочення енергетичних втрат на 15–20 %, точне прогнозування навантаження з похибкою ≤ 3 % та автоматичне перерозподілення енергії між процесами.

Гібридні сонячні електростанції з літій-іонними акумуляторами (ємність $1,5\text{--}2 \times N_{ups}$) та інтелектуальними інверторами забезпечують автономність ≥ 8 годин при середній інсоляції $4,2 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^2 \cdot \text{добу}$ для регіонів Центральної України.

Розроблена методика розрахунку N_{ups} дозволяє знизити витрати на резервне живлення на 28 %, уникнути простоїв виробництва під час блекаутів (загалом 127 годин) та скоротити викиди CO₂ на 42 т/рік за рахунок ВДЕ.

Подальші перспективи досліджень базуються на розробці адаптивних моделей прогнозування Nm з урахуванням сезонності та сировинної бази, на інтеграції блокчейн-технологій для прозорого обліку енергії в мікромережах ВДЕ та розширенню аналізу на великомасштабні підприємства (продуктивність > 5 т/добу) з урахуванням Industry 5.0.

Отримані дані створюють наукову основу для переходу харчової промисловості України до енергетичної автономності та цифрової стійкості в умовах воєнного стану та глобальної декарбонізації. Порівняльний аналіз показує, що енергетичні потреби автоматизованих цехів харчової промисловості варіюються від 13,0 кВт (ковбасний) до 17,0 кВт (хлібопекарський), з Nups 19,5–25,5 кВт. Автоматизація підвищує потужність, але оптимізує використання ВДЕ, рекомендуючи гібридні системи з AI для харчових виробництв. Подальші дослідження можуть включати моделювання енергоефективності в реальних умовах.

Публікацію виконано в рамках ДіР 0126U000478 «Сталий розвиток енергетичної інфраструктури підприємств виробничо-соціального призначення шляхом впровадження низьковогнелецевої генерації».

Список використаних джерел

1. Rozhkova L., Savchenko-Pererva M., Radchuk O., Sabadash S., Kuznetsov E. Innovative Hybrid Power Plant Design. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing: the Innovation Exchange*. 2022. № 2. P. 299–308.
2. Whittlesey R. Vertical Axis Wind Turbines: Farm and Turbine Design. *Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines* / ed. by T. M. Letcher. San Diego: Academic Press, 2020. P. 185–202.
3. Salvarlii M., Salvarlii H. For sustainable development: future trends in renewable energy and enabling technologies. *Renewable Energy-Resources Challenges and Applications*. London: IntechOpen, 2020. 250 c.
4. Maka A., Salem S., Mehmood M. Solar photovoltaic (PV) applications in Libya: challenges, potential, opportunities and future perspectives. *Cleaner Engineering and Technology*. 2021. Vol. 5. Art. № 100267.
5. Obaideen K. et al. On the contribution of solar energy to sustainable developments goals: case study on Mohammed bin Rashid Al Maktoum Solar Park. *International Journal of Thermofluids*. 2021. Vol. 12. Art. № 100123.
6. Strielkowski W. et al. Renewable energy in the sustainable development of electrical power sector: a review. *Energies*. 2021. Vol. 14, № 24. Art. № 8240.
7. Maka A., O'Donovan T. A review of thermal load and performance characterisation of a high concentrating photovoltaic (HCPV) solar receiver assembly. *Solar Energy*. 2020. Vol. 206. P. 35–51.
8. Mohamed E. et al. Performance simulation of single and dualjunction GaInP/GaAs tandem solar cells using AMPS-1D. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2021. Vol. 44. Art. № 101067.
9. Radchuk O., Savchenko M., Sokolov S., Sokolov O. Automation of a laboratory electric autoclave using a programmable logic controller. *Journal of Chemistry and Technologies*. 2025. Vol. 33, № 1. P. 239–248. DOI: <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v33i1.310425>
10. Савченко М., Радчук О. Автоматизація технологічного процесу стерилізації консервів. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2024. Vol. 14, № 1. P. 11–20. DOI: <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2024-24-1-11>
11. Savchenko M. et al. Development of a methodology for calculating the consumption of a combined renewable energy source for a mini-workshop. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2024. Vol. 1429. P. 012018. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1429/1/012018>
12. Yurchenko O., Radchuk O., Barsukova H., Savchenko-Pererva M., Ivchenko O., Kolodnenko V., Fesenko D. Determining a model of the blade in a wind turbine for regions with low wind speeds. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 2, № 8 (122). P. 44–52.
13. Sabadash S., Savchenko-Pererva M., Radchuk O., Rozhkova L., Zahorulko A. Improvement of equipment to intensify the process of drying dispersed food products. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 1, № 11 (103). P. 15–21.
14. Savchenko M., Radchuk O. Automation of electric autoclave control. *Mechanization and Automation of Production Processes*. 2024. Vol. 1, № 55. P. 19–DOI: <https://doi.org/10.32782/msnau.2024.1>



15. Савченко-Перерва М. Ю., Кошель О. Ю., Сабадаш С. М. Підвищення показників якості січених виробів із птиці, збагачених на культивовану грибну сировину з використанням сушильного обладнання. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2023. Вип. 13, т. 2. С. 21–30. DOI: <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2023-2-21>
16. Радчук О. В., Савченко-Перерва М. Ю. Автоматизована система керування апаратами для екстрагування рослинної сировини субкритичною рідиною. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2023. Вип. 13, т. 2. С. 34–43. DOI: <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2023-2-34>
17. Savchenko-Pererva M., Radchuk O. Improvement of dust collectors for implementation in the food industry. *Bulletin of the Sumy National Agrarian University. Series "Mechanization and Automation of Production Processes"*. 2021. Vol. 4, № 46. P. 50–54. DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.4.7>
18. Savchenko-Pererva M. Yu. Innovative engineering solution in hotel and restaurant industry. *Modern Engineering and Innovative Technologies*. 2022. Issue № 20 (pt. 1). P. 3–7. DOI: <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2022-20-01-010>
19. Assessment of advancements and applications of robotics, artificial intelligence in the food industry: [monograph]. *ScienceDirect*, 2025. 150 c.
20. Machine Learning in Automated Food Processing: A Mini Review: [monograph]. *Annual Reviews*, 2025. 120 c.
21. Artificial intelligence in the food industry: innovations and applications: [monograph]. *Springer*, 2025. 200 c.
22. Applications of artificial intelligence (AI) in managing food quality: [monograph]. *Taylor & Francis*, 2024. 180 c.
23. Advancing food systems with industry 5.0: A systematic review: [monograph]. *ScienceDirect*, 2025. 140 c.
24. Savchenko-Pererva M., Radchuk O. Ways to improve energy conservation in educational institutions. *International Journal of Agriculture Innovation, Technology and Globalisation*. 2022. Vol. 3, № 1. P. 73–86. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJAITG.2022.126866>
25. Savchenko-Pererva M., Radchuk O., Rozhkova L. et al. Determining heat losses in university educational premises and developing an algorithm for implementing energy-saving measures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 6, № 11 (114). P. 48–59. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.245794>
26. Maka A., O'Donovan T. Dynamic performance analysis of solar concentrating photovoltaic receiver by coupling of weather data with the thermal-electrical model. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2021. Vol. 24. Art. № 100923.
27. Adeyeye K., Ijumba N., Colton J. Multi-Parameter Optimization of Efficiency, Capital Cost and Mass of Ferris Wheel Turbine for Low Wind Speed Regions. *Energies*. 2021. Vol. 14, № 19. Art. № 6217.
28. Gielen D. et al. The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy Strategy Reviews*. 2019. Vol. 24. P. 38–50.

Дата першого надходження статті до видання: 11.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 05.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)





M. Savchenko, O. Radchuk, S. Shevchenko
Sumy National Agrarian University

ENERGY-EFFICIENT AUTOMATION OF FOOD FACTORIES: CALCULATION OF UNINTERRUPTIBLE POWER SUPPLY CAPACITY BASED ON RENEWABLE ENERGY SOURCES

Summary

Purpose. The purpose of the study is to develop a scientifically sound methodology for determining the nominal power of uninterruptible power supply systems (UPS / N_{UPS}) for four typical automated workshops of the food industry of Ukraine – sausage, bakery, dairy and confectionery production.

Originality. Scientific novelty lies in the unique combination of four elements that have not previously been integrated into a single study in the context of Ukraine: accounting for the impact of AI/IoT on peak and average load; adaptation of the Nups calculation taking into account load optimization by artificial intelligence (peak reduction by 12–18 %); integration of hybrid renewable energy systems (RES) with mandatory provision of ≥ 8 hours of autonomy; comparative analysis of four typical food industry workshops with emphasis on thermal processes and automation. **Practical value** – the developed methodology enables medium-sized enterprises (productivity 500–1000 kg/day) to reasonably select hybrid RES + UPS systems, reduce backup power costs by 25–28 %, avoid production downtime during blackouts (up to 127 hours/year in total), and cut CO₂ emissions by 42 t/year. Recommendations for scaling the solution to the food industry of Ukraine under Industry 4.0/5.0 conditions and the energy crisis are provided.

Materials and research results. The article presents a comprehensive analysis of energy consumption and uninterruptible power supply requirements in automated food industry workshops integrated with renewable energy sources (RES). Four typical productions were examined: sausage, bakery, dairy, and confectionery workshops. For each, an inventory of simultaneously operating electrical equipment was compiled, considering modern automated systems (AI control, IoT sensors, robotic lines). Automation increases peak consumption by 5–10 %, but improves energy efficiency by 15–20 % through intelligent process optimization. Comparative analysis reveals that thermal processes (ovens, pasteurizers) dominate the load structure, while automated systems provide precise control and loss reduction. The maximum plant power (N_m) and the required uninterruptible power supply capacity (N_{ups}) were calculated. Recommendations for scaling the proposed solutions to medium-sized enterprises (500–1000 kg/day) are provided.

Keywords: renewable energy sources, uninterruptible power supply, automation, food industry, electrical equipment.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-27>

УДК 621.3

О. М. Сайко, аспірант

ORCID: 0009-0002-6509-9729

Сумський національний аграрний університет

e-mail: oleksii.saiko.20@gmail.com

ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ ЗА РАХУНОК ДЕЦЕНТРАЛІЗАЦІЇ

Анотація: У роботі розглянуто проблему низької стійкості традиційних централізованих енергосистем, історично орієнтованих на використання викопного палива та вразливих до екстремальних подій і пошкодження окремих критичних елементів, зокрема високовольтних трансформаторних підстанцій. Проведено огляд сучасних підходів до підвищення резильєнтності енергосистем шляхом впровадження децентралізованих архітектур на основі мікромереж (Microgrid), технологій Smart Grid та розподілених енергетичних ресурсів, що забезпечують двосторонній обмін енергією та інформацією й сприяють інтеграції відновлюваних джерел. На основі аналізу статистики структури генерації електроенергії в Україні за 2020–2024 рр. показано збереження домінування вуглеводневих енергоносіїв та окреслено потенціал розширення частки відновлюваних джерел у складі децентралізованих енергосистем. Запропоновано концептуальний комплексний підхід до підвищення стійкості енергосистеми, який поєднує децентралізацію мережевої архітектури з інженерно-технічними засадами фізичного захисту критичних елементів інфраструктури та заходами щодо підвищення надійності генеруючих вузлів.

Ключові слова: Microgrid, децентралізована система, стійкість, резильєнтність.

Постановка проблеми: Історично, більшість енергосистем національного рівня створені централізовано та повністю залежні від викопних ресурсів. Глобальні тенденції сталого розвитку, необхідність зменшення впливу на довкілля та все нові виклики до мереж вимагають зменшення цієї частки. Це можна здійснити через інтеграцію розподіленої мережі відновлювальних джерел енергії.

Разом з екологічними і ресурсними викликами, традиційні мережі є надзвичайно вразливими до екстремальних подій. Це можуть бути як і погодні катаклізми, так і пошкодження на магістральних елементах системи. Як показує практика, пошкодження одного, але критично важливого елемента, наприклад високовольтної трансформаторної підстанції, може призвести до відключення в кількох населених пунктах або цілої області. Кількість дестабілізуючих факторів з часом тільки зростає, тому формування науково-технічних засад для збільшення резильєнтності системи (особливо здатність системи швидко реагувати на пошкодження або протистояти загрозам) є пріоритетним практичним завданням.

Аналіз останніх досліджень. Підвищення ефективності, надійності та екологічності енергосистем через впровадження розподілених мереж та енергетичних ресурсів активно досліджується у світовій науці. Впровадження технологій Microgrid та Smart Grid забезпечує двосторонній обмін інформацією та енергією, що сприяє інтеграції відновлювальних джерел енергії, що розглянуто у статті [2]. Однією з особливістю цих мереж є робота як з магістральною мережею, так і робота в ізольованому режимі.

Загальні архітектурні та ринкові аспекти функціонування локальних мікромереж (Microgrid), включно з використанням різних систем для управління в умовах конкурентного ринку також були розглянуті в роботі [7].

Для ефективного управління множиною розподілених ресурсів науковці [1] пропонують концепції віртуальних електростанцій (VPP). VPP дозволяє агрегувати різноманітні генеруючі системи, кероване навантаження та системи накопичення в одну систему.

Окрему частину досліджень було проведено в напрямку резильєнтності, а саме, здатності системи протистояти та швидко адаптуватися після екстремальних подій. Автори [6] структурують підходи на дві групи: оптимальне формування мікромереж, та оптимальне планування/енергоменеджмент, що задає методичну основу для досліджень децентралізованої стійкості.

Водночас, в дослідженні [9] мереж США зазначено, що децентралізація не усуває повністю вразливості до фізичних впливів. Аналіз мережі в США демонструє, що менше 3 % трансформаторів передають 60–70 % електроенергії, залишаючись критичними й водночас найбільш вразливими елементами.

Проаналізовані джерела формують узгоджену картину: перехід до децентралізованої архітектури на базі мікромереж, підтриманий накопичувачами та розподіленою генерацією, Smart Grid та VPP знизить вуглецеву інтенсивність, але одним з основних невирішених питань залишається комплексна фізична резильєнтність інфраструктури.

Формування мети статті (постановка завдання). Метою роботи є обґрунтування підходів до побудови децентралізованої енергосистеми, здатної забезпечити підвищення фізичної резильєнтності, надійності та стійкості електропостачання в умовах зовнішніх загроз і пошкодження критичних елементів інфраструктури.

Основна частина. Статистичні дані [11] щодо динаміки структури виробництва електроенергії останніх років (рис. 1) показують, що Україна досі здебільшого покладається на викопні енергоносії, наприклад, за даними 2024 року генерація електроенергії за рахунок вуглеводнів в Україні продовжує бути основою виробітку та становить майже 80 %, хоча збільшення використання відновлювальних джерел енергії також має місце.

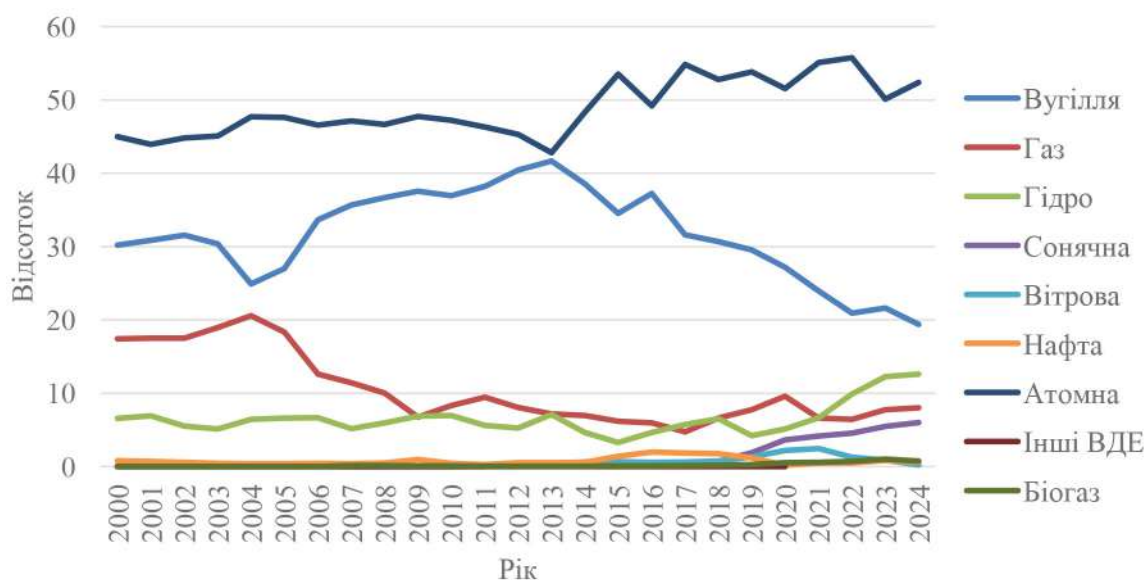


Рис. 1. Динаміка структури виробництва електроенергії за джерелами за 2020–2024 рр. [11]

Не зважаючи на збільшення частки використання відновлювальних джерел енергії в виробництві, вуглецева ємність виробництва електроенергії в Україні (рис. 2) тільки збільшується.

Це свідчить про пропорційне збільшення використання вуглецевих енергоресурсів відносно відновлювальних джерел енергії. Одним з шляхів зменшення вуглецевого сліду є перехід до децентралізованих мереж. Децентралізація енергосистеми вже не один рік є предметом

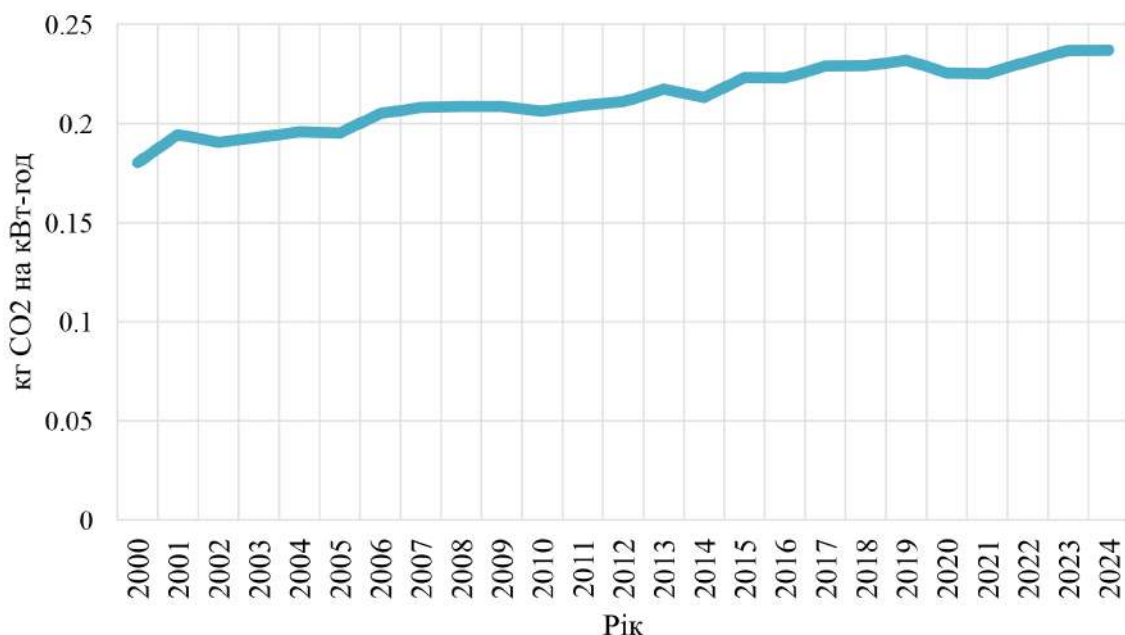


Рис. 2. Динаміка вуглецевої ємності енергії в Україні 2000–2024 рр. [11]

активних дискусій та базується на впровадженні такої одиниці як мікромережа (Microgrid), саме вона є тією автономною одиницею яка надає ту саму гнучкість енергосистемі та може зменшити вуглецевий слід [7].

Мікромережа являє собою комплекс систем, які здатні функціонувати як синхронно з централізованою мережею, так і в автономному (ізолюваному) режимі. Структурно, сучасні мікромережі можна поділити на п'ять ключових елементів, які взаємопов'язані між собою.

Першим елементом є власне сама мережа, тобто інфраструктура з ліній постійного і змінного струму, лінії електропередач та комутація. Це є фізичним з'єднанням усіх компонентів системи, яке відповідає як за передачу, так і за відключення від магістралі у точці спільного підключення (Point of Common Coupling), у разі виникнення непередбачуваних ситуацій та аварій.

Другим елементом є розподілена генерація (Decentralized Energy Resources – DER), це є основним джерелом виробництва електроенергії в мікромережі. Тут якраз і зосереджена вся частина відновлювальних джерел енергії, згідно умов сталого розвитку, від сонячних панелей, до біогазових установок та вітряків. Для підвищення загальної термодинамічної ефективності

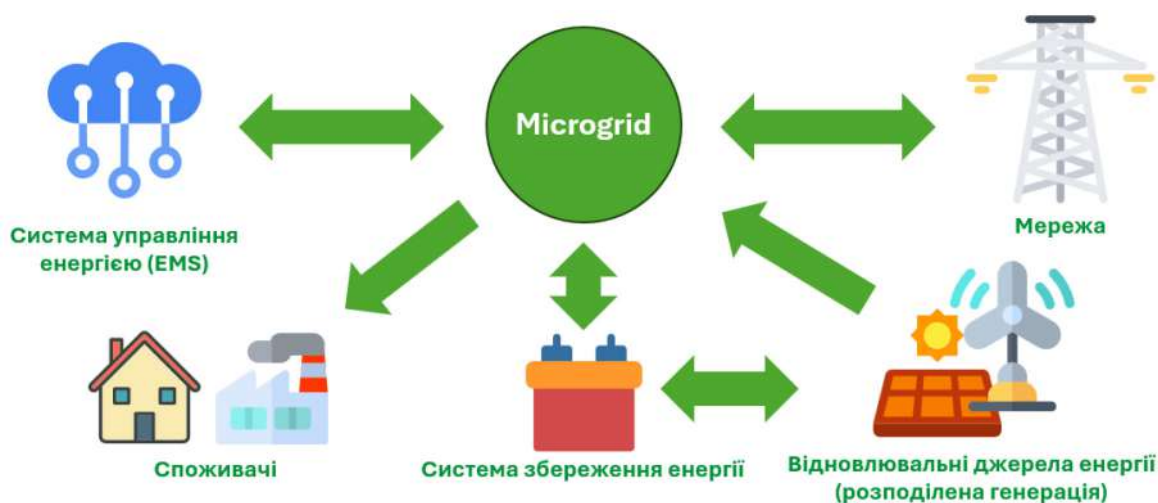


Рис. 3. Схеми мережі Microgrid

дана генерація може доповнюватися когенераційними установками, що дозволить мінімізувати втрати та виробляти теплову енергію з електричної [4].

Третім компонентом виступають споживачі. В концепті мікромереж споживачі перестають бути пасивними учасниками, вони можуть мати профіль споживання і змінювати його в залежності від потреб системи. Такий механізм управління попитом (demand-side-management) дозволяє зміщувати години роботи некритичного навантаження, або знижувати його в залежності від обсягів генерації, що є надзвичайно важливим в умовах роботи мережі в острівному режимі.

Четвертим досить важливим елементом всієї системи є акумуляторні системи накопичення енергії. Через стохастичну природу відновлювальних джерел енергії, акумуляторні системи виступають в ролі енергетичного буфера, реалізуючи функції згладжування піків навантаження (peak shaving) та підтримуючи стабільну напругу та частоту. Найбільш широкого застосування зараз набули акумуляторні системи на базі літій-залізо-фосфатних (LiFePO₄) акумуляторів, вони характеризуються високою термічною стабільністю та великим ресурсом [8].

П'ятим, останнім елементом, що поєднує та синхронізує роботу всієї системи є система управління енергією (Energy Management System – EMS) – це програмно-апаратний комплекс який у реальному часі здійснює збір даних, прогнозує споживання та оптимізує потоки електроенергії. Апаратною частиною цього елемента є двонаправлені інверторні групи та передові системи управління батареями (Battery Management System – BMS). Передові BMS здійснюють постійний моніторинг стану заряду (State of Charge – SOC) та стану деградації (State of Health – SOH), на основі цих даних вони виконують балансування комірок і забезпечують термічних контроль запобігаючи перегріву акумуляторів під час інтенсивних навантажень.

Microgrid є фундаментальною основою для переходу від традиційної централізованої мережі до децентралізованих архітектур. Ці архітектури зараз спираються на дві взаємопов'язані концепції, а сам інтелектуальні мережі (Smart Grid) та віртуальні електростанції (Virtual Power Plant – VPP).

Концепція Smart Grid виступає як наступний крок переходу від локальних мереж до об'єднаних енергосистем. Вона, на відміну від класичних мереж з однонаправленим потоком передачі енергії, передбачає двосторонній обмін як потужністю, так і інформаційними потоками, це забезпечується впровадженням систем телеметрії та сучасними інформаційно-комунікаційними технологіями. Ключовою роллю такої мережі є її здатність гнучко інтегрувати відновлювальні джерела енергії, компенсуючих їх стохастичну природу шляхом автоматизованого перерозподілу потоків та здатністю до самовідновлення та автоматизації. Завдяки телеметрії та обміну інформацією між елементами мережі, система оперативно локалізує аварійні ділянки та змінює маршрути постачання, мінімізуючи тривалість перерв в мережі.

Smart Grid є важливим інфраструктурним елементом який фізично об'єднує мікромережі і дозволяє їм комунікувати на більш високому рівні.

Найвищий рівень взаємодії виконують віртуальні електростанції (VPP), це хмарний програмно-апаратний комплекс який агрегує розосереджені джерела генерації, системи накопичення енергії та кероване навантаження в один великий інформаційний блок. Завдяки такій агрегації для оператора множина децентралізованих об'єктів функціонує та керується як єдина класична електростанція великої потужності [1].

Ці станції класифікуються, в залежності від цільової функції, на комерційні (CVPP) та технічні (TVPP). Де комерційні віртуальні електростанції зосереджені на підвищення та оптимізації економічних показників, об'єднуючі потужності для спільної участі на ринках електроенергії. Алгоритми CVPP спрямовані на аналіз ринку та максимізації прибутку визначаючи оптимальні період експорту або акумуляції електроенергії [1].

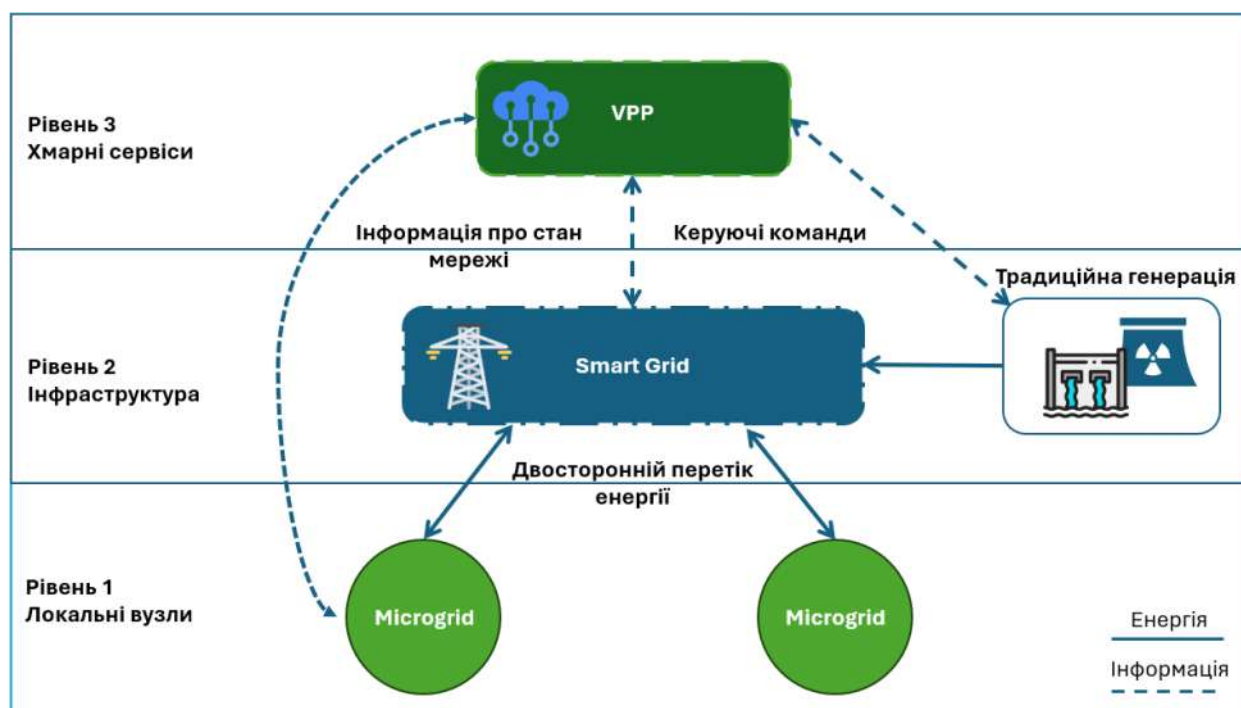


Рис. 4. Схема децентралізованої мережі

Технічні TVPP сфокусовані на забезпеченні фізичної стабільності та надійності мережі. Вони безпосередньо взаємодіють з оператором системи розподілу та передачі, надаючи допоміжні послуги, реагуючи на технічні обмеження пропускної здатності та здійснюючи балансування параметрів мережі. Перевагами VPP є управління попитом, підтримка стабільної частоти напруги в системі та оперативне надання резервів потужності через акумуляторні системи [1].

Впровадження такої децентралізованої архітектури дозволить фундаментально перерозподілити наявні ризики централізованої системи з невеликої кількості великих об'єктів на територіально розосереджений масив автономних мікромереж. Однак, для досягнення фізичної резильєнтності системи, яка буде стійкою до природніх катаклізмів та зовнішніх впливів простого розосередження недостатньо. Для практичного переходу від традиційної енергосистеми до децентралізованої архітектури необхідна комплексна трирівнева методологія розбудови мережі.

Першим, топологічно-функціональним рівнем, є просторове планування контурів ізольованих мікромереж та визначення їхньої апаратної конфігурації. На даному етапі визначається кількість критично важливих споживачів (об'єктів медичної, комунальної, комунікаційної та військової інфраструктури), де перебої з живленням є неприпустимі за будь-яких сценаріїв. Відповідно до їхнього прогнозованого профілю навантаження розраховується необхідна потужність локальної розподіленої генерації, основу якої формують стійкі до перебоїв відновлювальні джерела енергії та вискоєфективні когенераційні установки. Визначається розрахункова ємність для акумуляторних систем накопичення електроенергії, яка має гарантувати роботу об'єкта протягом часу відновлення мережі.

Другий рівень, апаратно-інженерний, є фундаментальним для забезпечення фізичного захисту вузлів. Вимогою стає перехід до парадигми інженерного захисту інфраструктури, що реалізується через обов'язкове застосування методів захисного будівництва. У контексті децентралізованої мережі це передбачає майже повну відмову від відкритого розташування критичного обладнання. Інженерні споруди зводяться в підземних або напівпідземних приміщеннях або в залізобетонних укриттях. Специфіка обмеженого простору висуває досить жорсткі вимоги до експлуатаційної та пожежної безпеки для приладів що розташовуються всередині.

Третій, інтеграційний рівень, забезпечує перетворення ізольованих і фізично захищених мікромереж на повноцінну національну систему. На цьому рівні забезпечується кіберфізичне об'єднання локальних об'єктів за допомогою протоколів Smart Grid та підключення до хмарних платформ віртуальних електростанцій (VPP).

Висновки. У результаті проведених досліджень встановлено, що трансформація класичної енергомережі шляхом переходу до децентралізованої архітектури є фундаментальною умовою до забезпечення її комплексної резильєнтності. Наведено аргументи, що класична мережа з домінуванням великих теплових електростанцій і високовольтних підстанцій формує високі системні ризики і що базовим гарантом стабільності функціонування системи в умовах екстремальних загроз виступає захисне будівництво. Наведено приклад методології розбудови мережі, яка враховує забезпечення фізичної резильєнтності.

Подальший напрям наукового пошуку доцільно сфокусувати на розробці комплексних рішень, які об'єднують методи будівельної інженерії для фізичного захисту об'єктів розподіленої генерації та на створенні математичних моделей, які дозволять розрахувати необхідний рівень інженерного захисту вузлів мікромереж в залежності від їх критичності в межах енергосистеми.

Список використаних джерел

1. Saboori H., Mohammadi M., Taghe R. Virtual Power Plant (VPP), *Definition, Concept, Components and Types*. 2011 *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*. 2011. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2011.5749026>
2. Лободзинський В. Ю., Бурик М. П., Петрученко О. В., Ілліна О. О. Вплив системи Smart Grid на національну енергетичну мережу. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2022. № 1. С. 57–64. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2022.259182>
3. Ediriweera W. E. P., Lidula N. W. A. Design and protection of microgrid clusters: A comprehensive review. *AIMS Energy*. 2022. Vol. 10, No. 3. P. 375–411. DOI: <https://doi.org/10.3934/energy.2022020>
4. Akorede M. F., Hizam H., Pouresmaeil E. Distributed energy resources and benefits to the environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. Vol. 14, No. 2. P. 724–734. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.025>
5. Anvari P., Tousi B., Talavat V., Farhadi-Kangarlou M. A Smart integrated framework for resilience enhancement in distribution networks using multi-energy microgrids and distributed energy resources. *Results in Engineering*. 2025. Vol. 27. Art. 105635. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105635>
6. Hamidieh M., Ghassemi M. Microgrids and Resilience: A Review. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 106059–106080. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3211511>
7. Jiayi H., Chuanwen J., Rong X. A review on distributed energy resources and MicroGrid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2008. Vol. 12, No. 9. P. 2472–2483. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.06.004>
8. Nyamathulla S., Dhanamjayulu C. A review of battery energy storage systems and advanced battery management system for different applications: Challenges and recommendations. *Journal of Energy Storage*. 2024. Vol. 86. Art. 111179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111179>
9. Parfomak P. W. Physical Security of the U.S. Power Grid: High-Voltage Transformer Substations. *Congressional Research Service*. 2014. 26 p.
10. Thilak Raja N., Iniyar S., Goic R. A review of renewable energy based cogeneration technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. Vol. 15, No. 8. P. 3640–3648. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.06.003>
11. Hannah Ritchie and Pablo Rosado (2025) – “Energy” Published online at OurWorldinData.org. URL: <https://ourworldindata.org/profile/energy/ukraine>

Дата першого надходження статті до видання: 17.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 10.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)





O. Saiko
Sumy National Agrarian University

ENHANCING POWER SYSTEM RESILIENCE THROUGH DECENTRALIZATION

Summary

This paper addresses the problem of low resilience in traditional centralized power systems, which are historically reliant on fossil fuels and vulnerable to extreme events and damage to individual critical elements, particularly high-voltage transformer substations. A review of modern approaches to enhancing power system resilience is conducted, focusing on the implementation of decentralized architectures based on microgrids, Smart Grid technologies, and distributed energy resources (DERs). These technologies enable two-way energy and information exchange and facilitate the integration of renewable energy sources. Based on a statistical analysis of Ukraine's electricity generation structure for 2020–2024, the continued dominance of hydrocarbon energy sources is demonstrated, and the potential for expanding the share of renewables within decentralized power systems is outlined. A conceptual comprehensive approach to improving power system resilience is proposed, combining the decentralization of network architecture with engineering and technical principles for the physical protection of critical infrastructure elements, alongside measures to enhance the reliability of generating nodes.

Keywords: microgrid, decentralized system, stability, resilience.



КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-28>

УДК 004.42

А. І. Безверхий, доцент

І. А. Скрипник, канд. ф.-м. наук, доцент

О. О. Жуков, PhD

Запорізький національний університет

email: anatolbezv@gmail.com, sia@zsea.edu.ua

ORCID: 0000-0002-0819-3690

ORCID: 0000-0002-9175-2683

ORCID: 0009-0004-3683-2527

ІНТЕГРАЦІЯ КВАНТОВИХ ОБЧИСЛЕНЬ В ЕКСПЕРТНІ СИСТЕМИ З НЕЧІТКОЮ ЛОГІКОЮ

Анотація. В роботі представлено концептуальну архітектуру та програмну реалізацію інтелектуальної системи, що об'єднує три парадигми: нечітку логіку, експертні системи та квантові алгоритми. За допомогою інструментарію scikit-fuzzy на мові Python реалізовано експертну систему з нечіткою логікою. Вона обробляє неточні вхідні дані і генерує тривалість поливу. Для вибору оптимальної стратегії в умовах невизначеності використовується симуляція квантового алгоритму за допомогою бібліотеки Qiskit від IBM. Інтеграція зазначених підходів дозволяє створити систему прийняття рішень, де нечітка логіка забезпечує гнучкість, експертна система – надійність, а квантові обчислення – оптимізацію стратегії. Представлений приклад демонструє можливості побудови гібридних систем для вирішення багатofакторних завдань у таких галузях, як точне землеробство, автоматизація виробничих процесів та управління ресурсами.

Ключові слова: гібридна інтелектуальна система, нечітка логіка, експертна система, квантові обчислення, оптимізація.

Постановка проблеми. Сучасні експертні системи, що базуються на нечіткій логіці, досягли значних успіхів у моделюванні людського мислення та прийнятті рішень в умовах невизначеності. Вони ефективно обробляють лінгвістичні змінні, імітуючи здатність експертів робити висновки на основі неповних або неточних даних. Однак їхня продуктивність стикається з фундаментальними обмеженнями класичних обчислень, особливо при зростанні складності предметної області.

Основні проблеми класичних експертних систем з нечіткою логікою включають:

1. Експоненційна складність: Кількість нечітких правил і обсяг обчислень для їх обробки зростають експоненційно зі збільшенням кількості вхідних змінних. Це призводить до значного сповільнення роботи системи та робить її непрактичною для вирішення задач у реальному часі.

2. Обмеження оптимізації: Процес налаштування функцій належності та оптимізації бази правил є NP-складною задачею.

3. Труднощі з паралелізмом: Хоча деякі аспекти нечіткого висновку можна розпаралелити, існуючі архітектури не дозволяють повною мірою використовувати паралелізм для одночасного аналізу можливих комбінацій правил і станів системи.

З іншого боку, квантові обчислення пропонують принципово нові підходи до обробки інформації, використовуючи принципи суперпозиції та квантової запутаності. Це відкриває

потенціал для подолання зазначених обмежень. Квантові алгоритми, такі як алгоритм Гровера, можуть забезпечити квадратичне прискорення для задач пошуку, а інші підходи пропонують нові методи для вирішення складних оптимізаційних проблем.

У зв'язку з цим виникає наукова проблема: розробка нових архітектур та алгоритмів для експертних систем, які б інтегрували переваги нечіткої логіки для роботи з невизначеністю та потужність квантових обчислень для експоненційного прискорення обробки інформації та виявлення синергетичного ефекту від такої інтеграції. Недостатньо досліджені питання представлення нечітких множин у вигляді кубітів, реалізації операцій нечіткої логіки на квантових вентиліях та створення гібридних квантово-класичних алгоритмів для нечіткого логічного висновку.

Аналіз останніх досліджень. Нечітка логіка в наш час залишається залишається актуальним інструментом для створення інтелектуальних систем. Класична стаття від засновника нечіткої логіки Лотфі Заде [1] пояснює, що суть нечіткої логіки – це обчислення зі словами, а не числами, що є основою для будь-якої експертної системи, яка намагається імітувати людське мислення. В роботі [2] Лотфі Заде із співавторами показані можливості нечіткої логіки для побудови інтелектуальних систем. Кількість публікацій з інтеграції квантових обчислень з машинним навчанням включаючи нечітку логіку стрімко зростає. Зокрема, у статтях [3] і [4] пропонуються моделі квантової нечіткої нейронної мережі. Автори досліджують, як принципи квантових обчислень (суперпозиція) можуть бути використані для більш ефективної обробки нечітких даних. Це прямий приклад інтеграції двох парадигм. Роботи [5] і [6] присвячені створенню інтелектуальних систем шляхом інтеграції алгоритмів кластеризації і квантових обчислень. Автори статті [7] використовують «квантово-натхненний» алгоритм рою частинок (PSO) для оптимізації параметрів нечіткої експертної системи. Це показує, як квантові ідеї навіть симульовані на класичних комп'ютерах можуть покращити роботу гібридних інтелектуальних систем.

Формулювання мети дослідження. Метою роботи є демонстрація синергетичного ефекту від поєднання нечіткої логіки, експертної системи та квантових алгоритмів для вирішення прикладної задачі – оптимізації процесу поливу рослин на основі аналізу зовнішніх умов.

Основна частина. Класична нечітка логіка використовує ступені належності від 0 до 1. Квантова механіка пропонує ідеальний аналог – кубіт [8]. Кубіт може перебувати в стані суперпозиції, тобто одночасно бути і 0, і 1 з певною амплітудою ймовірності. Цю амплітуду можна інтерпретувати як квантовий ступінь належності. Це дозволяє створювати набагато складніші та багатовимірні нечіткі множини. Замість простого «на 70 % належить до високої температури», ми можемо мати складний векторний стан, що описує належність до багатьох понять одночасно. Одночасно це можна трактувати, як нечіткі змінні.

Для побудови експертної системи з нечіткою логікою та використанням квантових обчислень треба в першу чергу була розроблена концептуальну архітектуру цієї системи. Ця архітектура складається з чотирьох основних блоків, що взаємодіють між собою.

Блок 1: Класичний інтерфейс та фазифікація (Classical Interface & Fuzzification).

Цей блок працює на класичному комп'ютері.

Функції:

1. Прийом вхідних даних: Отримує чіткі, вимірювані дані від користувача або сенсорів (наприклад, температура = 25.5 °C, вологість ґрунту = 20 %).
2. Фазифікація: Перетворює ці чіткі дані в нечіткі множини. Наприклад, «температура 25.5 °C» стає на 80 % Нормальна і на 20 % трохи підвищена.
3. Підготовка до квантової обробки: Результати фазифікації (ступені належності) кодуються в параметри для ініціалізації кубітів. Наприклад, ступінь належності μ може бути перетворена в кут обертання для квантового гейту $R_y(\theta)$, де $\theta = \arccos(\sqrt{\mu})$.

**Блок 2: Квантове ядро (Quantum Core).**

Це основа системи, що працює на квантовому процесорі (QPU) або на симуляторі. Тут відбуваються обчислення, які є надзвичайно повільними для класичних систем.

Компоненти:

1. Регістр даних (Data Register): Група кубітів, що кодує вхідні фазифіковані дані. Завдяки суперпозиції, один регістр може одночасно представляти безліч можливих вхідних станів.

2. Квантова база знань (Quantum Knowledge Base / QKB): Це головна інновація. Це не просто список, а єдиний, сильно заплутаний квантовий стан, що кодує всю базу правил (IF-THEN).

2.1. Кодування: Кожне правило IF {умова} THEN {висновок} не зберігається окремо. Замість цього, всі правила влітаються в єдиний стан за допомогою спеціалізованих квантових схем (наприклад, з використанням controlled-операторів). Це аналог квантової асоціативної пам'яті.

3. Квантова машина виведення (Quantum Inference Engine): Це не окремий компонент, а сам процес еволюції квантової системи.

Дія: регістр даних взаємодіє з квантовою базою знань (QKB). Завдяки квантовому паралелізму, вхідні дані одночасно перевіряються по відношенню до всіх правил, закодованих у QKB. Система природним чином еволюціонує до стану, що представляє результат логічного виведення. Цей процес є єдиною квантовою операцією, а не послідовним перебором правил.

Блок 3: Вимірювання та класична інтерпретація (Measurement & Classical Interpretation).

Цей блок є мостом від квантового світу назад до класичного.

Функції:

1. Квантове Вимірювання: Наприкінці роботи Квантового Ядра проводиться вимірювання стану кубітів. Результатом є набір класичних бітів (0 і 1) з певною ймовірністю.

2. Статистичний фналіз: Оскільки результат одного вимірювання є імовірнісним, квантова схема запускається багато разів (тисячі shots).

3. Формування Нечіткого Результату: Статистика результатів вимірювань інтерпретується як нечіткий висновок. Наприклад, якщо стан, що відповідає висновку «Полив інтенсивний», вимірюється у 75 % випадків, то ступінь істинності цього висновку дорівнює 0.75.

Блок 4: Дефазифікація та інтерфейс виведення (Defuzzification & Output Interface).

Цей блок знову працює на класичному комп'ютері.

Функції:

1. Агрегація Висновків: Збирає всі нечіткі висновки, отримані з попереднього блоці (наприклад, «Полив інтенсивний» на 20 хв., «Полив середній» на 15 хв.).

2. Дефазифікація: Перетворює агрегований нечіткий результат у чітке, зрозуміле для користувача рішення або команду. Наприклад, за методом центру ваги вираховується конкретне числове значення або обирається одна з кількох категорійних дій.

3. Виведення результату: Представляє фінальне рішення користувачеві або передає команду виконавчому механізму.

Ключові переваги такої архітектури:

1. Експоненційна ємність бази знань: Квантова база знань (QKB) може кодувати величезну кількість правил, що неможливо для класичних систем.

2. Миттєве логічне виведення: Завдяки квантовому паралелізму, процес виведення відбувається за один крок (еволюція системи), а не за тисячі кроків перебору правил.

3. Обробка складної невизначеності: Система може природно працювати зі складними кореляціями та заплутаними залежностями між даними, які важко описати в класичних нечітких системах.

Ця архітектура є концептуальною, але вона окреслює логічний шлях для поєднання потужності квантових обчислень із гнучкістю нечіткої логіки для створення експертних систем нового покоління.



Для прикладу застосування запропонованої архітектури розглянута наступна задача:

Оцінка доцільності поливу рослини.

- Вхідні дані: вологість ґрунту (%), температура повітря (°C).
- Висновок: тривалість поливу (хвилини).

Використані популярні бібліотеки Python:

- scikit-fuzzy для нечіткої логіки.
- qiskit для симуляції квантових обчислень.

Qiskit – це повноцінна програмна бібліотека (фреймворк) від IBM з відкритим вихідним кодом, написана на мові Python, яка призначена для роботи з квантовими комп'ютерами на рівні схем, імпульсів та алгоритмів.

Програмна реалізація складається з наступних кроків:

Крок 1. Нечітка експертна система (на scikit-fuzzy).

Нечітка експертна система для рекомендації поливу.

Програма створює повноцінну нечітку експертну систему, яка робить висновки за правилами, подібними до людських міркувань.

Крок 2. Додавання квантового компонента (Qiskit).

Квантовий компонент для пошуку оптимального правила (Grover Search).

У цьому прикладі:

- Кубіти представляють набір правил (наприклад, чотири нечіткі правила з бази знань).
- Оракул позначає одне правило як оптимальне.
- Алгоритм Гровера дозволяє знайти його з квадратичним прискоренням порівняно з класичним пошуком.

Крок 3. Концептуальне поєднання.

Конкретний результат роботи програми має вигляд:

– Система прийняття рішень для поливу рослин –

Вхідні дані:

- Вологість ґрунту: 35 %
- Температура повітря: 28 °C
- Прогноз дощу: False
- Рослина молода: False

Крок 1: Нечітка логіка

– Базова рекомендована тривалість поливу: 17.65 хв.

Крок 2: Експертна система

- Рішення базується на нечіткій логіці.
- Скоригована тривалість поливу: 17.65 хв.

Крок 3: Квантові обчислення

- Симуляція квантової схеми для вибору стратегії...
- Результат вимірювання: {'1': 1}
- Обрана стратегія: 'інтенсивний' полив.
- Застосовано 'інтенсивну' стратегію: тривалість збільшено.
- Квантово-оптимізована тривалість: 21.18 хв.

– ФІНАЛЬНИЙ РЕЗУЛЬТАТ –

Рекомендована тривалість поливу: 21.18 хвилин.

Висновки. Інтеграція нечіткої логіки, експертних систем та квантових обчи дозволяє створити багаторівневу систему прийняття рішень, де кожна технологія виконує свою унікальну функцію: нечітка логіка забезпечує гнучкість, експертна система – надійність та керованість, а квантові обчислення – оптимізацію стратегії. Представлений приклад є ілюстрацією потен-

ціалу гібридних систем для вирішення складних, багатофакторних завдань у таких галузях, як точне землеробство, автоматизація виробничих процесів та управління ресурсами.

Список використаних джерел

1. Zadeh L. A. Fuzzy Logic Computing with Words. *IEEE Transactions – Fuzzy Systems*. 1996. Vol. 4, No. 2. P. 103–111. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/91.493904>
2. Singh H., Gupta M. M., Meitzler T., Hou Z.-G., Garg K. K., Solo A. M. G., Zadeh L. A. Real-Life Applications of Fuzzy Logic. *Hindawi Publishing Corporation Advances in Fuzzy Systems*. 2013. Article ID 581879. 3 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/581879>
3. Li Y., Tian M., Chen G., Du Y. Quantum fuzzy neural network: a new approach for fuzzy data processing. *International Journal of Fuzzy Systems*. 2020. Vol. 22, No. 1. P. 291–303. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40815-019-00755-9>
4. Yang X. Quantum fuzzy neural network based on fuzzy number. *Frontiers in Computing and Intelligent Systems*. 2023. Vol. 3, No. 2. P. 99–105. DOI: [10.54097/fcis.v3i2.7524](https://doi.org/10.54097/fcis.v3i2.7524)
5. Ruan Y., Xue X., Tan X., Chen X. Quantum-inspired fuzzy clustering algorithm. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 18585–18596. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2968361>
6. Ouedrhiri O., Faghihi U., Toure F., Banouar O. Quantum Fidelity Based Fuzzy C-Means Clustering Algorithm. *Contribution to: QCE2*. 2024. P. 138–143. DOI: [10.1109/QCE60285.2024.10267](https://doi.org/10.1109/QCE60285.2024.10267)
7. Mishra R., Kumar S. Quantum-behaved particle swarm optimization for fuzzy expert system. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*. 2021. Vol. 40, No. 4. P. 6291–6302. DOI: <https://doi.org/10.3233/JIFS-201530>
8. Ying M. Quantum computation, quantum theory and AI. *Artificial Intelligence*. 2010. Vol. 174. P. 162–176. DOI: [10.1016/j.artint.2009.11.009](https://doi.org/10.1016/j.artint.2009.11.009)

Дата першого надходження статті до видання: 19.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 12.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



A. Bezverkhyi, I. Skrypnyk, O. Zhukov
Zaporizhzhia National University

INTEGRATING QUANTUM COMPUTING INTO FUZZY LOGIC EXPERT SYSTEMS

Summary

This paper presents the conceptual architecture and software implementation of a hybrid intelligent system that synthesizes three fundamental computing paradigms: fuzzy logic, expert systems, and quantum algorithms. The objective of this work is to demonstrate the synergistic effect of their combination in solving an applied problem – optimizing plant irrigation based on an analysis of external conditions. A fuzzy logic system is implemented in Python using the scikit-fuzzy toolkit. It processes imprecise input data (soil moisture, air temperature) and generates a baseline quantitative assessment – the irrigation duration – based on a set of linguistic rules. Based on the output from the fuzzy inference layer, a system of higher-order rules (an expert system) is applied. This layer introduces deterministic adjustments based on additional, contextual knowledge, thereby enhancing the reliability and adequacy of the final decision. To select the optimal course of action under conditions of uncertainty, a quantum algorithm simulation is employed using IBM's Qiskit library. This allows for the final optimization of the recommended duration.

Conclusions. The integration of the approaches described in this paper allows for the creation of a multi-level decision-making system where each technology performs a unique function: fuzzy logic provides flexibility, the expert system ensures reliability and control, and quantum computing delivers strategy optimization. The presented case study illustrates the potential of hybrid systems for solving complex, multi-factor problems in domains such as precision agriculture, industrial process automation, and resource management.

Keywords: hybrid intelligent system, fuzzy logic, expert system, quantum computing, optimization.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-29>

УДК 004.85:37.013.2

А. С. Янко, канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0003-2876-9316

М. С. Мизюра, аспірант

ORCID: 0009-0009-9301-2054

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

e-mail: al9_yanko@ukr.net

МОДЕЛЬ ПЕРСОНАЛІЗАЦІЇ НАВЧАЛЬНОГО ПРОЦЕСУ ЧЕРЕЗ ІНТЕГРАЦІЮ LLM У ВЕБЗАСТОСУНОК ІЗ ДИНАМІЧНОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ ПОЯСНЕНЬ

Анотація. Об'єктом дослідження є персоналізація навчальної взаємодії у вебзастосунках на основі великих мовних моделей (LLM) як адаптивного пояснювального ядра. Предметом – модель динамічної генерації роз'яснень, що адаптує складність та стиль викладу до когнітивного профілю та історії помилок студента. Метою роботи є теоретичне обґрунтування та розвиток моделі персоналізації навчального процесу через інтеграцію LLM у структуру вебзастосунку для створення динамічного циклу генерації індивідуальних пояснень із забезпеченням безперервного зворотного зв'язку. Наукова новизна полягає у поєднанні когнітивного профілювання та оркестрування промптів, що враховує структуру помилок, темп діяльності та ознаки рефлексії. Практична значущість підтверджується можливістю вбудовування запропонованої моделі у наявні LMS/EdTech-платформи, скороченням часу на формування пояснення та підвищенням приросту навчальних результатів у контрольованому експерименті.

Ключові слова: персоналізація навчання, великі мовні моделі, вебзастосунок, адаптивне пояснення, когнітивний профіль, контекстне вікно, інтелектуальні системи навчання, генеративний ШІ.

Постановка проблеми. Сучасний етап розвитку світової цифрової освіти характеризується зміною фундаментальної парадигми взаємодії у тріаді «викладач – навчальний матеріал – студент» під впливом генеративного штучного інтелекту. Швидке проникнення великих мовних моделей (LLM) у навчальний процес створює передумови для вирішення «проблеми 2-х сигм» [1, с. 5], що полягає у пошуку методів групового навчання, які за ефективністю не поступалися б індивідуальному репетиторству. На світовому рівні актуальність дослідження зумовлена необхідністю подолання неоднорідності студентських груп у дистанційних курсах. Здобувачі зазвичай мають різний когнітивний багаж, працюють з абстракціями у власному темпі та обирають несхожі навчальні стратегії [2, с. 207].

Статичні сценарії сучасних вебкурсів часто ігнорують ці відмінності, що призводить до когнітивного перевантаження одних студентів та недостатньої мотивації інших [3, с. 845; 4, с. 4]. Наукова новизна роботи полягає у розробці моделі динамічної генерації пояснень, яка, на відміну від існуючих чат-ботів, інтегрує LLM як кероване ядро, що адаптується до структури помилок та ознак метакогнітивної рефлексії студента [5, с. 1; 6, с. 151]. Актуальність роботи також підкріплюється державними пріоритетами України щодо цифровізації освіти та розвитку цифрових компетентностей [4, с. 5; 7, с. 1].

Аналіз останніх досліджень. Розвиток інтелектуальних систем навчання за останні десять років демонструє поступову трансформацію від жорстко детермінованих алгоритмів [8, с. 185] до гнучких архітектур на основі глибокого навчання [9, с. 603]. Аналіз актуальних публікацій у провідних наукових виданнях дозволяє констатувати зміну парадигми: від використання

статичних тьюторів до впровадження динамічних екосистем, побудованих навколо великих мовних моделей (LLM).

У роботі [5, с. 6] обґрунтовано, що застосування LLM-орієнтованих фреймворків у поєднанні з рефлексивним контуром пам'яті дозволяє досягти високого рівня персоналізації, особливо у складних технічних доменах, як-от навчання програмуванню. Дослідження [10, с. 2] розширює цей підхід, доводячи, що інтеграція архітектури RAG (Retrieval-Augmented Generation) та знанневих графів критично підвищує фактологічну точність генеративних відповідей, мінімізуючи ризики «галюцинацій» ШІ у вузькоспеціалізованих дисциплінах.

Ефективність використання сучасних моделей (зокрема GPT-4) як бази для інтелектуальних тьюторських систем нового покоління підтверджується у дослідженні [11, с. 4], де акцентовано на важливості модульної інженерії для забезпечення педагогічної адаптивності. Водночас у публікаціях [12, с. 1; 13, с. 4] зазначається, що ключовою невирішеною частиною загальної проблеми залишається відсутність прозорих механізмів профілювання, що без належної системи пояснень може спровокувати когнітивну пасивність здобувачів.

Незважаючи на значну кількість розробок, поза увагою дослідників часто залишається питання безперервного динамічного коригування складності пояснень на основі аналізу структури помилок у реальному часі. Саме вирішенню цієї наукової задачі, що базується на синтезі когнітивного профілювання та адаптивного оркестрування промптів, присвячується дана стаття.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою статті є теоретичне обґрунтування та розробка моделі персоналізації навчального процесу через інтеграцію великих мовних моделей у структуру вебзастосунку для створення динамічного циклу генерації індивідуальних пояснень.

Необхідність розробки зумовлена тим, що у прикладних освітніх вебсистемах часто використовують або шаблонні підказки, або універсальні чат-боти з фіксованим стилем відповіді. Такий підхід має чотири критичні вади:

1. Відсутня безперервна підстройка складності під поточний когнітивний стан.
2. Недостатньо враховується тип помилки (концептуальна, процедурна, термінологічна, рефлексивна).
3. Контекстне вікно використовується фрагментарно, тож історія взаємодії слабо впливає на нове пояснення.
4. Масштабування ускладнюється через залежність від викладача як єдиного джерела індивідуальних пояснень [14, с. 3].

Для подолання цих недоліків та досягнення поставленої мети сформовано такі завдання:

1. Формалізувати опис стану здобувача через когнітивний вектор $v(t)$.
2. Розробити 7-кроковий алгоритм динамічного пояснювального циклу.
3. Описати структуру та педагогічні функції модулів персоналізації (див. табл. 1).
4. Експериментально перевірити ефективність запропонованого підходу.

Основний матеріал і результати досліджень. Запропонована модель докорінно змінює логіку взаємодії: пояснення будується як керований цикл з кількох кроків: оцінювання профілю → оркестрування контексту → генерація → перевірка педагогічних обмежень → оновлення профілю. Це переводить систему зі стану «статичний асистент» у стан «динамічний пояснювальний цикл».

Взаємодія компонентів системи та їхнє функціональне навантаження представлені у Таблиці 1.

Загальна структурно-функціональна схема взаємодії зазначених модулів у межах розробленої архітектури представлена на рис. 1.

Модель описує здобувача через когнітивний вектор $v(t) = \{k_t, p_t, r_t, m_t, e_t\}$, де k_t – предметні знання, p_t – процедурна компетентність, r_t – рефлексивність, m_t – мотиваційна стійкість, e_t –

Таблиця 1

Порівняльна характеристика модулів персоналізації навчального вебзастосунку

Модуль	Вхідні дані	Вихідні дані	Педагогічна функція
Профілювання здобувача	логи взаємодії, результати тестів, темп виконання	когнітивний вектор $v(t)$	визначення рівня складності та каналу пояснення
Контекстний оркестратор	$v(t)$, історія діалогу, освітній сценарій	структурований промпт $P(t)$	підготовка даних для LLM без втрати дидактичної мети
Генератор пояснень	$P(t)$, база прикладів, правила оцінювання	індивідуалізований фрагмент пояснення $E(t)$	адаптація стилю, глибини та прикладів до профілю
Петля зворотного зв'язку	реакції студента, уточнення, нові помилки	оновлений $v(t+1)$, корекція стратегії	безперервне покращення якості підтримки



Рис. 1. Архітектура моделі персоналізації з динамічною генерацією пояснень

індикатор когнітивного навантаження. Оцінювання компонентів відбувається за гібридною схемою: мікротести, поведінкові логи та аналіз мовленнєвих актів у діалозі.

Оновлення когнітивного профілю задається рекурентним правилом:

$$v(t+1) = \alpha \cdot v(t) + (1 - \alpha) \cdot \Phi(x_t, y_t, h_t), \quad (1)$$

де x_t – набір навчальних дій на кроці t ;

y_t – якість відповіді;

h_t – часові та метаповедінкові ознаки;

$\Phi(\cdot)$ – агрегувальний оператор профілювання;

α – коефіцієнт інерційності стану.

Динамічну складність пояснення визначає функція:

$$c_t = \sigma(w_1 \cdot (1 - k_t) + w_2 \cdot e_t + w_3 \cdot \delta_t + w_4 \cdot u_t), \quad (2)$$

де w_1 – вагові коефіцієнти, які визначають пріоритетність (вплив) кожного фактора на фінальний рівень складності пояснення c_t ;

δ_t – параметр, що описує тип і глибину помилки;

u_t – параметр, що описує невизначеність моделі щодо наміру студента.

Значення інтегрального показника складності c_t , розраховане згідно з формулою (2), визначає стратегію формування відповіді. Зокрема, при низьких значеннях c_t система генерує лаконічні евристичні підказки (натяки), стимулюючи самостійну рефлексію. При зростанні показника c_t модель автоматично переходить до детальшого покрокового розбору матеріалу, додаючи аналогії та контрприкладі для подолання зафіксованих когнітивних бар'єрів.

Оптимізаційний критерій генерації пояснень має форму:

$$L = \lambda_1 \cdot Err + \lambda_2 \cdot Load + \lambda_3 \cdot Time - \lambda_4 \cdot Gain, \quad (3)$$

де λ_i – коефіцієнтами штрафу та заохочення (вагами регуляризації), які визначають «ціну» кожної складової при виборі найкращого варіанта пояснення;

Err – частота повторної помилки після пояснення;

Load – індекс когнітивного перевантаження;

Time – затримка відповіді;

Gain – приріст засвоєння знань у мікроциклі.

Мінімізацію L за формулою (3) забезпечує налаштування промпт-стратегії, довжини контексту та типу прикладів.

Окремий акцент зроблено на роботі контекстного вікна LLM. Замість механічного накопичення історії використано селективне наповнення: до контексту потрапляють лише фрагменти, релевантні поточному наміру навчання (типові помилки, останні успіхи, персональні «зони ризику»). Це зменшує шум, стабілізує відповіді і допомагає ефективно працювати навіть за обмеженого вікна у довгих сесіях [15, с. 1].

Ще один важливий компонент – педагогічний фільтр. Після генерації відповідь LLM проходить перевірку дидактичних обмежень: відповідність цілі заняття, коректність термінів, допустимий рівень абстракції та наявність мотиваційного елемента. Це знижує ризик ситуацій, коли технічно правильний текст не працює як навчальне пояснення.

На основі аналізу [10]–[13] у роботі застосовано підхід «керованої цитованості». Наприклад, висновок із [11, с. 5] про те, що «generative ITSs represent a transformative approach to personalized education through real-time adaptability», інтерпретується як потреба вбудувати адаптацію всередину самого алгоритму генерації, а не залишати її на рівні зовнішніх правил. Інше положення з [10, с. 3] щодо «critical need for domain-specific knowledge support» реалізовано через підмодуль тематичних мікроконтекстів, які додаються до промпту лише тоді, коли зафіксовано семантичний дефіцит.

Експериментальну перевірку проведено в навчальному вебзастосунку з дисципліни «Основи аналізу даних». Сформовано дві групи (контрольна та експериментальна), які проходили однакові тематичні модулі. Відмінність була лише у механізмі пояснень: у контролі працював статичний чат-бот, у експерименті – алгоритм динамічної генерації. Період спостереження становив 12 тижнів. Початкові значення в обох групах були статистично близькими. Після впровадження динамічної персоналізації зафіксовано стабільно вищий темп приросту засвоєння. Візуалізація порівняльної динаміки середнього показника засвоєння впродовж 12-тижневого навчального циклу наведена на рис. 2. Додатково оцінювалися: частота повторних запитів, час до розуміння нового поняття, частка коректних самопояснень і кількість звернень до викладача. Узагальнені результати проведеного педагогічного експерименту та їх порівняльна характеристика наведені в табл. 2.

Окремо оцінено відповідність рівня пояснення профілю здобувача. Дані показали, що найбільший приріст отримується тоді, коли адаптація враховує не лише рівень знань, а й компоненти рефлексії та когнітивного навантаження. Ця закономірність підтверджується побудованою матрицею релевантності рівня пояснення до параметрів когнітивного профілю (див. рис. 3).

Методика обчислювального експерименту. Для відтворюваності застосовано трирівневий протокол: рівень мікрвзаємодій – якість окремого пояснення; рівень сесії – інтегральний прогрес за 60–90 хв; рівень навчального циклу – підсумковий приріст компетентності за 12 тижнів. На першому рівні фіксували латентність відповіді LLM, кількість уточнень до коректного розуміння, частоту повтору помилки та індекс самопояснення. На другому рівні додавали індикатори стійкості уваги, динаміку складності задач і частку завершення блоку без зовнішньої допомоги. На третьому рівні узагальнювали передтест/післятест, утримання знань за відкладеним тестом і перенос навичок на нові типи завдань.

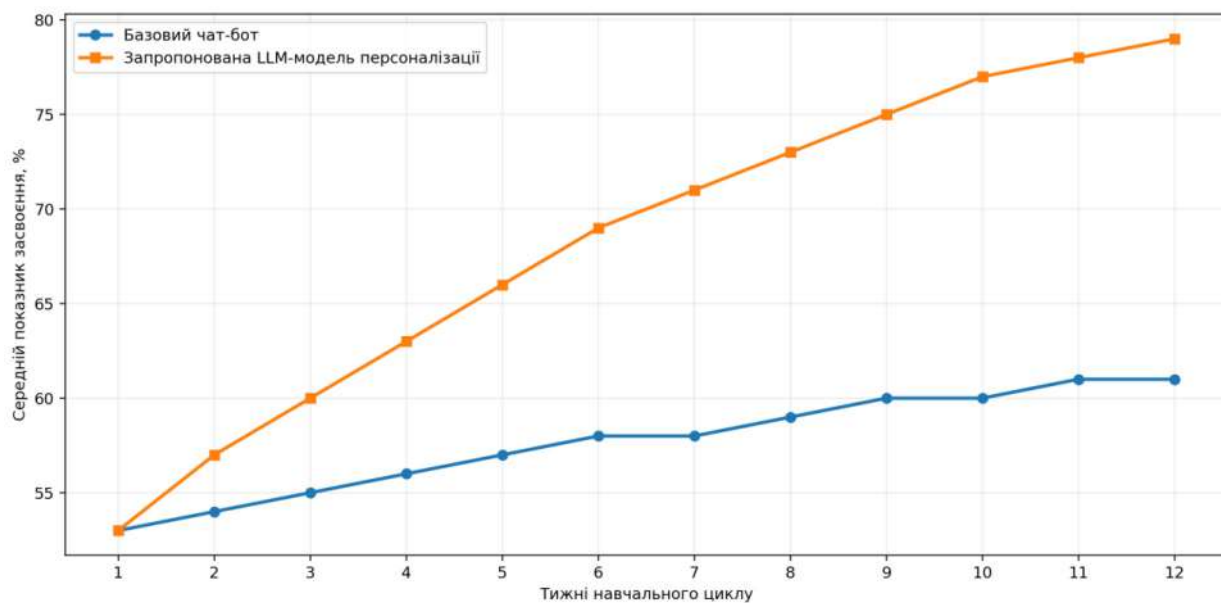


Рис. 2. Динаміка середнього показника засвоєння впродовж навчального циклу

Таблиця 2

Результати педагогічного експерименту ($n = 86$)

Група	Передтест, %	Післятест, %	Приріст, %	Час на пояснення (с)
Контрольна (чат-бот без адаптації)	54,2	63,1	8,9	12,7
Експериментальна (динамічна генерація)	54,0	77,8	23,8	7,4

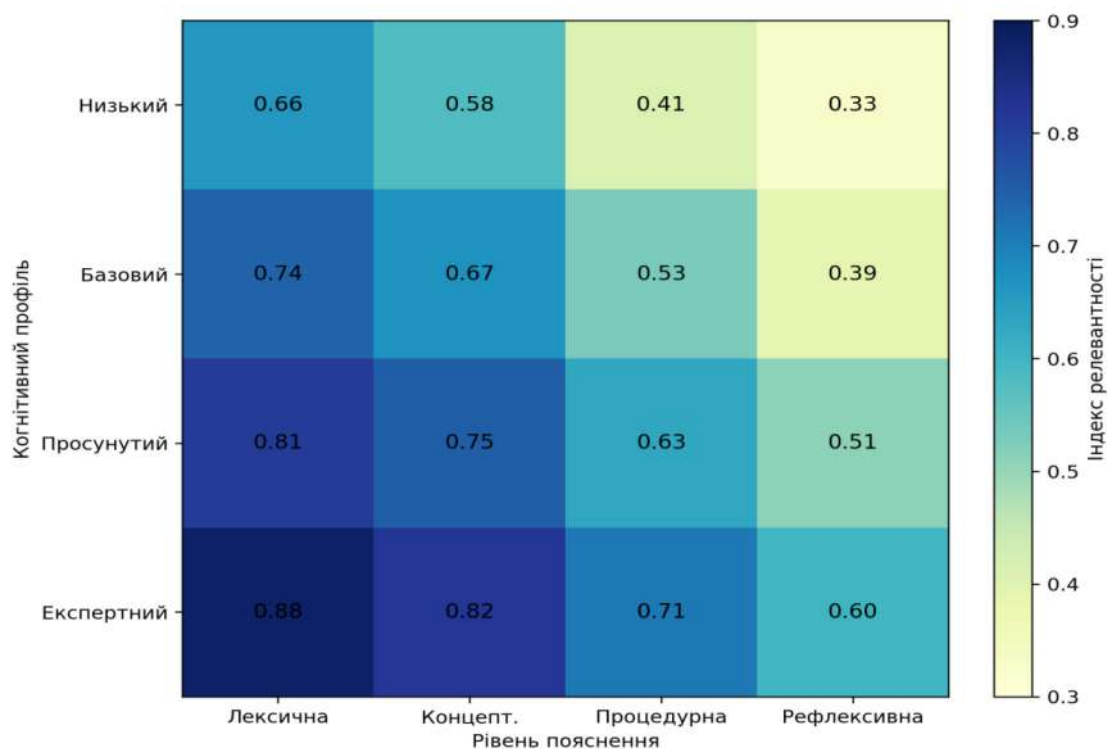


Рис. 3. Матриця релевантності рівня пояснення до когнітивного профілю

Щоб зменшити ефект «новизни інструмента», передбачили двотижневий адаптаційний період. Показники цього етапу не включалися до фінальної статистики і використовувалися лише для калібрування ваг у формулах (1)–(3). Вплив викладача контролювався: матеріали, дедлайни та критерії оцінювання для обох груп були однаковими. Розподіл студентів будували так, щоб вирівняти стартовий бал, попередній досвід роботи з чат-ботами та інтенсивність відвідувань. Аналіз чутливості до параметра α показав найстабільнішу роботу в інтервалі 0,62–0,74: модель зберігає пам'ять про динаміку профілю, але не «залипає» на застарілих оцінках.

Алгоритм динамічної генерації реалізовано як 7-крокову послідовність: 1) збір поточних ознак взаємодії; 2) оновлення вектора $v(t + 1)$; 3) оцінка цільового рівня c_i ; 4) формування контекстного пакета k_i з відбором релевантних фрагментів; 5) генерація кандидатів $e_1...e_n$ різної довжини й стилю; 6) ранжування за критерієм L та педагогічними обмеженнями; 7) подання найкращого кандидата і донавчання профілю за реакцією користувача. На відміну від одноразових промптів, у контур вбудовано «самоперевірку»: модель генерує коротку валідаційну репліку (контрольне питання або мікрозавдання), щоб відрізнити реальне розуміння від формальної згоди.

Для педагогічної ефективності критичним виявився контроль стилю пояснення. У моделі використовуються чотири базові стилі: інструктивний (чіткі кроки), евристичний (натяки та запитання), аналогічний (побутові або професійні аналогії) і рефлексивний (самоперевірка). Перехід між стилями відбувається автоматично на основі історії успішності. Наприклад, якщо студент швидко проходить процедури, але плутає базові поняття, система зменшує процедурну деталізацію і посилює концептуальні аналогії. Якщо ж з'являється довга серія повторних помилок одного класу, активується рефлексивний режим із короткими контрольними запитаннями після кожного блоку.

Додатково проаналізовано вплив довжини контекстного вікна на якість пояснень. Тестувалися три режими: короткий (до 2 тис. токенів), середній (4–8 тис.) і розширений (понад 8 тис.). Виявлено, що збільшення вікна не дає автоматичного зростання якості: у частині сценаріїв надмірний контекст, навпаки, погіршував педагогічну чіткість через домішки нерелевантних фрагментів. Тому в архітектурі закладено принцип «керованої компактності»: вікно розширюється лише за індикаторів складної помилки або низької впевненості моделі. Це узгоджується з висновками [10, с. 3] про критичність контекстно-специфічної підтримки знаннями.

Порівняння типових сценаріїв використання показало, що найпомітніший ефект спостерігається у трьох випадках: (1) первинне опанування нової теми, коли важливо швидко сформулювати базову інтуїцію; (2) корекція стійких помилок після контрольних завдань; (3) передекзаменаційне повторення, де критично важливі короткі адаптивні мікропояснення. У рутинному тренуванні простих задач відрив від базового чат-бота менший, бо там домінує ефект повторення, а не складна інтерпретація матеріалу. Отже, модель найдоцільніше застосовувати у «вузьких місцях» навчального процесу, де стандартні пояснення працюють слабо.

Педагогічне трактування результатів спирається на теорію когнітивного навантаження [2, с. 203] і механізм самопояснення [6, с. 153]. Коли пояснення синхронізується з поточним рівнем підготовки, зменшується частка зовнішнього (непродуктивного) навантаження і зростає змістове опрацювання. У цьому сенсі LLM працює не просто як «джерело відповіді», а як інструмент дозування складності. Це пояснює, чому експериментальна група показала не лише кращий тестовий бал, а й вищий трансфер знань на нові задачі.

Аналіз ризиків і загроз валідності. Внутрішню валідність потенційно знижував мотиваційний фактор: частина студентів експериментальної групи могла бути активнішою через новизну технології. Для компенсації використано адаптаційний період і нормалізацію за інтенсивністю взаємодії. Зовнішня валідність обмежена дисципліною, рівнем підготовки та мовою контенту,

тож пряме перенесення числових коефіцієнтів на інші галузі потребує окремої перевірки. Конструктивна валідність пов'язана з тим, що когнітивний профіль є латентною величиною: його оцінка залежить від якості проксі-ознак (час, патерни помилок, мовні маркери). Надійність підвищували багатоканальним оцінюванням і перехресною перевіркою на відкладеній підвибірці.

Етичні й організаційні аспекти впровадження. Інтеграція LLM у навчання має тримати баланс між персоналізацією та автономією мислення. Якщо система занадто швидко дає «готові» відповіді, зростає ризик зниження самостійної інтелектуальної активності, що також фіксують сучасні огляди [13, с. 2; 16, с. 110]. Тому модель реалізує режим «поступового розкриття»: спочатку натяк або напрям думки, а повніше пояснення, після спроби самостійного кроку. Додатково ведеться журнал прозорості, де фіксуються версія моделі, параметри промпту, тип профілю та педагогічний шаблон відповіді. Це створює основу для аудиту якості в межах інституційного контролю академічної доброчесності.

Практичні рекомендації для закладів освіти. Доцільна поетапна стратегія впровадження: пілот на одній дисципліні → методичне налаштування профілів → масштабування на курс або програму. На першому етапі важливо зібрати локальний корпус типових помилок і прикладів «якісного пояснення» від викладачів. На другому зафіксувати правила ескалації складних випадків до людини-експерта. На третьому впровадити аналітичну панель із ключовими метриками (приріст балів, частка повторних помилок, середня латентність, індекс задоволеності). Такий підхід запобігає техноцентричному впровадженню і прив'язує LLM-модель до реальних освітніх цілей.

Обговорення результатів. Отримані дані узгоджуються з класичними педагогічними спостереженнями про переваги індивідуалізованого супроводу (ефект у [1, с. 11]), але на відміну від традиційного репетиторства модель забезпечує масштабованість у вебсередовищі. Ключовий внесок у приріст ефективності дають три чинники: (1) адаптивний добір складності; (2) кероване використання контекстного вікна LLM; (3) замкнений цикл зворотного зв'язку з оновленням профілю після кожної мікротривої.

Порівняння з іншими роботами показує, що модель концептуально близька до модульних підходів [11, с. 2], але розширює їх завдяки явно заданому критерію оптимізації пояснення та глибшій персоналізації стилю. На відміну від суто рекомендаційних систем [12, с. 3], рішення сфокусоване на інтерпретації матеріалу і подоланні конкретної навчальної помилки. Порівняно з підходами когнітивного профілювання [13, с. 2], акцент зроблено на оперативній динаміці профілю всередині однієї сесії, а не лише на міжсеместровій аналітиці.

Практично важливий наслідок – зниження навантаження на викладача. У масовому змішаному навчанні викладач часто фізично не встигає дати індивідуальне пояснення саме в момент появи труднощів. Автоматизований механізм персоналізованих роз'яснень частково закриває цей розрив і вивільняє час для складніших завдань: проєктування активностей, верифікація змісту, етичне модераторство.

Разом із перевагами виявлено і обмеження. По-перше, якість генерації залежить від повноти бази прикладів і якості первинної розмітки помилок. По-друге, у спеціалізованих темах потрібне додаткове доменне налаштування, інакше зростає ризик неточних узагальнень. По-третє, необхідне постійне дотримання принципів академічної доброчесності й прозорості, що узгоджується з рекомендаціями UNESCO [7, с. 3].

Висновки. У статті вирішено актуальну наукову задачу вдосконалення моделі персоналізації навчального процесу шляхом інтеграції великих мовних моделей у функціональну структуру вебзастосунку.

1. Теоретично обґрунтовано та впроваджено модель динамічної генерації пояснень, ключовою особливістю якої є перехід від статичних підказок до керованого адаптивного циклу.

Це забезпечується використанням когнітивного вектора здобувача $v(t)$, що динамічно оновлюється за рекурентним правилом, дозволяючи системі миттєво реагувати на зміну стану знань, темп діяльності та рівень рефлексії студента.

2. Розроблено алгоритм селективного керування контекстом, який на відміну від механічного накопичення історії взаємодії, фокусується на релевантних «зонах ризику» та типових помилках. Впровадження оптимізаційного критерію L та педагогічного фільтра дозволило стабілізувати відповіді LLM, гарантуючи їхню дидактичну коректність та відповідність цілям навчання.

3. Експериментально підтверджено переваги запропонованого підходу. Результати 12-тижневого педагогічного експерименту ($n = 86$) показали статистично значущий приріст навчальних результатів в експериментальній групі на рівні 23,8 % порівняно з 8,9 % у контрольній групі. Зафіксовано скорочення часу на розуміння складних понять (з 12,7 с до 7,4 с на цикл пояснення) та підвищення здатності студентів до трансферу знань на нові типи завдань.

4. Визначено практичну значущість моделі для сучасних EdTech-платформ. Встановлено, що найбільша ефективність персоналізації досягається у фазах первинного опанування складних тем та корекції стійких когнітивних упереджень. Модель дозволяє масштабувати ефект індивідуального репетиторства («проблема 2-х сигм») у масовому вебсередовищі, суттєво знижуючи рутинне навантаження на викладача.

Перспективи подальших досліджень полягають у розробці мультимодальних профілів (інтеграція аналізу голосу та поведінкових патернів) та створенні інструментів прозорої аналітики для викладачів, що дозволить здійснювати глибший аудит академічної доброчесності в умовах використання генеративного штучного інтелекту.

Список використаних джерел

1. Bloom B. S. The 2 Sigma Problem: The Search for Methods of Group Instruction as Effective as One-to-One Tutoring. *Educational Researcher*. 1984. Vol. 13 (6). P. 4–16. DOI: <https://doi.org/10.3102/0013189X013006004>
2. Mayer R. E. *Multimedia Learning*. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. 427 p.
3. Russell S., Norvig P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. 4th ed. Pearson, 2020. 1136 p.
4. Про схвалення Концепції розвитку штучного інтелекту в Україні: розпорядження Кабінету Міністрів України від 02.12.2020 № 1556-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-2020-%D1%80>
5. Huang S., Sun Y., Yu X. SP-TeachLLM: An LLM-Driven Framework for Personalized and Adaptive Programming Education. *Information*. 2025. Vol. 16 (12). Art. 1045. DOI: <https://doi.org/10.3390/info16121045>
6. Chi M. T. H., Bassok M., Lewis M. W., Reimann P., Glaser R. Self-Explanations: How Students Study and Use Examples in Learning to Solve Problems. *Cognitive Science*. 1989. Vol. 13 (2). P. 145–182. DOI: https://doi.org/10.1207/s15516709cog1302_1
7. Про схвалення Концепції розвитку цифрових компетентностей: розпорядження Кабінету Міністрів України від 03.03.2021 № 167-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/167-2021-%D1%80>
8. Woolf B. *Building Intelligent Interactive Tutors: Student-Centered Strategies for Revolutionizing E-Learning*. Morgan Kaufmann, 2010. 466 p.
9. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep Learning*. MIT Press, 2016. 800 p.
10. Yao Y., González-Vélez H. AI-Powered System to Facilitate Personalized Adaptive Learning in Digital Transformation. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15 (9). Art. 4989. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15094989>
11. Liu S., Guo X., Hu X., Zhao X. Advancing Generative Intelligent Tutoring Systems with GPT-4: Design, Evaluation, and a Modular Framework for Future Learning Platforms. *Electronics*. 2024. Vol. 13 (24). Art. 4876. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics13244876>
12. Yang Q., Liang C. A Second-Classroom Personalized Learning Path Recommendation System Based on Large Language Model Technology. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15 (14). Art. 7655. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15147655>
13. Marín Díaz G. Supporting Reflective AI Use in Education: A Fuzzy-Explainable Model for Identifying Cognitive Risk Profiles. *Education Sciences*. 2025. Vol. 15 (7). Art. 923. DOI: <https://doi.org/10.3390/educsci15070923>

14. Про освіту: Закон України від 05.09.2017 № 2145-VIII (зі змінами). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2145-19>
15. Міністерство освіти і науки України. Стратегія розвитку вищої освіти в Україні на 2022-2032 роки. Київ: МОН України, 2022. URL: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/rizne/2022/02/23/Stratehiya.rozv.vyshchoyi.osvity-23.02.22.pdf>
16. Luckin R. Machine Learning and Human Intelligence: The Future of Education for the 21st Century. UCL Institute of Education Press, 2018. 232 p.

Дата першого надходження статті до видання: 19.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



A. Yanko, M. Myziura
National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”

MODEL OF EDUCATIONAL PROCESS PERSONALIZATION VIA LLM INTEGRATION INTO A WEB APPLICATION WITH DYNAMIC EXPLANATION GENERATION

Summary

The rapid integration of generative artificial intelligence into the educational process fundamentally changes the interaction within the “teacher – learning material – student” triad. In digital courses, the most prominent problem remains the heterogeneity of student groups, where learners start with different knowledge backgrounds, master new material at different paces, and utilize various cognitive strategies. This study aims to theoretically substantiate and develop a personalization model for the educational process through the integration of Large Language Models (LLMs) into the structure of a web application to create a dynamic cycle for generating individualized explanations. The focus is on overcoming the “2 Sigma Problem” by providing automated tutoring support that matches the effectiveness of one-to-one human instruction. *Methodology.* The proposed model describes the learner through a multidimensional cognitive vector $v(t)$, which includes domain knowledge, procedural competence, reflectiveness, motivational stability, and a cognitive load indicator. A recurrent rule for updating the cognitive profile is established, using a hybrid evaluation scheme: micro-tests, behavioral logs, and dialogue analysis. The dynamic complexity of explanations is determined by an optimization criterion L , which balances penalty coefficients for repeated errors, cognitive overload, and response latency against the rewards of knowledge gain. A 7-step algorithm for dynamic generation was implemented, featuring selective context window management and a multi-level pedagogical filter to ensure didactic correctness and term consistency. *Results.* Experimental verification was conducted within a web application for the “Data Analysis Basics” course over a 12-week period with 86 participants. The results demonstrated a statistically significant increase in learning outcomes. The experimental group, utilizing the dynamic generation algorithm, showed a knowledge gain of 23.8 %, compared to 8.9 % in the control group using a static chatbot. Furthermore, the average time required for a student to understand a complex concept was reduced from 12.7 to 7.4 seconds. The relevance matrix confirmed a high correlation between the calculated complexity level c_i and the actual cognitive needs of the students. *Scientific Novelty and Practical Significance.* The scientific novelty lies in the synthesis of cognitive profiling, prompt orchestration, and a feedback loop that accounts for error structures and metacognitive reflection. The practical value is confirmed by the possibility of embedding the model into existing LMS/EdTech platforms, reducing the instructor’s routine workload, and enhancing the transfer of knowledge to new types of tasks. The study concludes that LLMs function not merely as information sources but as adaptive scaffolding tools for managing cognitive load in real-time.

Keywords: personalization of learning, large language models, web application, adaptive explanation, cognitive profile, context window, intelligent tutoring systems, generative AI.



ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-30>

УДК 621.646

І. М. Белова¹, канд. екон. наук, доцент

ORCID: 0000-0002-1497-7133

Л. М. Кюрчева², канд. с.-г. наук, доцент

ORCID: 0000-0002-8225-3399

В. М. Гіджеліцький³, канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0001-5959-514X

М. В. Кирилів⁴, канд. біол. наук, доцент

ORCID: 0000-0001-5251-5637

¹ Інститут інноватики, природокористування та інфраструктури Західноукраїнського національного університету

² Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

³ Київський кооперативний інститут бізнесу і права

⁴ Тернопільський національний медичний університет імені І. Я. Горбачевського

e-mail: igorstadnykk@gmail.com

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ПШЕНИЧНОГО ХЛІБА ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ ФІТОЗБАГАЧУВАЧІВ У ВИГЛЯДІ ОВОЧЕВИХ МАС

Анотація. В роботі проведено обґрунтування технологічного процесу виробництва хлібобулочних виробів із пшеничного борошна вищого ґатунку з додаванням подрібнених мас моркви та буряка. Розглянуто фізико-хімічні методи оцінки якості борошна та клейковини; мікроскопічне дослідження життєздатності дріжджових клітин; органолептична оцінка готової продукції. Встановлено, що підймальна сила дріжджів покращується на 28–30 % завдяки дії мінеральних речовин (К, Са, Na) та вітамінів, що містяться в овочах.

Розроблено рецептуру збагаченого хліба, яка дозволяє повністю виключити використання маргарину та вчетверо знизити вміст доданого цукру. Готовий продукт характеризується високою пористістю (72 %), підвищеною мікробіологічною стійкістю до «картопляної хвороби» та високою оцінкою споживчої привабливості. Обґрунтовано механізм впливу нутрієнтів овочевих мас на метаболізм дріжджів та структурно-механічні властивості пшеничного тіста при замішуванні без додавання води.

Ключові слова: хлібобулочні вироби, овочеві маси, морква, буряк, клейковина, підймальна сила дріжджів, збагачення нутрієнтами, картопляна хвороба хліба.

Постановка проблеми. Ефективним способом підвищення вітамінної забезпеченості населення є включення до раціону продуктів, додатково збагачених есенціальними нутрієнтами до рівня, що відповідає фізіологічним потребам організму [1]. У цьому контексті особливого значення набуває збагачення хлібобулочних виробів як продуктів масового та щоденного споживання.

На сьогодні розроблено широкий спектр технологій виробництва хлібобулочних виробів із використанням продуктів переробки зернових, олійних і бобових культур. Поряд із цим застосовуються інгредієнти рослинного походження у вигляді овочевих цукатів, пюре, соків, настоїв, а також порошоків із гарбуза, моркви, шпинату, часнику та іншої сировини [2–8].

Водночас перспективним напрямом є використання свіжих овочевих мас буряка та моркви, які поки що недостатньо впроваджені у технологію хлібобулочних виробів. Ця сировина є доступною, економічно доцільною та характеризується високим вмістом біологічно актив-



них речовин, зокрема мінеральних елементів (К, Р, Са, Mg, Fe, Zn), вітамінів (С, групи В, РР, Е, фолієвої кислоти, провітаміну А), а також природних пігментів (бетаїн, бетанін, β -каротин, хлорофіл), що проявляють антиоксидантні властивості.

Використання овочевих мас у складі хлібобулочних виробів дає змогу підвищити їх харчову та біологічну цінність за рахунок збагачення вітамінами, мінеральними речовинами, харчовими волокнами та пектиновими сполуками, а також покращити органолептичні показники, зокрема колір і зовнішній вигляд продукції. Метою дослідження є наукове обґрунтування застосування овочевих мас моркви та буряка для інтенсифікації технологічного процесу, підвищення харчової цінності та покращення споживчих характеристик хлібобулочних виробів.

Основна частина. Для обґрунтування вибору об'єкта модернізації та підтвердження актуальності дослідження проведено маркетингове опитування серед жителів регіону. Опитування було спрямоване на встановлення доцільності використання овочевих мас у технології хлібобулочних виробів та оцінку споживчого ставлення до збагачених продуктів.

Вплив овочевих мас на технологічні властивості пшеничного борошна вищого гатунку оцінювали за показниками вмісту сирової клейковини та її розтяжності за загальноприйнятими методиками. Підймальну силу дріжджів визначали прискореним методом – за часом спливання кульки тіста, замішаного з додаванням збагачувачів у розрахунку на 7 г борошна відповідно до методики [8].

Життєздатність дріжджових клітин досліджували методом мікроскопії забарвлених препаратів. Для цього готували суспензію пресованих дріжджів і води у співвідношенні 1:3 (за масою), до якої додавали овочеві збагачувачі в кількості, еквівалентній витраті суспензії на 100 г борошна. Отримані суміші інкубували протягом 120 хв за температури 30 °С. Життєздатність клітин визначали кожні 30 хв за допомогою мікроскопування [5].

Для оцінки якості готової продукції випікали дослідні зразки хлібобулочних виробів за розробленою рецептурою (табл. 3). Випікання здійснювали безопарним способом відповідно до загальноприйнятої технології [11].

Подрібнені свіжі овочеві маси вносили на стадії замішування тіста. Кожен вид кольорового тіста (помаранчевий і рожевий) готували окремо без додавання води, що є принциповою відмінністю розробленої технології. На заключному етапі тістові заготовки формували шляхом переплетення (косичка).

Органолептичну оцінку якості виробів проводили за п'ятибальною шкалою з урахуванням зовнішнього вигляду, аромату та смаку. Фізико-хімічні показники визначали відповідно до вимог ДСТУ 8709:2017: кислотність – прискореним методом (ГОСТ 5670-96), пористість (ГОСТ 5669-96), вологість (ГОСТ 21094-75).

Стійкість виробів до розвитку «картопляної хвороби» оцінювали методом органолептичного аналізу. Зразки обгортали у вологий папір і витримували в термостаті за температури 37 °С, створюючи сприятливі умови для розвитку *Bacillus subtilis* та *Bacillus mesentericus*. Через 24 год проводили первинну оцінку (запах, стан м'якушки), після чого контроль повторювали кожні 12 год до появи ознак псування.

Для комплексного обґрунтування доцільності використання овочевих мас буряка та моркви досліджено їх вплив на технологічні властивості борошна, підймальну силу дріжджів і життєздатність дріжджових клітин. Результати дослідження впливу овочевих мас на масову частку клейковини наведено в табл. 1.

З наведених даних видно, що внесення овочевих мас у співвідношенні жмиху та соку 1:3 (у розрахунку на 100 г борошна) не спричиняє суттєвих змін вмісту сирової клейковини порівняно з контрольним зразком. Водночас встановлено зниження розтяжності клейковини на 10 %, що свідчить про зміцнення клейковинного каркаса тіста під впливом рослинних збагачувачів.



Таблиця 1

Вплив овочевих мас на показники клейковини пшеничного борошна

Показник	Контроль	З додаванням овочевих мас буряка	З додаванням овочевих мас моркви
Вміст сирої клейковини, %	32,28	32,25	32,15
Розтяжність клейковини, см	15,0	13,5	13,5

Як видно з наведених даних, внесення овочевих мас призводить до зниження розтяжності клейковини з 15,0 до 13,5 см, що свідчить про її зміцнення. Отримані результати можна пояснити впливом органічних кислот та біологічно активних речовин рослинної сировини, які беруть участь у формуванні та стабілізації білково-полімерної структури тіста. Унаслідок цього підвищуються структурно-механічні властивості клейковинного каркаса та зменшується його деформаційна здатність.

Вплив овочевих мас буряка та моркви на підймальну силу дріжджів наведено в табл. 2. Встановлено, що внесення рослинних збагачувачів сприяє скороченню часу підйому тіста на 1–3 хв порівняно з контрольним зразком, що свідчить про підвищення підйимальної сили дріжджів. Такий ефект обумовлений наявністю у складі овочевих мас доступних вуглеводів, вітамінів групи В та мінеральних речовин, які інтенсифікують метаболічну активність дріжджових клітин.

Отримані результати підтверджують доцільність використання овочевих мас як природних стимуляторів бродіння у технології хлібобулочних виробів.

Таблиця 2

Вплив овочевих мас моркви, буряка на підймальну силу дріжджів

Зразок	Значення показника підйимальної сили, хв
Контроль	11 хв 20 с
Зразок із додаванням овочевої маси з:	
Буряка	8 хв 00 с
Моркви	хв 03 с

Отримані результати узгоджуються з попередніми даними щодо підйимальної сили дріжджів і свідчать про інтенсифікацію процесу бродіння. Зокрема, встановлено скорочення часу підйому тіста з 11 хв 20 с (контроль) до 8 хв 00 с при використанні овочевих мас буряка та до 8 хв 03 с – моркви.

Таким чином, тривалість підйому зменшується приблизно на 30 %, що є суттєвим показником для технологій із використанням натуральної рослинної сировини. Отриманий ефект можна пояснити стимулювальним впливом біологічно активних речовин овочевих мас на метаболічну активність дріжджових клітин.

На графіку наведено динаміку частки нежиттєздатних дріжджових клітин (%) упродовж 120 хв витримки. Контрольний зразок характеризується найбільш інтенсивним зростанням кількості нежиттєздатних клітин – з 6 до 9 % за досліджуваний період. Натомість зразки з додаванням овочевих мас (буряка та моркви) демонструють значно менший приріст цього показника. Відповідні криві розташовані нижче контрольної, що свідчить про наявність захисного (протекторного) ефекту рослинних компонентів.

Найвищу життєздатність дріжджових клітин зафіксовано у зразках із рослинними добавками, де частка нежиттєздатних клітин наприкінці експерименту становить близько 6,8–7,3 %. Це вказує на уповільнення процесів інактивації клітин у присутності овочевих мас.

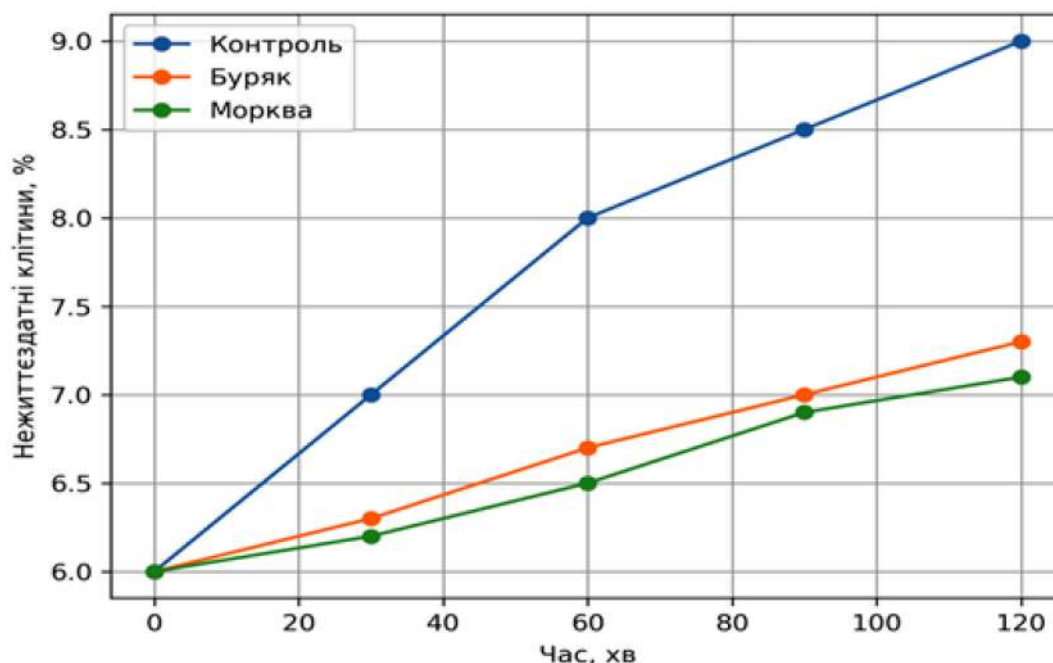


Рис. 1. Вплив овочевих мас на життєздатність дріжджових клітин

Загалом динаміка змін для всіх зразків має подібний характер, однак через 120 хв витримки контроль суттєво поступається зразкам із добавками за показником життєздатності. Отримані результати свідчать про стимулювальний вплив рослинної сировини на фізіологічний стан дріжджів, що зумовлено наявністю доступних вуглеводів, вітамінів і мінеральних речовин, які підтримують метаболічну активність клітин.

Овочеві маси виконують функцію додаткового поживного субстрату для дріжджів, забезпечуючи їх легкодоступними джерелами енергії та підтримуючи метаболічну активність клітин. Мінеральні елементи, зокрема калій, кальцій і натрій, що містяться в рослинній сировині, беруть участь в активації ферментних систем дріжджової клітини, зокрема тих, що відповідають за зброджування мальтози. Це має особливе значення для технологій виробництва хліба без використання хімічних поліпшувачів.

Крім того, рослинні компоненти підвищують стійкість дріжджів до осмотичного та механічного стресу під час замішування і вистоювання тіста [13, 14]. Активація ферментативних процесів сприяє інтенсивнішому гідролізу вуглеводів борошна (мальтози та мальтотріози), що зумовлює скорочення тривалості підйому тіста, встановлене в попередніх дослідженнях.

Для узагальнення отриманих результатів сформовано зведену таблицю 3, яка відображає порівняльну характеристику контрольного зразка та хліба з додаванням овочевих мас за основними технологічними та якісними показниками. У табл. 3 наведено результати органолептичної оцінки якості розробленого збагаченого хлібобулочного виробу. Встановлено, що рецептура не передбачає використання маргарину, а вміст доданого цукру знижено у чотири рази. При цьому необхідні реологічні властивості тіста забезпечуються за рахунок природних компонентів овочевих мас (клітковини та пектинових речовин), а також їх власної вологості.

Збільшення виходу готової продукції (з 112 до 153,5 %) пояснюється високим вмістом води в овочевій сировині, що дає змогу виключити додавання води на стадії замішування тіста.

Виключення маргарину та зменшення вмісту цукру в чотири рази підвищує харчову цінність продукту без погіршення смакових якостей. Овочеві маси виконують роль природного стимулятора дріжджів, прискорюючи процес дозрівання тіста приблизно на 30 % та підвищуючи вихід готової продукції за рахунок додаткової маси та води овочів, при збереженні

Таблиця 3

Порівняльна характеристика хлібобулочних виробів

Категорія	Показник	Контроль (без добавок)	Збагачений (морква/буряк)
Рецептура (на 100 кг борошна)	Цукор, кг	6,0	1,5
	Маргарин, кг	3,5	–
	Овочева маса, кг	–	33,2
Властивості тіста	Вміст клейковини, %	31,28	31,20
	Розтяжність клейковини, см	15,0	13,5 (зміцнення)
	Підймальна сила дріжджів	11 хв 20 с	8 хв 00 с
Якість виробу (фізико-хімічна)	Пористість, %	70	72
	Вологість, %	43,0 (max)	35,2
	Кислотність, град	3,0 (max)	2,8
Безпека та зберігання	Стійкість до картопляної хвороби	Стандартна	Висока (не виявлено)
Споживча оцінка	Смак (бали 1–5)	–	4,91
	Готовність купити продукт, %	–	97,5 %

високої пористості. Для наочності дані дослідження можна розділити на функціональні блоки: технологічні параметри сировини, рецептурний склад і характеристики готового продукту. Використання овочевих мас збагачує хліб мінералами та вітамінами (К, Р, Са, Fe, вітаміни груп В, С, РР), зміцнює структуру клейковини та активує ферменти дріжджів, що сприяє підвищенню пористості та подовженню терміну зберігання продукції.

Із табл. 3 видно, що половина опитаних оцінили зовнішній вигляд та аромат збагачених хлібобулочних виробів бальною оцінкою 5 (53,3 та 51,6 % відповідно), трохи менше половини дегустаторів (49,1 %) вважають смак продукту чудовим. Для визначення перспективи виробництва розробленого виробу дегустаторам були поставлені запитання: «Чи сподобався продукт?» та «Чи стали б Ви купувати цей продукт?». У результаті 97,5 % респондентів відповіли позитивно і лише 2,5 % – він не зацікавив. Отримані дані свідчать про високу споживчу оцінку розробленого хлібобулочного виробу та про подальшу перспективу його виробництва.

Показник у 97,5 % позитивних відповідей щодо купівлі є надзвичайно високим для інноваційного продукту з овочевими добавками. Жоден респондент не поставив низьких балів (1 або 2), що підтверджує вдаль поєднання смакових якостей навіть при значному відсотку заміни цукру та жирів овочевою масою. Використання моркви та буряка дозволило отримати продукт, який одночасно є біологічно цінним та привабливим органолептично завдяки природним пігментам (бетаніну та каротину).

На основі аналізу представлених матеріалів можна зробити наступні узагальнені висновки щодо ефективності використання овочевих мас у технології виробництва хліба:

- додавання овочевих мас призводить до зменшення розтяжності клейковини з 15,0 см до 13,5 см, що свідчить про зміцнення її структури за рахунок дисоціації органічних кислот та відновлення полімерних структур овочів;
- ідеймальна сила дріжджів покращується приблизно на 3 хвилини (з 11:20 до 8:00). Це зумовлено наявністю в овочах мінеральних речовин (К, Са, Na), які активують ферменти дріжджової клітини;
- овочеві добавки знижують кількість нежиттєздатних дріжджових клітин під час витримки порівняно з контрольним зразком, діючи як додаткове джерело енергії та нутрієнтів;
- розроблена технологія дозволяє повністю виключити з рецептури маргарин та скоротити вміст цукру в 4 рази (з 6,0 кг до 1,5 кг на 10 кг борошна);
- замішування частин кольорового тіста (рожевого, помаранчевого) проводиться без додавання води, виключно на основі овочевого соку та жмиху, що є головною відмінністю від загальноприйнятої технології;



- продукт збагачується широким спектром мінералів (Fe, Zn, Mg, P), вітамінів (C, B₁, B₆, PP, E) та природними антиоксидантами (бетаїн, -каротин);
- хліб із додаванням овочевих мас виявляє підвищену стійкість до «картопляної хвороби» (збудники *Bacillus subtilis* та *Bacillus mesentericus*), ознак якої не було виявлено навіть при про-вокуючих умовах.

Список використаних джерел

1. Raczky, M., Kruszewski, B., & Zachariasz, E. (2022). Effect of Tomato, Beetroot and Carrot Juice Addition on Physicochemical, Antioxidant and Texture Properties of Wheat Bread. *Molecules*, 27(19), 6371.
2. Домарецький В. А. Технологія харчових продуктів : підручник / В. А. Домарецький, М. Б. Шестов, Г. О. Біла. К. : НУХТ, 2003. 572 с.
3. Lafarga, T., et al. (2021). Enrichment of Wheat Bread with Vegetable Flours: Impact on Physical, Nutritional, and Sensory Quality. *Journal of Food Science and Technology*, 58(7).
4. Дробот В. І. Технологія хлібопекарського виробництва / В. І. Дробот. К. : Логос, 2002. 365 с.
5. Szpicer A., et al. Selected Consumer Behaviours in the Bread Market: Does Dietary Fibre Labelling Influence Consumer Decisions? *Nutrients*, 18(4). 2025.
6. Gawlik-Dziki U., et al. Bioactive compounds retention in vegetable-enriched bakery products: The role of fermentation. *Food Chemistry*, 395. 2023.
7. Сирохман І. В. Товарознавство харчових продуктів функціонального призначення : навч. посіб. / І. В. Сирохман, В. М. Завгородня. К. : ЦУЛ, 2009. 544 с.
8. Кравченко Р. Ю., Стадник І. Я., Піддубний В. А., Веселовська Т. Є. Вплив способів приготування тіста з додаванням квасу столового буряка на показники якості пшеничного хліба. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*, (1), 2025. 393–399. DOI: <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.1.39>
9. Кравченко Р. Ю., Стадник І. Я., Піддубний В. А., Євчук Я. В. МОДИФІКАЦІЯ БУРЯКОВОГО КВАСУ РОСЛИННОЮ СИРОВИНОЮ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ТІСТА ТА ХЛІБА. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки* 2025-03-27 | С. 246–253. DOI: [10.32782/tnv-tech.2025.1.39](https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.1.39)
10. Лабораторний практикум з технології хлібопекарського та макаронного виробництва : навч. посіб. / П. О. Писарев, В. І. Дробот та ін. К. : Центр учбової літератури, 2015. 210 с.
11. Кравченко Р., Стадник І. ВПЛИВ ВЛАСТИВОСТЕЙ КВАСУ ЗІ СТОЛОВОГО БУРЯКА НА ЯКІСТЬ ПШЕНИЧНОГО ХЛІБА «Здоров'я людини і нації» Том 3 № 1, 2025. 37–49 DOI: <https://doi.org/10.31548/humanhealth.1.2025>
12. CBI Ministry of Foreign Affairs. Europe Clean Label Ingredient Market Trends: The rise of natural stabilizers. *Market Report*. 2026.
13. Igor Stadnyk, Volodymyr Piddubnyi, Svitlana Krsnozhon, Nataliia Antoshkova. INFLUENCE OF REDUCTION ON ADHESIVE PROPERTIES. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences* vol. 14, 2020, p. 76–87. DOI: <https://doi.org/10.5219/1195>
14. Dufour C., Loonis M. Kinetics of the oxidation of lutein and zeaxanthin in a model of liquid-solid extraction. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2020. Vol. 68, № 15. P. 4456–4463.

Дата першого надходження статті до видання: 11.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 05.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)





I. Belova¹, L. Kiurcheva², V. Hidzhelitskyi³, M. Kyryliv⁴

¹ Institute of Innovation, Environmental Management and Infrastructure of the Western Ukrainian National University

² Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

³ Kyiv Cooperative Institute of Business and Law

⁴ Ternopil National Medical University named after I. Ya. Horbachevsky

IMPROVING THE TECHNOLOGY OF WHEAT BREAD BY USING PHYTOFORTIFIERS IN THE FORM OF VEGETABLE MASSES

Summary

The work substantiates the technology of production of bakery products from high-grade wheat flour using phytofortifiers in the form of crushed vegetable masses of carrots and beets. A marketing analysis of consumer preferences was conducted, physicochemical indicators of flour and gluten quality were studied, microscopic assessment of yeast cell viability was performed, as well as organoleptic assessment of finished products. It has been established that the introduction of vegetable masses (cake and juice) in a ratio of 1:3 to the mass of flour contributes to the strengthening of the gluten framework of the dough, which is manifested in a decrease in its extensibility by 10 %, and also activates the enzymatic activity of yeast. It has been shown that the lifting force of yeast increases by 28–30 % under the influence of minerals (K, Ca, Na) and vitamins contained in vegetable raw materials.

A recipe for enriched bread has been developed, which ensures the complete elimination of margarine and a fourfold reduction in the content of added sugar. The finished product is characterized by high porosity (72 %), increased microbiological resistance to the development of “potato disease” and high consumer attractiveness (97.5 % of positive ratings). The mechanism of the influence of biologically active substances of vegetable masses on yeast metabolism and structural and mechanical properties of wheat dough under kneading conditions without adding water has been substantiated. The proposed technology not only solves local problems of production intensification, but also corresponds to the international vector of food technology development “Food for Health”.

Keywords: bakery products, vegetable masses, carrots, beets, gluten, yeast lifting power, nutrient enrichment, potato disease of bread.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-31>

УДК 637.5:543:664.8

О. В. Василюшина, канд. пед. наук

ORCID: 0000-0001-9906-516X

І. Г. Власенко, д-р мед. наук

ORCID: 0000-0001-9995-2025

Вінницький торговельно-економічний інститут Державного торговельно-економічного університету

e-mail: vlasenkoirina837@gmail.com

МЕТОДИ КОНТРОЛЮ БЕЗПЕЧНОСТІ М'ЯСА ТА СПОСОБИ ЙОГО ЗБЕРЕЖЕННЯ

Анотація. В статті розглянуто сучасні методи контролю хімічної безпеки м'яса. Показано, що для забезпечення якості та безпеки м'яса використовуються системи національного та міжнародного контролю, виробничі та інтегровані системи контролю. Контроль хімічної безпеки м'яса здійснюється за допомогою сучасних лабораторних методів аналізу, що дозволяють виявляти і кількісно визначати шкідливі речовини навіть у низьких концентраціях. Наведена характеристика цих методів, їх переваги та недоліки. Показано, що найбільш точними методами визначення хімічних забруднювачів у м'ясі є хроматографічні методи у поєднанні з мас-спектрометрією. Розглянуто сучасні біохімічні способи збереження якості м'яса, які використовують біологічно активні речовини, ферменти або корисні мікроорганізми, що пригнічують розвиток шкідливих бактерій і сповільнюють псування продукту.

Ключові слова: хімічна безпека м'яса, системи контролю, хімічні забруднювачі, небезпечні речовини, методи хімічного аналізу, якість м'яса.

Вступ. Забезпечення безпеки м'яса та м'ясних продуктів є однією з пріоритетних задач держави в цілому та харчової промисловості зокрема. Контроль якості харчових продуктів є комплексним процесом. З цією метою використовуються різноманітні системи контролю якості харчових продуктів, які поділяються на національні, міжнародні, виробничі та охоплюють фізичні, хімічні, мікробіологічні та органолептичні показники продукції.

М'ясо та м'ясні продукти є важливими компонентами раціону людини, оскільки містять повноцінні білки, жири, вітаміни групи В, мінеральні речовини та інші біологічно активні компоненти. Однак м'ясна сировина є сприятливим середовищем для розвитку мікроорганізмів, тому вона може бути джерелом різноманітних небезпечних факторів. До основних ризиків належать мікробіологічні, хімічні та фізичні забруднення.

Мікробіологічна небезпека пов'язана з наявністю патогенних мікроорганізмів, таких як *Salmonella spp.*, *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli* та інші бактерії, які можуть викликати харчові отруєння. Хімічні небезпечні фактори включають залишки ветеринарних препаратів, антибіотиків, гормонів росту, пестицидів, важких металів та інших токсичних речовин. Фізичні забруднення можуть бути представлені сторонніми предметами, наприклад частинками металу або пластика.

У зв'язку з цим забезпечення безпеки м'яса та м'ясних продуктів є одним із найважливіших завдань сучасної харчової промисловості. Для досягнення цієї мети використовуються різні технологічні рішення, які дозволяють контролювати якість сировини, знижувати мікробіологічне забруднення та запобігати розвитку небезпечних мікроорганізмів під час зберігання та транспортування продукції.

Актуальність дослідження методів хімічного контролю обумовлена зростаючими вимогами до безпечності харчових продуктів, розвитком технологій їх виробництва та появою нових видів хімічних забруднювачів. Вивчення та впровадження сучасних аналітичних методів дозволяє не лише забезпечити дотримання нормативів, а й гарантувати споживачеві високу якість та безпеку м'ясної продукції.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питання визначення якості та безпечності мяса та м'ясних продуктів цікавлять багатьох вітчизняних та зарубіжних вчених. Так, в роботі Саханенко С., Нагорної І. досліджено ключові аспекти забезпечення якості та безпеки харчових продуктів в Україні на прикладі м'ясопродуктової галузі. Авторами приділено увагу практичним аспектам управління якістю на підприємствах м'ясопереробної галузі: від контролю сировини до маркування готової продукції [1]. В статті Бомба М. Я., Сусол Н. Я. проаналізовано структуру базових вимог міжнародних стандартів: BRC, IFS, FSSC 22000, ISO 22000, Global GAP, SQF до систем управління безпечністю харчової продукції, що реалізують принципи концепції НАССР [2]. В праці Котелевич В. А., Гуральської С. В., Гончаренко В. В. розглянуто актуальні проблеми якості та безпечності харчових продуктів в контексті забезпечення продовольчої безпеки в Україні. Автори наголошують, що потужності з виробництва тваринницької продукції мають проводити аналіз небезпечних чинників, що є важливими для харчової безпеки; впроваджувати ефективні процедури для дотримання меж, установлених щодо безпечності харчових продуктів, перевіряти процедури моніторингу, щоб гарантувати їх постійну ефективність [3].

Стаття Vovkotrub, V., Kowalewska, I., Czerniawska-Piátkowska, E., Iakubchak, O., Hryb, J. присвячена пошуку найбільш перспективних та оптимальних методів для подовження термінів зберігання свіжості сирого м'яса [4].

Цікавим є дослідження Резніченко М., Н.В. Ющенко, О. А. Чернюшок, де представлено способи консервування м'ясної сировини [5].

Оскільки м'ясна сировина входить до складу багатьох функціональних продуктів, то визначення її якості набуває особливої актуальності. Так, Bal-Prylypko L. V. та співавторами розроблено варену ковбасу для людей з активним способом життя. Авторами досліджено органолептичні, мікробіологічні показники якості та пероксидне число розробленої вареної ковбаси у процесі зберігання [6].

Окремі аспекти безпеки у виробництві культивованого мяса розглядає Manning L [7]. Про оцінку ризику культивованого мяса говорять у своїх публікаціях Gu, Y.; Li, X.; Chan, E. C. Y [8]. De Macedo, R. E. F. та співавтори розглядають контроль якості та можливі ризики у виробництві культивованого мяса [9].

Проте, питання визначення забруднення харчових продуктів хімічними речовинами не втрачає своєї значущості та набуває актуальності у зв'язку із забрудненням навколишнього середовища внаслідок війни.

Метою статті є розгляд сучасних методів контролю хімічної безпечності м'яса, принципів їх дії, переваг та обмежень, а також визначення найбільш ефективних підходів для лабораторного аналізу харчових продуктів.

Виклад основного матеріалу. З метою контролю якості та безпечності м'яса використовуються системи національного та міжнародного контролю. Так, у більшості країн контроль харчових продуктів здійснюється відповідно до державних стандартів (наприклад, ДСТУ, ISO, Codex Alimentarius). Такі нормативи визначають: допустимі концентрації хімічних забруднювачів; показники мікробіологічної безпечності; санітарно-гігієнічні вимоги до виробництва.

Міжнародні системи управління безпечністю харчових продуктів дозволяють запобігати потенційним загрозам безпечності (рис. 1).



Рис. 1. Системи контролю безпеки харчових продуктів

На рівні підприємств харчової промисловості контроль якості реалізується через лабораторний контроль, внутрішні аудити та системи відстеження продукції (traceability). Вхідний контроль сировини – перевірка сировини на відповідність нормативним показникам.

Сучасні підприємства все частіше використовують інтегровані системи контролю якості. Застосування інтегрованих систем дозволяє знизити ймовірність появи небезпечних продуктів на ринку, своєчасно реагувати на відхилення від нормативів, підвищити довіру споживачів до бренду.

Однією з найважливіших складових безпеки є хімічна безпека, тобто відсутність або контроль над шкідливими хімічними речовинами, що можуть потрапляти в продукцію під час вирощування тварин, переробки, зберігання або транспортування. До таких речовин відносяться залишки антибіотиків, гормонів, пестицидів, важких металів, мікотоксинів та консервантів та інших небезпечних речовин, які при перевищенні допустимих норм становлять серйозну загрозу для здоров'я людини.

Контроль хімічної безпеки м'яса здійснюється за допомогою сучасних лабораторних методів аналізу, що дозволяють виявляти і кількісно визначати шкідливі речовини навіть у низьких концентраціях. До основних груп таких методів відносять хроматографічні, спектроскопічні, імунохімічні та біосенсорні методи, кожен з яких має свої особливості, переваги та обмеження (табл. 1).

Порівняльний аналіз показує, що найбільш точними методами визначення хімічних забруднювачів у м'ясі є хроматографічні методи у поєднанні з мас-спектрометрією. Вони забезпечують високу чутливість і специфічність аналізу. Водночас імуноферментні та біосенсорні методи широко використовуються для швидкого скринінгу, оскільки дозволяють оперативно виявляти потенційно небезпечні речовини у харчових продуктах. Їх поєднання забезпечує комплексний контроль за залишками ветеринарних препаратів, токсинів і забруднювачів.

Сучасні харчові технології традиційно використовують різноманітні хімічні способи збереження якості м'яса: соління, нітритне та нітратне консервування, використання консервантів

Таблиця 1

Порівняння методів хімічного аналізу безпечності м'яса

Метод аналізу	Характеристика методу			
	принцип	речовини, що визначають	переваги	недоліки
Газова хроматографія (GC)	розділення летких компонентів суміші у газовій фазі	пестициди, леткі органічні сполуки	висока точність, хороше розділення компонентів	потрібна складна підготовка проб
Рідинна хроматографія (HPLC)	розділення компонентів у рідкій рухомій фазі	антибіотики, гормони, мікотоксини	висока чутливість і точність	висока вартість обладнання
Рідинна хроматографія з мас-спектрометрією (LC-MS/MS)	ідентифікація сполук за масою і структурою	залишки ветеринарних препаратів, токсини	дуже висока точність, визначення малих концентрацій	дуже дороге обладнання
Мас-спектрометрія (MS)	визначення молекулярної маси речовин	токсичні сполуки, метаболіти	висока специфічність	складність експлуатації
Атомно-абсорбційна спектроскопія (AAS)	поглинання світла атомами металів	важкі метали (Pb, Cd, Hg, As)	висока точність визначення металів	визначає обмежене коло речовин
Інфрачервона спектроскопія (FTIR)	аналіз поглинання інфрачервоного випромінювання	жири, білки, домішки	швидкий аналіз, мінімальна підготовка проб	нижча точність для складних сумішей
Ближня інфрачервона спектроскопія (NIR)	аналіз спектру відбитого ІЧ-випромінювання	вміст білка, жиру, води	швидкий і безреагентний метод	потребує калібрування
Імуноферментний аналіз (ELISA)	реакція антиген-антитіло	антибіотики, гормони, токсини	висока швидкість і чутливість	потрібне підтвердження іншими методами
Імунохроматографічні тести	експрес-аналіз за допомогою тест-смужок	залишки антибіотиків	швидкий результат	менша точність
Біосенсорні методи	використання біологічних сенсорів для визначення речовин	антибіотики, токсини	швидкість, портативність	метод ще розвивається

і антиоксидантів. Сучасні біохімічні способи збереження якості м'яса – це методи, які використовують біологічно активні речовини, ферменти або корисні мікроорганізми, що пригнічують розвиток шкідливих бактерій і сповільнюють псування продукту. Найпоширенішими ферментами, що використовуються з цією метою є папаїн, бромелайн, фіцин. У виробництві ковбас і ферментованих м'ясних продуктів використовують закваски молочнокислих бактерій. Їх дія пов'язана з утворенням молочної кислоти, зниженням рН продукту, пригніченням розвитку шкідливих мікроорганізмів. Отруїтися можна, як м'ясом, інфікованим патогенною мікрофлорою, так і продукцією, в якій містяться токсичні речовини. Вживаючи неякісну м'ясну продукцію, можна захворіти на ботулізм. Крім того, у необробленому м'ясі можуть міститися збудники таких захворювань, як сальмонельоз, паратифи та тиф [10].

Використання бактеріоцинів – природних антимікробних речовин (нізин, педіоцин), які виробляють деякі бактерії забезпечує знищення або пригнічення шкідливих бактерій, що сприяє подовженню терміну зберігання м'яса. Окрім того, ці речовини є безпечними для людини.

У сучасній харчовій технології застосовують натуральні рослинні екстракти (екстракт розмарину, часниковий екстракт, екстракт зеленого чаю). Ці речовини мають антиоксидантну та антимікробну дію, уповільнюють псування м'яса. Якщо порівняти ефективність хімічних методів забезпечення безпечності мяса, то найвищу антимікробну ефективність мають

нітритне консервування та харчові консерванти, тоді як антиоксиданти найбільш ефективно запобігають окисненню жирів та прогіркканню м'ясної сировини.

Висновки. Різноманітні системи контролю якості харчових продуктів забезпечують комплексний підхід до безпечності харчової продукції, поєднуючи державні стандарти, міжнародні системи та внутрішній контроль на виробництві. Особливо ефективним є інтегроване застосування лабораторного контролю, автоматизованого моніторингу та цифрових платформ, що дозволяє підтримувати високий рівень безпечності м'яса та інших продуктів харчування. Сучасні біохімічні способи дозволяють зберігати якість м'яса природним шляхом, підвищувати безпечність продукту та подовжувати термін його зберігання.

Подальші дослідження будуть спрямовані на пошук найбільш ефективних та безпечних способів обробки м'ясопродуктів для тривалого зберігання.

Список використаних джерел

1. Саханенко С., Нагорна І. Забезпечення якості та безпеки харчових продуктів на прикладі м'ясопродуктової галузі. *Теоретичні та прикладні питання державотворення*. № 33 (2025) С. 357–363.
2. Бомба М. Я., Сусол Н. Я. Основні вимоги до систем управління безпечністю харчових продуктів за міжнародними стандартами BRC, IFS, FSSC 22000, ISO 22000, GlobalGAP, SQF. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С. З. Гжицького. Серія: Харчові технології*. 2020. Т. 22, № 93. С. 18–24. DOI: <https://doi.org/10.32718/nvlvet-f9304>
2. Котелевич В. А., Гуральська С. В., Гончаренко В. В. Актуальні проблеми якості та безпечності харчових продуктів в контексті забезпечення продовольчої безпеки в Україні. *Scientific Progress & Innovations*. 2023. № 26 (1). С. 72–80.
3. Vovkotrub, V., Kowalewska, I., Czerniawska-Piątkowska, E., Iakubchak, O., & Hryb, J. (2024). Modern methods of raw meat processing to reduce microbial contamination. *Ukrainian Journal of Veterinary Sciences*, 15(3), 55–75. DOI: <https://doi.org/10.31548/veterinary3.2024.55>
4. Резніченко, М. Способи консервування м'ясної сировини М. Резніченко, Н.В. Ющенко, О. А. Чернюшок *Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті євроінтеграції: XI Міжнародна науково-технічна конференція, 7 листопада 2023р., м. Київ. Київ : НУХТ, 2023. С. 219–220.*
5. Bal-Prylypko L. V., Nikolayenko M. S., Danylenko S. H., Ustymenko I. M., Ryabovol M. V., Zhurenko D. V. Justification of technology of sausages for herodietic purpose. *Journal of Chemistry and Technologies*. 2024. No 3. P. 759–765.
6. Manning L. Responsible Innovation: Mitigating the Food Safety Aspects of Cultured Meat Production. *J. Food Sci.* 2024, 89, 4638–4659.
7. Gu, Y.; Li, X.; Chan, E.C.Y. Risk Assessment of Cultured Meat. *Trends Food Sci. Technol.* 2023, 138, 491–499.
8. De Macedo, R. E. F.; Ferreira, G. A.; Poniewas, L.; Barchiki, F.; Rebelatto, C. L. K.; Daga, D. R.; Costa, L. B.; Rosa, E. A. R. Quality and Risk Control in Cultivated Meat Production. *In Cultivated Meat; Springer Nature: Cham, Switzerland*, 2024; pp. 209–240.
9. Харчове отруєння. URL: <https://tr.cdc.gov.ua/news/harchove-otruiennya>

Дата першого надходження статті до видання: 22.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)





O. Vasylyshyna, I. Vlasenko
Vinnytsia Institute of Trade and Economics

CHEMICAL METHODS OF MEAT SAFETY CONTROL AND METHODS OF ITS PRESERVATION

Summary

The article considers modern methods of controlling the chemical safety of meat, their principle of action, advantages and limitations, and identifies the most effective approaches for laboratory analysis of food products. It is shown that to ensure the quality and safety of meat, national and international control systems, production and integrated control systems are used. The integrated use of laboratory control, automated monitoring and digital platforms is particularly effective in maintaining a high level of safety in meat and other food products. One of the most important components of safety is chemical safety. Control of the chemical safety of meat is carried out using modern laboratory analysis methods that allow the detection and quantification of harmful substances even in low concentrations. The main groups of such methods include chromatographic, spectroscopic, immunochemical and biosensor methods. The characteristics of these methods, their advantages and disadvantages are given. It is shown that the most accurate methods for determining chemical contaminants in meat are chromatographic methods in combination with mass spectrometry. They provide high sensitivity and specificity of the analysis. At the same time, enzyme-linked immunosorbent assay and biosensor methods are widely used for rapid screening, as they allow for the rapid detection of potentially hazardous substances in food products. Their combination provides comprehensive control over residues of veterinary drugs, toxins and contaminants. Modern biochemical methods of preserving meat quality are considered, which use biologically active substances, enzymes or beneficial microorganisms that inhibit the development of harmful bacteria and slow down product spoilage. Modern biochemical methods allow preserving meat quality naturally, increasing product safety and extending its shelf life.

Keywords: meat safety, control methods, chemical safety, hazardous substances, meat quality.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-32>

UDC 001.891:(664.68.016:678.746.4-035.2)(045)

Iu. Goriainova, PhD in Technical Sciences,
Associate Professor

ORCID: 0000-0003-1228-7793

O. Simakova, PhD in Technical Sciences,
Associate Professor

ORCID: 0000-0002-4432-8337

O. Bodnaruk, Assistant

V. Volkova, Higher Education Student

K. Pohoriletskyi, Higher Education Student

Kyryvi Rih National University

e-mail: goryaynova@donnuet.edu.ua

QUALIMETRIC ASSESSMENT OF THE QUALITY OF SHORT DOUGH COOKIES WITH THE ADDITION OF CHOKEBERRY AND REDUCED FAT CONTENT

Summary. The work is devoted to the qualitative assessment of the quality of “Zirochka” cookies made from shortcrust pastry with the addition of chokeberry and reduced fat content. It has been experimentally proven that the quantitative assessment of the quality of “Zirochka” shortcrust pastry using the new technology with the addition of 5 % powder from dry chokeberry berries and a 22 % lower fat content in terms of structural properties is reduced by 14.9 %, since the component that ensures dough rise and fixes the structure during baking is removed from the raw materials. The generalized safety index of shortcrust pastry samples has the following values: for cookies according to the traditional recipe – 0.512; for “Zirochka” cookies – 0.633. The quality level of “Zirochka” cookies in terms of organoleptic indicators is slightly lower than the control sample (0.86 versus 0.96), but more than 0.80 (very good quality according to the Harrington desirability function graph). The quality level of “Zirochka” cookies in terms of the content of physiologically useful substances increases by 8.6 times compared to the control sample.

Keywords: structural, microbiological, organoleptic properties, physiologically beneficial substances.

Statement of the problem. The most common group among confectionery products is flour products, which include several hundred items and are most popular among different segments of the population. Most of such products have an unbalanced mineral and vitamin composition, contain a large amount of fats and carbohydrates, which gives them a high energy value. The use of new additives, in particular, of plant origin, to improve the quality of flour confectionery products and reduce the fat content in the recipe can contribute to increasing the nutritional value of the product, reducing its energy value. There is a need to improve and develop new types of flour confectionery products that would be rich in plant fibers, biologically active substances that increase human immunity and generally play an important physiological role. The use of plant additives to improve the quality of food products is a relevant topic in our country and abroad. In recent years, chokeberry has been attracting more and more attention – a plant that is widely distributed throughout Ukraine, and its fruits are rich in carotenoids, vitamins, macro- and microelements, strengthen the walls of blood vessels, normalize intestinal function, have an antispasmodic effect, and stimulate bile production. Therefore, we believe that the use of this plant as a biologically active additive in flour confectionery products made from shortcrust pastry is promising and relevant.

Analysis of recent research. In recent years, much attention has been paid to the quality of food products in our country and abroad [1]. The problems of food quality in Ukraine are solved by

Lozova T. M., Sydorenko O. V., Kuzmin O. V., Topolnyk V. G., Samokhvalova O. V., Oliynyk S. G. and others.

Thus, a group of scientists from the Department of Commodity Science, Technologies and Quality Management of Food Products of the Lviv University of Trade and Economics are investigating the quality characteristics and safety of various food products, including raw smoked sausages, processed cheeses, bakery products, etc. [2].

Another representative of the scientific school of the Lviv University of Trade and Economics, Lozova T. M., Doctor of Technical Sciences, Professor, deals with issues of quality management and safety of flour confectionery products – muffins, wafers with phytoadditives, sugar cookies [3].

The quality indicators of finished products can be determined by various methods, including qualimetry [4].

Thus, Kuzmin O. V., Doctor of Technical Sciences from the National University of Chemical Technology developed a method for comprehensive quantitative assessment of yeast quality according to the principles of qualimetry [5], he also considered the method for assessing the quality of food rations in hotel and restaurant establishments and determined comprehensive quality indicators for the group of energy substances, minerals and vitamins [6]. Together with Ph.D. Dietrich L. V. he assessed the quality of the innovative hot sweet dish soufflé from the standpoint of the physiological needs of a preschool child's body using qualimetry methods [7].

The researchers also assessed the quality of dry multi-component milk mixtures [8] and wheat bread using oat germ meal and corn germ cake [9] using the principles of qualimetry.

The Department of Technologies in Restaurant Management, Hotel and Restaurant Business and Tourism of the Mykhailo Tugan-Baranovsky Educational and Scientific Institute of Economics and Trade of Kryvyi Rih National University constantly conducts research on improving the quality of flour confectionery products due to plant additives [10–13]. It has been proven, including with the help of qualimetry, that these additives have a positive effect on the baking properties of wheat flour, on the quality of fat in these products, improve the nutritional value, mineral composition of finished products.

Therefore, the problem of improving and determining the quality of food products remains relevant and is being solved in many directions, among which the use of qualimetry principles for calculating complex quality assessments looks particularly promising.

Formulation of the purpose of the article (task statement). The objective of this article is to determine the quality indicators of “Zirochka” cookies made from shortcrust pastry with the addition of chokeberry and reduced fat content in terms of structural-mechanical, organoleptic properties, safety, and content of physiologically beneficial substances according to the principles of qualimetry.

Main part. The quality of a food product is a set of properties that determine its ability to meet the human body's needs for energy, nutrients and flavorings, taking into account optimal physiological norms based on the concept of balanced nutrition. We studied the main groups of properties of “Zirochka” cookies made from shortcrust pastry with the addition of chokeberry and a fat content reduced by 22 % using the principles of qualimetry.

The hierarchical structure of properties that characterize the quality of the products we have developed consists of three levels. At the first level, quality is represented by four groups of properties: structural-mechanical, microbiological (safety), organoleptic, nutritional value (energy in terms of the balance of basic nutrients and biological in terms of the content of physiologically useful substances).

The group of structural-mechanical properties includes the ability to wet (P_1), %; specific volume (P_2), dm³/kg; porosity (P_3), %, which characterize the taste of cookies, its brittleness. In accordance with the methods of qualimetry, a generalized assessment of structural properties was calculated by formula 1:

$$k = \sum_{i=1}^3 m_i \cdot k_i, \quad (1)$$

where m_i, k_i – weighting coefficient and evaluation of the property indicator characterizing the quality of the object.

The quality of products improves if the value of these indicators increases. Based on this, dependence 2 was used to quantify these indicators:

$$k_i = \frac{P_i}{P_{\text{баз}}}, \quad (2)$$

where P_i – the value of the indicator for the sample being evaluated;

$P_{\text{баз}}$ – the base value of this indicator for the control sample, which is made according to the traditional composition of the recipe components.

To determine the weighting coefficients of the indicators, a method was used in which the range of variation of the values ($P_{\text{max}} - P_{\text{min}}$) was calculated. The weighting coefficients were determined by formula 3:

$$m_i = \frac{\frac{P_i^{\text{баз}}}{P_{i\text{max}} - P_{i\text{min}}}}{\sum_{i=1}^3 \left(\frac{P_i^{\text{баз}}}{P_{i\text{max}} - P_{i\text{min}}} \right)}. \quad (3)$$

The weighting coefficients were calculated by us and have the following values: wettability, $m_1 = 0.18$; specific volume, $m_2 = 0.29$; porosity, $m_3 = 0.53$. The differential and comprehensive assessment of the structural properties of the “Zirochka” cookies according to the modified recipe is given in Table 1.

Table 1
Comprehensive assessment of the structural properties of the studied shortbread cookie samples

№	Cookie sample name	Single estimates			Comprehensive assessment
		1 $m = 0,18$	2 $m = 0,29$	3 $m = 0,53$	
1	Control sample	1,00	1,00	1,00	1,00
2	With the addition of 5 % powdered dried chokeberry fruit and a 22 % reduced butter content (“Zirochka” cookies)	0,658	0,843	0,920	0,851

It was found that replacing 5 % of wheat flour with powder from dried chokeberry fruits reduces the complex of structural and mechanical properties by 14.9 %, since a component that ensures dough rising and fixes the structure during baking is removed from the raw material.

Then we established the quality indicator of the safety of cookies «Zirochka». According to the regulatory documentation for the control of the safety of food products (shortbread cookies), five indicators are provided. The requirements for two indicators have quantitative values, the requirements for three are substantive, in an alternative form.

Therefore, the mathematical model of the generalized safety indicator of shortbread cookies should have a veto function, which consists of an assessment of alternative indicators (from assessments of indicators that have an alternative nature). The generalized assessment of microbiological quality indicators of shortbread cookies samples manufactured using the developed technology was determined by formula 4:

$$K_{\text{мб}} = K_1 K_2 K_4 \sqrt{K_3 K_5}, \quad (4)$$

where $K_1 K_2 K_4$ – veto function, composed of alternative indicator estimates. K_j estimates take the value 1 (unit) if the requirements of regulatory documents are met and the value 0 (zero) if the requirements of regulatory documents are not met;

$K_3 K_5$ – estimates of quantitative indicators.



To assess microbiological indicators, we used the following relationship 5:

$$K_i = 1,37 - \frac{\lg P_i}{\lg P_n}, \quad (5)$$

where P_i – is the value of the indicator of the sample being evaluated;

P_n – is the normalized value of the indicator.

With the value $P_i = P_n$, the score determined according to this dependence has a value of 0.37, which, according to the theoretical principles of qualimetry, corresponds to the score “satisfactory”, that is, the products meet the requirements of regulatory documentation with a unilateral restriction of the indicator values.

In accordance with the data on the microbiological characteristics of the developed cookies, the generalized safety index of these samples has the following values: for cookies according to the traditional recipe – 0.512; for cookies “Zirochka” – 0.633.

The evaluation of organoleptic indicators was calculated using formula 6:

$$K = \exp^{-\exp|y|}, \quad (6)$$

where K – is the score;

y – is the value being coded.

The general and comprehensive organoleptic evaluation of shortcrust pastry products with chokeberry additives is given in Table 2:

Table 2

Quantitative evaluation of organoleptic parameters

№	Cookie sample name	Overall organoleptic assessment, score	Comprehensive assessment
1	Control sample	19,10	0,96
2	With the addition of 5 % powdered dried chokeberry fruit and a 22 % reduced butter content (“Zirochka” cookies)	17,55	0,86

As can be seen from the data in this table, the quality level of shortcrust pastry products with chokeberry additives in terms of organoleptic indicators is slightly lower than the control sample, but the value of the complex assessment of the developed sample is more than 0.80 (very good quality according to the Harrington desirability function graph).

The introduction of powder from dried chokeberry fruits into the shortcrust pastry recipe leads to the enrichment of the food product with physiologically useful substances, which increases its nutritional value. Table 3 shows data on the content of carotenoids, phenolic substances, and fiber in “Zirochka” cookies.

Table 3

The content of physiologically beneficial substances in shortbread cookie samples

№	Cookie sample name	Substance content		
		Carotenoids, mg/100 g	Phenolic substances, %	Cellulose, %
1	Control sample	0,08	–	0,05
2	With the addition of 5 % powdered dried chokeberry fruit and a 22 % reduced butter content (“Zirochka” cookies)	0,26	0,26	0,45

For a comprehensive quantitative assessment of the quality of products by the content of physiologically useful substances, it is necessary to convert the absolute values of nutritional value

indicators into relative ones. For this assessment of single quality indicators, we propose to calculate the average value according to the range established in the study:

$$P_i^{\delta a3} = \frac{\sum P_i}{n}. \quad (7)$$

The base value for carotenoids is 0.170; phenolic substances – 0.135; cellulose – 0.224. To determine the weighting factors of the indicators, a calculation method was used, the essence of which is the inverse dependence of the weighting factor value on the base value of the indicator, namely: the weighting factor is the greater, the smaller the value of the base indicator:

$$m_i = \frac{\frac{1}{P_i^{\delta a3}}}{\sum \left(\frac{1}{P_i^{\delta a3}} \right)} = \frac{\frac{\sum P_i^{\delta a3}}{P_i^{\delta a3}}}{\sum \left(\frac{\sum P_i^{\delta a3}}{P_i^{\delta a3}} \right)}. \quad (8)$$

Sum of base values $\sum P_i^{\delta a3} = 0,170 + 0,135 + 0,224 = 0,529$

$$\sum \left(\frac{\sum P_i^{\delta a3}}{P_i^{\delta a3}} \right) = \frac{0,529}{0,170} + \frac{0,529}{0,135} + \frac{0,529}{0,224} = 9,393.$$

Weighting coefficients: carotenoids $m_{car} = 0.529/0.170/9.393 = 0.331$ (we took $m_{car} = 0.33$); phenolic substances $m_{p.s.} = 3.919/9.393 = 0.417$ (we took $m_{p.s.} = 0.42$); cellulose $m_c = 2.362/9.393 = 0.252$ (we took $m_c = 0.25$).

Table 4 shows the relative values (scores) of single indicators and the complex quality indicator of products by the content of physiologically useful substances, calculated according to formula 1, as well as the value of the complex indicator in comparison with the control sample, which shows an increase in the nutritional value of “Zirochka” cookies.

Table 4

Quantitative assessment of the quality of shortcrust pastry products by the content of physiologically beneficial substances

№	Cookie sample name	Single estimates			Comprehensive assessment	Comprehensive comparative assessment
		Carotenoids	Phenolic substances	Cellulose		
1	Control sample	0,471	0	0,223	0,211	1,0
2	With the addition of 5 % powdered dried chokeberry fruit and a 22 % reduced butter content (“Zirochka” cookies)	1,529	1,926	2,009	1,816	8,607

As you can see, the quality level of “Zirochka” cookies prepared by replacing part of the recipe components with powder from dried chokeberry fruits and with reduced fat content increases by 8.6 times in terms of the content of physiologically beneficial substances.

Conclusions. The method of qualimetry established quantitative indicators of the quality of shortbread cookies “Zirochka” with the addition of chokeberry and reduced fat content for different

groups of properties – structural-mechanical, safety, organoleptic, physiologically useful substances. The feasibility of using the addition of powder from dry chokeberry berries to increase the nutritional value of the developed products has been proven.

The prospects for further research in this direction are the calculations of a comprehensive quantitative assessment of the quality of shortbread cookies «Zirochka» using a new technology.

Bibliography

1. Про основні принципи та вимоги до безпечності та якості харчових продуктів: Закон України від 22.07.2014 р. № 771 зі змінами. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/771/97-%D0%B2%D1%80#Text>
2. Лозова Т. М., Сирохман І. В. Наукове обґрунтування поліпшення споживних властивостей борошняних кондитерських виробів з використанням природної нетрадиційної сировини: монографія. Львів : ЛТЕУ, 2017. 328 с.
3. Lozova T. Modern approaches improve consumer properties and quality of confectionery products with consideration of their security / Lozova T., Syrohman I., Reshetylo L. Sciences of Europe (Praha, Czech Republic). *Technical sciences*. 2020. № 47. Vol. 1. PP. 50–56.
4. Топольник В. Г. Управління якістю продукції та послуг в готельно-ресторанному господарстві: навч. посіб. Львів : Магнолія – 2006, 2012. 328 с.
5. Кузьмін О. В., Шулак М. Я., Романченко Н. М. Методика визначення комплексного показника якості дріжджів. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*. № 3(43), 1 т., 2018. С. 68–73.
6. Кузьмін О. В., Вовк Г. М., Гребонос К. І., Радькевич С. М., Роман Т. О. Дослідження якості раціонів харчування. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*. 2018. № 12. С. 47–56.
7. Михайленко В. М., Кузьмін О. В., Дітріх І. В. Комплексна оцінка якості гарячої солодкої страви суфле. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*. 2018. Т. 1, № 4 (44). С. 54–59.
8. Мінорова А. В., Крушельницька Н. Л., Рудакова Т. В., Моїсєєва Л. О., Наріжний С. А. Оцінка якості сухих молочних багатокомпонентних сумішей на принципах кваліметрії. *Food resources*. Vol. 8 (2020) № 15. С. 139–150. DOI: <https://doi.org/10.31073/foodresources2020-15-15>
9. Степанькова Г. В., Олійник С. Г., Шидакова-Каменюка О. Г. Кваліметрична оцінка якості хліба пшеничного з використанням шроту зародків вівса та макухи зародків кукурудзи. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. 2019. Т. 25. № 1. С. 233–242. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npnukht_2019_25_1_24
10. Simakova O., Korenets Yu., Yudina T., Nazarenko I., Goriainova Iu. (2018). Examining a possibility of using purple amaranth in the technology for products made of yeast dough. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 2, issue 11 (92), pp. 57–64. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.127173
11. Горайнова Ю. А., Сімакова О. О., Кучма А. Ю., Мороз В. О. Технологія виробів із пшеничного борошна лікувально-профілактичного призначення із використанням шовковиці. Обладнання та технології харчових виробництв. Кривий Ріг: ДонНУЕТ, 2020. Вип. 2 (41). С. 12–18.
12. Сімакова О. О., Никифоров Р.П. Розробка новітніх технологій виробів з борошна з заданими властивостями: монографія. Кривий Ріг : ДонНУЕТ. 2018. 146 с.
13. Korenets Yu., Goriainova Yu., Nykyforov R., Nazarenko I., Simakova O. (2017) Substantiation of feasibility of using black chokeberry in the technology of products from shortcake dough. *Eastern European Journal of Enterprise technologies. Technology and equipment of food production*. Vol. 2, no. 10 (86). pp. 25–31. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.98409

Дата першого надходження статті до видання: 22.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 26.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)





Ю. Горяйнова, О. Сімакова, О. Боднарук, В. Волкова, К. Погорілецький
Криворізький національний університет

КВАЛІМЕТРИЧНА ОЦІНКА ЯКОСТІ ПЕЧИВА З ПІСОЧНОГО ТІСТА З ДОБАВКОЮ ЧОРНОПЛІДНОЇ ГОРОБИНИ І ЗНИЖЕНИМ ВМІСТОМ ЖИРУ

Анотація

Робота присвячена проведенню кваліметричної оцінки якості печива «Зірочка» з пісочного тіста за новою рецептурою – з добавкою чорноплідної горобини і зниженим вмістом жиру. Плоди чорноплідної горобини висушувалися, подрібнювалися в порошок. Раніше встановлена оптимальна кількість добавки – 5 % від маси пшеничного борошна. Вміст вершкового масла зменшили на 22 % від необхідного за рецептурою пісочного тіста.

Ієрархічна структура властивостей, що характеризують якість розробленої нами продукції, складається з трьох рівнів. На першому рівні якість представлена чотирма групами властивостей: структурно-механічні, мікробіологічні (безпеки), органолептичні, харчова цінність (енергетична за збалансованістю основних харчових речовин і біологічна за вмістом фізіологічно корисних речовин).

В групу структурно-механічних властивостей входять здатність до намокання (P_1), %; питомий об'єм (P_2), $\text{дм}^3/\text{кг}$; пористість (P_3), %, які характеризують смак печива, його крихкість. Експериментально доведено, що кількісна оцінка якості пісочного печива «Зірочка» за новою технологією за структурними властивостями знижується на 14,9 %, оскільки з сировини вилучається компонент, що забезпечує під'йом тіста та закріплює структуру при випіканні.

В той же час узагальнений показник безпеки зразків пісочного печива має значення: для печива за традиційною рецептурою – 0,512; для печива «Зірочка» – 0,633.

Також рівень якості печива «Зірочка» щодо органолептичних показників декілька нижче за контрольний зразок (0,86 проти 0,96), але більше ніж 0,80 (дуже добра якість згідно з графіком функції бажаності Харрінгтона).

Уведення в рецептуру пісочного тіста порошку з сухих плодів чорноплідної горобини призводить до збагачення харчового продукту фізіологічно корисними речовинами, що підвищує його харчову цінність. Рівень якості печива «Зірочка» за вмістом фізіологічно корисних речовин підвищується в 8,6 рази в порівнянні з контрольним зразком.

Ключові слова: структурні, мікробіологічні, органолептичні властивості, фізіологічно корисні речовини.



С. Л. Колесніченко, канд. техн. наук

ORCID: 0009-0006-1162-2720

Одеський національний технологічний університет

e-mail: svetlanalk@ukr.net

ПРИКЛАДНЕ ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ПІДПРИЄМСТВ РЕСТОРАННОГО ГОСПОДАРСТВА

Анотація. У статті здійснено аналітичний огляд програмних засобів, призначених для автоматизації технологічних процесів на підприємствах ресторанного господарства. Зазначено, що розроблення рецептур фірмових страв, а також продукції превентивного й лікувально-профілактичного призначення традиційно потребує використання значної кількості інгредієнтів. У зв'язку з цим обґрунтовано доцільність застосування інформаційних технологій і сучасного програмного забезпечення з метою оптимізації технологічних розрахунків у процесі проектування багатокомпонентних харчових систем із заданими характеристиками, зокрема харчовою, енергетичною та біологічною цінністю, а також мінімальною собівартістю.

Аналіз ринку прикладного програмного забезпечення для підприємств ресторанного господарства проведено на прикладі таких програмних продуктів, як as Poster, Skyservice, Vector, ULTRA. Встановлено, що зазначені програмні засоби орієнтовані на впровадження елементів систем управління якістю та безпечністю харчової продукції. Вони забезпечують оперативне та якісне формування нормативно-технологічної документації відповідно до функціонального призначення, а також своєчасне інформаційне супроводження всіх етапів технологічного процесу, що створює передумови для ефективного управління якістю продукції.

Доведено, що автоматизація технологічних процесів у харчових виробництвах сприяє підвищенню якості готової продукції, забезпеченню її мікробіологічної безпеки та зростанню конкурентоспроможності підприємств. Наголошено, що під час прийняття рішень щодо впровадження прикладного програмного забезпечення важливим є обґрунтований вибір системи автоматизації з урахуванням специфіки діяльності підприємства.

Ключові слова: програмне забезпечення, автоматизоване проектування AutoCAD, технології ресторанного господарства.

Постанова проблеми. У сучасних умовах розвитку сфери харчування ефективне управління рестораном неможливе без використання спеціалізованого програмного забезпечення. Автоматизація дозволяє оптимізувати бізнес-процеси, підвищити якість обслуговування клієнтів, забезпечити точний облік ресурсів та оптимізувати звітність. Для розвитку ресторанного господарства важливу роль відіграють автоматизовані інформаційні системи, які забезпечують ефективність як на етапі створення закладу, так і в процесі його щоденної діяльності.

Особливої актуальності набуває використання саме українських програмних продуктів, які відповідають національному законодавству та забезпечують локальну підтримку підприємства.

Аналіз останніх досліджень. Сучасні дослідження свідчать, що прикладне програмне забезпечення (ППЗ) є ключовим інструментом підвищення ефективності діяльності підприємств ресторанного господарства [3]. Найбільш поширеними є POS-системи, CRM-рішення, ERP-системи та аналітичні платформи, які забезпечують автоматизацію обслуговування клієнтів, облік ресурсів і підтримку управлінських рішень [4]. Важливою тенденцією є трансформація POS-систем у комплексні платформи, що поєднують функції обліку, маркетингу та аналітики [4].

Останні наукові праці підкреслюють активне впровадження хмарних технологій, які забезпечують доступність даних у режимі реального часу та знижують витрати на IT-інфраструктуру [5]. Крім того, значного поширення набувають технології штучного інтелекту, що використовую-

ються для прогнозування попиту, оптимізації запасів і персоналізації обслуговування клієнтів [6]. Також важливим напрямом є інтеграція онлайн-сервісів (мобільних додатків, QR-меню, служб доставки), що дозволяє формувати омніканальну модель бізнесу [5]. Омніканальна модель бізнесу – це підхід, за якого компанія інтегрує всі канали взаємодії з клієнтом у єдину систему, щоб забезпечити безперервний і узгоджений досвід незалежно від того, де і як клієнт контактує з бізнесом.

Разом із перевагами впровадження ППЗ існують і певні проблеми, зокрема висока вартість впровадження, складність інтеграції систем та необхідність навчання персоналу [4]. Але водночас результати досліджень підтверджують, що комплексна цифровізація ресторанного бізнесу сприяє підвищенню прибутковості, зниженню витрат і покращенню якості обслуговування клієнтів [7].

Метою даної статті є огляд українського програмного забезпечення для ресторанів, аналіз його функціональних можливостей та визначення ролі у підвищенні ефективності діяльності закладів ресторанного харчування.

Основна частина. На етапі планування та проектування підприємства ресторанного господарства доцільно застосовувати автоматизовану програму AutoCAD. За допомогою цієї програми можна створювати точні креслення приміщень, розробляти планування кухні, обіднього залу, барної зони, а також моделювати інженерні комунікації – вентиляцію, електропостачання та водопостачання. Це дозволяє оптимально організувати простір, забезпечити зручність роботи персоналу та дотримання санітарно-гігієнічних норм.

Система AutoCAD – потужний інструмент автоматизованого проектування, який широко використовується в різних галузях, зокрема й у ресторанному бізнесі. Водночас AutoCAD не використовується у повсякденній діяльності ресторану. Для щоденного управління закладом застосовуються спеціалізовані системи, що забезпечують прийом і обробку замовлень, проведення оплат, облік продажів, контроль роботи персоналу та формування звітності. Такі системи є ключовими для ефективного функціонування ресторану, оскільки автоматизують основні бізнес-процеси та підвищують швидкість обслуговування клієнтів. Крім того, важливу роль відіграють комплексні системи управління ресурсами, які дозволяють контролювати запаси продуктів, аналізувати фінансові показники та планувати діяльність підприємства. Вони допомагають керівникам приймати обґрунтовані управлінські рішення та підвищувати рентабельність бізнесу [1,2].

Програмне забезпечення для ресторанів (POS-системи) – це комплекс цифрових інструментів, які забезпечують автоматизацію основних процесів повсякденної діяльності закладу. До таких процесів належать:

- приймання та обробка замовлень;
- облік товарів і сировини;
- фінансовий контроль;
- аналітика діяльності;
- управління персоналом.

Використання таких систем дозволяє значно зменшити вплив людського фактору, підвищити швидкість обслуговування та забезпечити прозорість бізнес-процесів.

POS-система являє собою спеціалізоване програмне забезпечення, яке забезпечує ведення складського та фінансового обліку, здійснення аналітичних операцій, управління персоналом та координацію інших операційних процесів.

Зазначено, що для різних форматів підприємств визначальними є окремі функціональні можливості системи. Зокрема, поряд із базовим функціоналом може виникати потреба у впровадженні додаткових сервісів, таких як бронювання столиків, використання QR-меню, відо-

браження замовлень на інформаційних табло або забезпечення цілодобової технічної підтримки. Вибір відповідної POS-системи безпосередньо впливає не лише на точність облікових операцій, але й на загальну ефективність функціонування закладу. У зв'язку з цим виокремлено ключові критерії оцінювання програмного забезпечення, серед яких: рівень фіскалізації, можливості інтеграції, підтримка міграції даних, вартість обладнання, а також якість технічної підтримки та навчання персоналу.

Особливу увагу приділено питанням фіскалізації та відповідності нормативно-правовим вимогам. Підкреслено необхідність забезпечення сумісності облікової системи з чинним законодавством і її повної інтеграції із сертифікованими програмними реєстраторами розрахункових операцій (ПРРО). Це гарантує легітимність господарської діяльності, формування та видачу фіскальних чеків, а також передачу відповідних даних до податкових органів. Важливим є також врахування сумісності з провайдерами фіскалізації, що впливає на швидкість обміну інформацією, стабільність формування чеків і надійність зв'язку із серверами податкових органів. У разі втрати інтернет-з'єднання система повинна передбачати можливість функціонування в автономному режимі. Додатково доцільно оцінювати функціональні характеристики фіскального модуля, зокрема здатність обслуговувати кілька кас, підтримку автоматичних оновлень і можливість архівування фіскальних документів.

Визначено, що вартість використання POS-системи формується залежно від обраної моделі підписки, обсягів реалізації продукції, а також наявності додаткових інтеграцій і модулів, і може варіюватися у широкому діапазоні. Сукупні витрати на впровадження системи обліку, як правило, включають такі складові: оплату підписки або додаткових функціональних модулів; транзакційні комісії за обробку операцій; витрати на придбання технічного обладнання (POS-термінали, чекові принтери, сканери тощо); витрати на впровадження системи та навчання персоналу; забезпечення технічної підтримки; а також витрати, пов'язані з міграцією даних, включаючи перенесення історії продажів, товарних каталогів і клієнтської інформації.

Загальний рівень витрат підприємства визначається низкою чинників, серед яких: кількість касових вузлів і локацій, формат оплати (підписка або разові платежі), рівень розширеного функціоналу (зокрема використання кухонних дисплеїв), тип і бренд програмного продукту, а також наявність інтеграцій і додаткових модулів.

Poster POS визначається як одна з найбільш поширених систем автоматизації закладів харчування в Україні [8]. Вона функціонує у хмарному середовищі, що забезпечує відсутність потреби у складному встановленні та спрощує процес її впровадження. **Poster** є українською системою обліку для підприємств ресторанного господарства, яка функціонує на ринку України та за його межами понад 12 років. Система орієнтована на підприємства малого, середнього та великого бізнесу, зокрема кав'ярні, пекарні, піцерії, кальянні, ресторани, мережеві заклади, служби доставки та роздрібні магазини. Poster являє собою комплексне рішення для управління ресторанним бізнесом, що інтегрує функціональні модулі CRM, онлайн-каси, складського обліку, фінансового менеджменту та аналітики.

До основних функціональних можливостей системи належать: ведення касових операцій, здійснення складського обліку, формування аналітичної звітності, використання CRM-інструментів для взаємодії з клієнтами, а також інтеграція з сервісами доставки. Завдяки універсальності система може ефективно застосовуватися як у невеликих, так і у великих закладах ресторанного господарства. Ключові можливості цього програмного продукту включають забезпечення повного складського обліку та проведення інвентаризації, що реалізується через автоматизоване списання інгредієнтів, формування актів переробки та моніторинг залишків із відповідними сповіщеннями. Додатково впроваджено інструменти автоматизації обробки фінансових документів, зокрема завантаження банківських виписок і первинних документів.

Система також передбачає функціонування зручного касового модуля з підтримкою фіскалізації, можливістю використання мобільного інтерфейсу офіціанта, управлінням доставкою та інтеграцією з агрегаторами замовлень. Аналітичний блок включає інструменти фінансового аналізу, зокрема формування звітів, імпорт банківських виписок та контроль змін.

Вартість використання системи обліку починається від 540 грн на місяць. У базовий пакет послуг входить цілодобова технічна підтримка та можливість безкоштовного тестового використання протягом 15 днів. Для мережевих підприємств передбачено окремий функціональний модуль Poster Connect, який забезпечує централізоване управління меню, даними та підтримку багатоточкової структури бізнесу.

xPOS Ho.Re.Ca. SYSTEM – програмний продукт, що використовується в ресторанній сфері протягом тривалого часу. Це рішення часто обирають для класичних ресторанів і закладів із усталеними процесами [12].

Основними характеристиками є: відповідність українському законодавству; підтримка різних форматів закладів; стабільність роботи; можливість інтеграції з обладнанням.

Skyservice є програмним рішенням для автоматизації діяльності підприємств ресторанного господарства, закладів громадського харчування, служб доставки та об'єктів роздрібною торгівлі, орієнтованим переважно на суб'єкти малого та середнього бізнесу з можливістю централізованого управління мережею закладів. Система характеризується кросплатформеністю та може функціонувати на операційних системах Windows, macOS, Linux, а також на мобільних пристроях під управлінням iOS та Android. Водночас встановлено, що за відсутності інтернет-з'єднання система не забезпечує фіскалізацію розрахункових операцій.

До ключових функціональних можливостей Skyservice належать модулі складського обліку та інвентаризації, які забезпечують контроль залишків у режимі реального часу. Користувачам надається можливість гнучкого налаштування меню, управління правами доступу персоналу, а також формування різноманітної звітної документації. Аналітичний функціонал системи дозволяє здійснювати моніторинг і аналіз обсягів продажів, касових змін, а також ідентифікувати найбільш популярні позиції меню.

Зазначено, що Skyservice функціонує на основі підпискової моделі та пропонує декілька тарифних планів, диференційованих залежно від типу бізнесу, зокрема для магазинів, пекарень, невеликих закладів, ресторанів, барів, мережевих підприємств, супермаркетів, франчайзингових структур і сервісних закладів. Вартість користування системою для магазинів, пекарень і малих закладів починається від 360 грн на місяць за одну торгову точку та одне касове місце.

POS Vector є українською компанією-інтегратором, що спеціалізується на впровадженні систем автоматизації в діяльність підприємств [6]. Основними напрямками її діяльності є підбір оптимального програмного забезпечення відповідно до потреб бізнесу, встановлення та налаштування POS-обладнання, організація навчання персоналу, а також забезпечення технічної підтримки. POS Vector – спеціалізована програма для автоматизації ресторанів, кафе, барів, магазинів та кіосків. Вона оптимізує касові операції, складський облік, дозволяє створювати технологічні карти, вести базу клієнтів та інтегрувати ПРРО (програмний РРО). Програма працює на Windows та Android, пропонуючи хмарну аналітику.

Syrve – програмне забезпечення для обліку та автоматизації ресторанного бізнесу, а саме для розширення комунікації між кухнею та залом, дає аналітику по гостях та їх вподобаннях (заказах), попереджає махінації з боку персоналу тощо. Система орієнтована на ресторани, кафе, служби доставки та мережеві бізнеси.

ULTRA – це програма для автоматизації обліку в ресторанах, торгівлі, готелях та фітнес-центрах. Компанія працює понад 20 років, а рішення орієнтоване на середній та великий сег-

мент HoReCa. Програма дозволяє використовувати сучасне спеціалізоване обладнання та інтегрувати його з програмою для ефективного управління бізнес-процесами.

Програма має такі ключові можливості: управління рецептурами та складом із автоматичним списанням інгредієнтів та контролем витрат; бек-офіс із аналітикою, налаштуванням прав доступу та управлінням меню; підтримку мережевих структур із можливістю масштабування та централізованого контролю.

Висновки. Таким чином, автоматизація ресторанного господарства для обслуговування клієнтів забезпечує оперативне приймання замовлень, їх передачу на виробництво (кухню) та формування розрахункових документів. Це сприяє скороченню часу обслуговування споживачів і мінімізації ймовірності виникнення помилок у процесі виконання замовлень.

У сфері обліку та складського управління автоматизовані системи забезпечують списання інгредієнтів відповідно до технологічних карт, контроль залишків сировини та матеріалів, а також проведення інвентаризаційних процедур. Це дозволяє підвищити точність облікових операцій і ефективність використання ресурсів. Фінансовий контроль реалізується шляхом використання програмного забезпечення, що забезпечує формування звітності щодо доходів і витрат, контроль касових операцій та оцінювання рівня рентабельності діяльності підприємства.

Автоматизація управління персоналом передбачає здійснення контролю трудової діяльності працівників, облік робочих змін, а також аналіз продуктивності праці, що сприяє підвищенню ефективності використання трудових ресурсів.

Інтеграція з онлайн-сервісами замовлення та доставки забезпечує розширення каналів реалізації продукції, що, у свою чергу, сприяє зростанню обсягів продажу та підвищенню прибутковості підприємства. Використання вітчизняних програмних продуктів має низку переваг, зокрема: відповідність чинним вимогам законодавства України; наявність українського інтерфейсу; відносно доступну вартість; можливість оперативного отримання технічної підтримки; а також зниження залежності від іноземних програмних рішень.

Список використаних джерел

1. An Excellent History of CAD [Електронний ресурс]. URL: <https://www.cweb.com/an-excellent-history-of-cad/> (дата звернення: 11.04.2025).
2. Omura G., Benton B. C. Installing and Setting Up AutoCAD. *Mastering AutoCAD and AutoCAD LT*. – 1st ed. [Електронний ресурс]. URL: <https://journals.indexcopernicus.com/search/article?articleId=2336064> (дата звернення: 10.04.2025).
3. Бондаренко О. В. Цифровізація ресторанного бізнесу в умовах сучасної економіки. *Економіка та суспільство*. 2024. № 58. URL: <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/7050>
4. Кравченко М. О. Автоматизація підприємств ресторанного господарства на основі сучасних інформаційних систем. *Наукові праці КНТУ*. 2025. URL: <https://dspace.kntu.kr.ua/items/154d5ebf-d269-4a65-a24f-4e9ba2ef62e3>
5. Restaurant Industry Trends and Technology Adoption. *arXiv*. 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2501.03862>
6. Artificial Intelligence in Food Service Management. *arXiv*. 2024. URL: <https://arxiv.org/abs/2402.10725>
7. Дослідження ресторанного ринку України. *Vector Media*. 2025. URL: <https://vctr.media/ua/na-skilky-vpala-vidviduvanist-ta-vyruchka-rezultaty-doslidzhennya-restorannogo-rynku-314196/>
8. Poster POS : офіційний сайт [Електронний ресурс]. URL: <https://joinposter.com/ua> (дата звернення: 15.02.2026).
9. Poster POS. Блог про автоматизацію ресторанів [Електронний ресурс]. URL: <https://joinposter.com/ua/blog> (дата звернення: 25.02.2026).
10. xPOS Ho.Re.Ca. SYSTEM [Електронний ресурс]. URL: <https://xpos.ua/> (дата звернення: 17.02.2026).
11. POS Vector [Електронний ресурс]. URL: <https://www.pos-vector.net/> (дата звернення: 15.02.2026).
12. xPOS Ho.Re.Ca. SYSTEM – українське рішення [Електронний ресурс]. URL: <https://xpos.ua/ua/> (дата звернення: 25.02.2026).



13. POS Vector – автоматизація ресторанів [Електронний ресурс]. URL: <https://miisoft.com.ua/product/pos-vector/> (дата звернення: 12.02.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 10.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



S. Kolesnichenko
Odessa National Technological University

APPLICATION SOFTWARE FOR RESTAURANT ENTERPRISES

Summary

The article provides an analytical review of software tools designed to automate technological processes at restaurant enterprises. It is noted that the development of recipes for specialty dishes, as well as products for preventive and therapeutic purposes, traditionally requires the use of a significant number of ingredients. In this regard, the feasibility of using information technologies and modern software to optimize technological calculations in the process of designing multi-component food systems with specified characteristics, in particular nutritional, energy and biological value, as well as minimal cost, is substantiated.

The analysis of the market for applied software for restaurant enterprises is carried out using the example of such software products as Poster, Skyservice, Vector, ULTRA. It is established that these software tools are focused on the implementation of elements of food quality and safety management systems. They provide prompt and high-quality formation of regulatory and technological documentation in accordance with the functional purpose, as well as timely information support for all stages of the technological process, which creates the prerequisites for effective product quality management.

It is proven that automation of technological processes in food production contributes to improving the quality of finished products, ensuring their microbiological safety and increasing the competitiveness of enterprises. It is emphasized that when making decisions on the implementation of applied software, it is important to make a well-founded choice of the automation system, taking into account the specifics of the enterprise's activities.

Keywords: software, AutoCAD automated design, restaurant technology.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-34>

УДК 664.6/.7:663.8

К. В. Костецька¹, канд. с.-г. наук, доцент
С. М. Ковтун-Водяницька², канд. біол. наук
О. В. Коломієць¹, здобач вищої освіти

ORCID: 0000-0003-2387-5400
ORCID: 0000-0002-2367-461X
ORCID: 0009-0008-7904-4685

¹ Уманський національний університет² Національний ботанічний сад ім. М. М. Гришка НАН України

e-mail: kostetskakateryna@gmail.com

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ ХЛІБА ПШЕНИЧНОГО ЗА ВИКОРИСТАННЯ ПРОДУКТІВ ПЕРЕРОБЛЕННЯ ГІРЧИЦІ

Анотація. Останніми роками підвищився інтерес до можливості використання побічний продукт виробництва олії. Медою досліджень було оцінити борошно з макухи гірчиці двох видів: білої та сарептської, включивши їх до рецептури хліба пшеничного. Використовували борошно з висушеної макухи, замінивши борошно пшеничне вищого сорту у рецептурі хліба у кількості 3, 5, 10 та 15 %. Зразки хліба вивчали за технологічними характеристиками за стандартними методиками. Використання добавок зменшує пористість хліба пшеничного, уповільнює процес бродіння через зниження вмісту клейковини та кислотності тіста та сприяє зростанню показника вологості мякушки. При використанні борошна з гірчиці пористість виробів поступалась контрольному зразку лише на 1–3 %, а кислотність – на 4–11 %. Отже, дослідження властивостей макухи гірчичної шляхом додавання її у вигляді борошна до рецептури хлібобулочних виробів є перспективним.

Ключові слова: гірчиця, макуха, борошно пшеничне, рецептура, якість хліба.

Постановка проблеми. Дослідницькі технології у харчовій промисловості нині зосередженні концепції безвідходності. Виробництво передусім зосереджене на утилізації продуктів перероблення рослинних харчових продуктів, проте, такі побічні продукти є перспективним джерелом поживних чи технологічних властивостей, і можуть бути вивчені як джерело функціональних інгредієнтів [1]. Існують дослідження щодо потенціалу для повторного використання продуктів перероблення в різних харчових продуктах [2]. Відходи можуть бути перероблені або ж повторно використані в інших галузях. Харчові відходи, які утворюються у процесі виробництва, можна перетворити на корм для тварин [3].

Хліб є складовою щоденного раціону харчування людини. Попит на хлібобулочні вироби зростає з кожним роком на 10 % [4]. Оскільки хліб пшеничний за хімічним складом недостатньо збалансований, виготовлення його з оздоровчими чи профілактичними властивостями є важливою проблемою сьогодення.

Для посилення оздоровчих властивостей і підвищення корисності хлібобулочних виробів, важливо вводити до їхньої рецептури сировину, що містить фізіологічні та функціональні інгредієнти. Саме такою сировиною може бути насіння гірчиці білої та сарептської, а також продукт їхнього перероблення – макуха.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основними інгредієнтами хліба є вода та борошно пшеничне. Хліб може містити інші інгредієнти, залежно від свого типу, наприклад дріжджі, сіль, цукор, олія тощо. Хліб не лише корисний але й має недоліки для здоров'я, про які споживач почав усвідомлювати. Це вплив на серцево-судинні захворювання, целіакію, ожиріння [5, 6]. Споживання хлібобулочних виробів також пов'язане з підвищенням глікемічного індексу, як наслідок, ризику цукрового діабету 2 типу і раку жовчечивідних шляхів [7–9].



Щоб подолати небажаний вплив спожитого борошна пшеничного на організм людини, тенденція здорового харчування зміщується у бік споживання більш здорових і якісних продуктів. Цей факт робить виклик для хлібопекарської промисловості, що переживає складність виробництва хліба з поліпшеними органолептичними і харчовими властивостями [10].

Збагачення хліба побічними продуктами харчової промисловості – це хороший спосіб виробництва функціональних продуктів, що містять біоактивні речовини, такі як харчові волокна, антиоксиданти, вітаміни та мінерали, а також це може мати позитивний вплив для навколишнє середовище [11, 12].

Гірчиці існує біля 10 видів і ще більше різновидів. В Україні вирощують біля чотирьох відсотків світового обсягу гірчиці. Сучасні сорти у складі часто не містять ерукової кислоти. Насіння гірчиці є сировиною для виробництва олії, так як містить до 50 % гірчичної олії, що вирізняється високими смаковими властивостями та використовується в кондитерській, хлібопекарській, консервній промисловості й кулінарії [13].

Через низькі кислотні показники олія гірчишна значно довше зберігає свої властивості порівняно з іншими оліями. Важливо, що гірчишна олія відноситься до слабковисихаючих. Термін зберігання олії гірчичної вдвічі довший ніж термін зберігання інших рослинних олій. Як результат пресування насіння гірчиці утворюються олії та дрібнодисперсний гірчичний жом (порошок) [14].

Насіння гірчиці містить 7–12 % оболонки [15]. В ядрі ж насіння міститься: 16–49 % жирної олії; 20–30 % сирих білків; 17–30 % безазотистих екстрактивних речовин; 22–25 % вуглеводів, із них 8–15 % моносахаридів і дисахаридів, 10–14 % полісахаридів; 10–11 % клітковини; 2,5–3 % фітинової кислоти та її солей; 1,7–2,1 % фосфору (у розрахунку на P_2O_5), з них 0,3–0,5 % фосфоліпідів і 1,2–6,7 % тиоглікозиду (синігрину), з яких 0,3–1,7 % алілізотіоціанату [14].

Функціональні властивості порошку гірчичного полягають у здатності затримувати зв'язувати вологу та жири, здатності до емульгування. Так, при переробленні насіння гірчиці, крім основного продукту – олії, утворюються відходи, що становлять значний інтерес для харчового виробництва. Продукти перероблення насіння гірчиці мають високу харчову й енергетичну цінність, що робить можливим їхнє використання у складі харчових продуктів. Це зумовлено вмістом значної кількості поживних речовин: жиру, білка, БЕР [14].

Мединою науковою спільнотою було доведено [18] позитивний вплив продуктів з гірчиці на людське здоров'я. Це зумовлене загальними дезінфекційними властивостями та блокуванням росту мікроорганізмів. Зростання попиту на насіння гірчиці в 2021 р. становило 26 %, що пов'язано з епідемією коронавірусної хвороби [19].

У складі харчових продуктів, для їх збагачення функціональними інгредієнтами гірчиці найчастіше використовують олію і вкрай мало вторинні продукти перероблення насіння гірчиці. Основна маса ірчного шроту та макухи використовується на корм сільськогосподарських тварин.

Метою статті – вивчення питання щодо можливості формування якості хліба пшеничного з додаванням борошна та олії гірчиці білої та сарептської.

Методика дослідження. Насіння гірчиці білої (*Sinapis alba* L.) є видом роду Гірчиця (*Sinapis* L.), а гірчиці сарептської (*Brassica juncea* (L.) Czern.) – вид роду Капуста (*Brassica*) та інтродуковані на базі Національного ботанічного саду ім. Гришка НАН України, а зерно пшениці вирощене в Південному Лісостепі України.

Борошно пшеничне вищого сорту було надано місцевим виробником. Борошно пшеничне вищого сорту є універсальним борошном, що можна використовувати для виготовлення різноманітних тістових виробів, в тому числі для хліба. Окрім того, борошна пшеничне має більшу кількість білків, що необхідні для формування якісної клейковини, а також має високу кількість



сирої клейковини (кількість клейковини, що залишається після відмивання тіста водою для видалення крохмалю, водорозчинних пентозанів і білків) – 28,0 %, що забезпечує еластичне тісто. Рецептурні компоненти для хліба – сіль кухонна, цукор-пісок, дріжджі сухі – купували у місцевому супермаркеті. Водопровідну воду, що використовується, отримували від міської водопровідної системи.

Борошно гірчиці виготовляли шляхом подрібнення в порошок макуху (знежирене насіння), що залишалася після вилучення олії з насіння гірчиці білої та сарептської методом холодного пресування (за температури до 40 °C). Для приготування борошна макуху подрібнювали у лабораторному млинку до розміру частинок 30–40 мкм і перемішували для взяття рецептурної наважки.

Для приготування тіста брали борошно пшеничне 70 % виходу вищого сорту (за вологості 14 %) та борошно гірчиці у кількості 3, 5, 10 та 15 %, а також: сіль кухонну, дріжджі пресовані, цукор-пісок, олію з насіння гірчиці – по 1,5 % кожного від маси суміші борошна пшеничного та борошна гірчиці, воду питну. Випікали хліб зі зволоженням шафової печі за температури режиму 210 ± 2 °C упродовж 15–20 хв.

Дослідження проведено на базі кафедри харчових технологій Уманського НУ та ТОВ «Умань Хліб Груп». Показники технологічного процесу, якість виробів оцінювали за стандартними методиками [20, 21]. Більш детально матеріали та методи дослідження якості борошна та хліба нових рецептур та фізико-хімічні, органолептичні показники описано в роботі [14].

Кодування дослідних зразків наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Кодування експериментальних зразків

Експериментальний зразок		Борошно пшеничне	Борошно з порошку макухи гірчиці білої	Борошно з порошку макухи гірчиці сарептської
Контроль	100	–	–	–
№ 1-	3 %	97	3	–
	5 %	95	5	
	10 %	90	10	
	15 %	85	15	
№ 2-	3 %	97	–	3
	5 %	95	–	5
	10 %	90	–	10
	15 %	85	–	15

Основні результати дослідження. Наступним етапом експериментальних досліджень було провести лабораторне випікання експериментальних зразків хліба та провести його комплексне оцінювання за показниками фізико-хімічних властивостей. Відповідно до загальновизнаних нормативних документів [21] хліб пшеничний контролювали за такими показниками якості, як вологість, кислотність, пористість.

Вологість хліба (мякушки) – це показник, який визначає відношення маси води до загальної маси хліба і виражається у відсотках. Так, чим більша вологість хліба, тим нижча його поживна, енергетична цінність, а вихід хліба більший. Тому у ДСТУ 7517:2014 [21] визначають вологість, яка для пшеничного хліба з борошна вищого і першого сортів має бути не більше 43–44 %. Результати досліджень щодо величини вологості експериментальних зразків хліба наведено на рис. 1.

З аналізу даних досліджень (рис. 1) спостерігається динаміка зростання показника вологості мякушки у експериментальних зразках хліба виготовленого з додаванням борошна гірчицевого. При цьому зі збільшенням дозування досліджуваної добавки у складі хліба пшеничного,

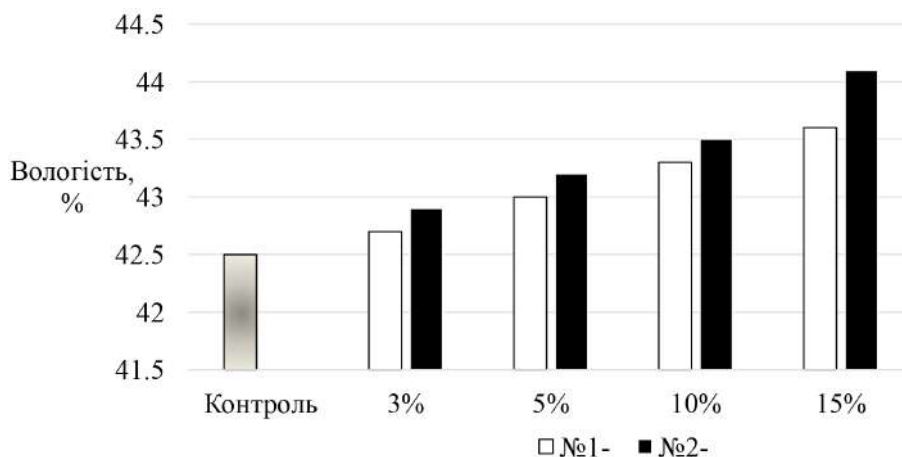


Рис. 1. Вологість експериментальних зразків хліба

вологість зростає у порівнянні з контрольним зразком хліба. У експериментальних зразках хліба величина вологості становила в межах рекомендованих значень, не більше 44 %. Тільки у зразку хліба № 2–15 % визначено величину вологості $44,2 \pm 0,1$ %, що на 2,1 % перевищує верхню межу допуску та на 1,7 % – контрольний варіант.

Таким чином, вологість мякушки хліба пшеничного з додаванням борошна гірчицевого від 3 до 15 % зростає, проти контрольного зразку без добавки, проте знаходиться у межах вимог стандарту. Збільшення концентрації борошна з порошку гірчиці сарепської (зразок № 2) у складі хліба 15 і більше відсотків забезпечує вологість мякушки вище 44 %.

Кислотність готових хлібобулочних виробів характеризує бродильні процеси в тісті і у випадку зниження значення градуса кислотності нижче визначених нормативів, вказує на виробництво хліба з погано вибродженого тіста. Такий хліб вважається менш поживним, погано перетравлюється та може принести дискомфорт споживачам. Отже, стандартом передбачено оцінка мякушки хліба за даним показником. Результати наведено на рис. 2.

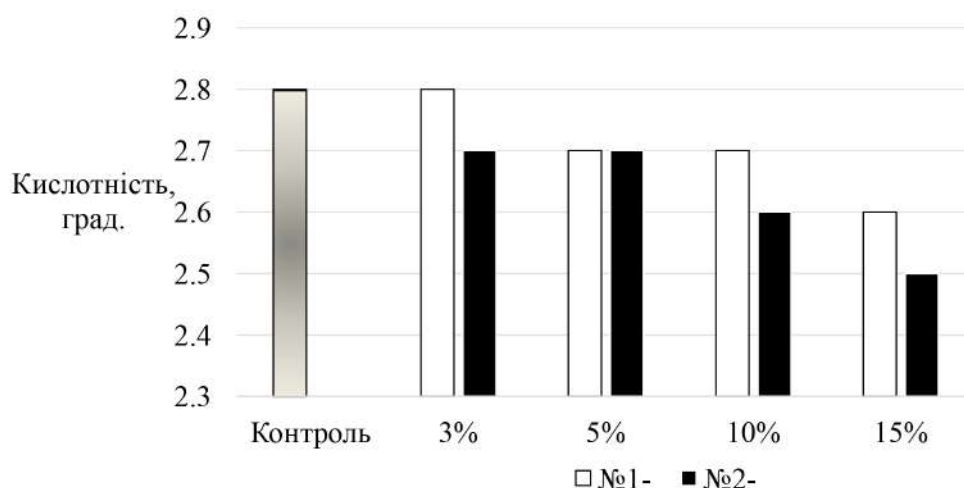


Рис. 2. Кислотність м'якушки експериментальних зразків хліба

З отриманих результатів (рис. 2) відмічаємо незначне зменшення величини кислотності у всіх дослідних зразках хліба у порівнянні з контрольним варіантом без включення добавки до рецептури. Все ж дане значення кислотності відповідало встановленим вимогам [21] відповідно до нормативних документів. У зразку ж № 1–3 % кислотність залишалася на рівні контрольного зразка.

Отже, дані вказують, що дослідні зразки хліба за показником градуса кислотності цілком можуть бути використані для подальших досліджень.

Величина пористості хліба має значення для оцінки його якості, оскільки зниження пористості нижче визначених стандартом величин вказує на порушення технологічного процесу, а саме операції з вистоювання тіста. Крім того зниження пористості відбувається за умови випікання хліба із добре невивіреного тіста. У ДСТУ [21] значення пористості для хліба пшеничного повинно бути не менше 65 %. Проведені дослідження з визначення даного показника у експериментальних зразках хліба наведено на рис. 3.

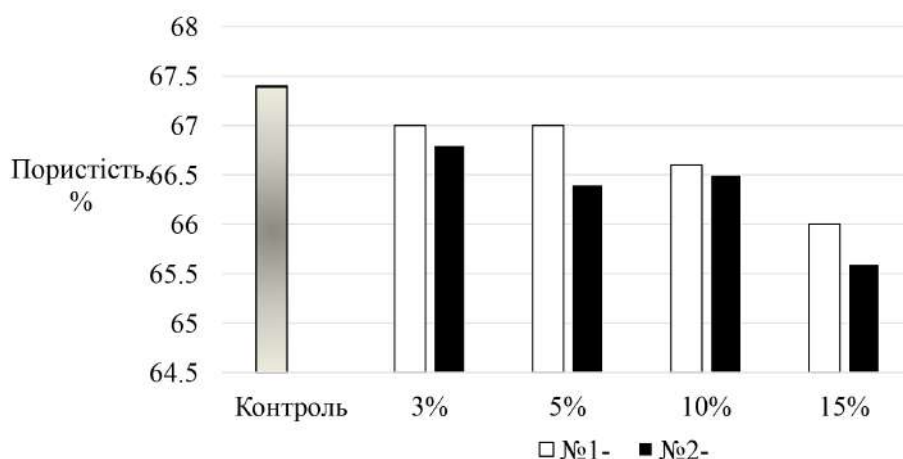


Рис. 3. Пористість експериментальних зразків хліба

З аналізу даних рис. 3 видно, що лише експериментальний зразок хліба № 2 з вмістом 15 % борошна гірчиці сарептської мав лише на $0,1 \pm 0,1$ % більшу пористість, порівнюючи з мінімально встановленими вимогами [17]. Отже, експериментальні зразки відповідали вимогам стандарту, хоча і пористість їх була нижчою, ніж у контрольному зразку хліба з борошна пшеничного.

Отже, за величиною пористості, виготовлені експериментальні зразки хліба пшеничного зі вмістом борошна гірчиці від 3 до 15 % можуть бути прийняті у виробництво, як продукт підвищеної біологічно цінності.

Зазначені вище результати можна частково пояснити взаємодією між доданими харчовими волокнами та глютенем, що міститься в борошні пшеничному. У першій фазі харчові волокна поглинають воду, перешкоджаючи повній гідратації білків. Це призводить до неповного та уповільненого формування клейковини під час процесу замісу тіста.

Обговорення результатів дослідження показників якості хліба зі збагачуючими добавками. Отримані дані свідчать про те, що використання добавок зменшує пористість хліба пшеничного, уповільнюють процес бродіння через зниження вмісту клейковини та кислотності тіста та сприяє зростанню показника вологості мякушки. При використанні насіння гірчиці пористість виробів поступалась контрольному зразку лише на 1–3 %, а кислотність – на 4–11 %. Винятком був зразок із додаванням 3 % борошна з гірчиці білої, де кислотність залишалася на рівні контрольного зразка.

Розроблений спосіб виробництва хліба за новими рецептурами відноситься до галузі харчової промисловості та може бути застосований під час лабораторного випікання хліба. Спосіб лабораторного випікання хліба пшеничного включає в рецептурі випікання хліба заміну від 3-х до 15-ти % борошна пшеничного на борошно з гірчицею, додаванням дріжджів пресованих та солі кухонної в кількості 1,5 % кожного, води питної в кількості 52–55 % від маси суміші борошна пшеничного та порошку рослин, бродіння в термостаті (температура 28–32 °C) впродовж 150–180 хв. та випікання упродовж 15–20 хв. за температури 200–220 °C.

Таким чином, використання у хлібопекарському виробництві насіння гірчиці є перспективним. Отриманні дані дають змогу рекомендувати виробникам використовувати продукти з гірчиці під час виготовлення хліба. Випікання хліба пшеничного з гірчицею білою та сарептської збагатить асортимент хлібобулочних виробів та дасть можливість значно розширити коло їхніх споживачів.

Висновки. Отже, враховуючи проведені дослідження ми можемо констатувати, що введення у рецептурний склад звичайних пшеничних тістових виробів борошна гірчицевого з порошку макухи гірчиці білої та сарептської в кількості до 15 та 10 % відповідно є оптимальним, так як підвищить його біологічну цінність збагативши омега-3 жирними кислотами, вітамінами та антиоксидантами, при цьому суттєво не знизивши його технологічні характеристики, такі як кислотність, вологість і пористість готових виробів.

Список використаних джерел

1. Dey D., Richter J. K., Ek P., Gu B. J., Ganjyal G. M. Utilization of Food Processing By-products in Extrusion Processing: A Review. *Front Sustain Food Syst.* 2021. Jan 26; 4.
2. Zarzycki P., Wirkijowska A., Nawrocka A., Kozłowicz K., Krajewska M., Kłosok K., Krawęcka A. Effect of Moldavian dragonhead seed residue on the baking properties of wheat flour and bread quality. *LWT.* 2022. Feb 1;155:112967.
3. Tiwari A., Khawas R. Food Waste and Agro By-Products: A Step towards Food Sustainability. In: *Innovation in the Food Sector Through the Valorization of Food and Agro-Food By-Products.* IntechOpen; 2021.
4. Tripathi B., Tripathi R., Vaidya M. Influence of orange bagasse addition on chemical composition of biscuits. *Pharma Innov. J.* 2018. 7, 338–341).
5. Ferrer-Mairal A., Peñalva-Lapiente C., Iglesia I., Urtasun L., De Miguel-Etayo P., Remon S. In vitro and in vivo assessment of the glycemic index of bakery products: influence of the reformulation of ingredients. *Eur. J. Nutr.* 2012. 51, 947–954. DOI: 10.1007/s00394-011-0272-6
6. Hadnadev T. D., Torbica A., Hadnadev M. Rheological properties of wheat flour substitutes/alternative crops assessed by Mixolab. *Procedia Food Sci.* 2011. 1, 328–334. DOI: 10.1016/j.profoo.2011.09.051
7. Moreira-Rosário A., Pinheiro H., Calhau C., Azevedo L. F. Can wheat germ have a beneficial effect on human health? A study protocol for a randomised crossover controlled trial to evaluate its health effects. *BMJ.* 2016. Open 6, e013098–e013099. DOI: 10.1136/bmjopen-2016-013098
8. Gazarova M., Lenartova P., Kopceva J., Mazova J., Holovicova M., Chlebova, Z. Consumption of different types of bakery products and its effect on visceral fat area in healthy population. *Rocz. Panstw. Zakl. Hig.* 2018. 69, 353–362. DOI: 10.32394/rpzh.2018.0040
9. Monteiro M. L. G., Marsico E. T., Soares M. S., Deliza R., de Oliveira, D. C. R., Conte-Junior C. A. Tilapia-waste flour as a natural nutritional replacer for bread: a consumer perspective. *PLoS One.* 2018. 13:e0196665. DOI: 10.1371/journal.pone.0196665
10. Mariotti M., Pagani M. A., Lucisano M. The role of buckwheat and HPMC on the breadmaking properties of some commercial gluten-free bread mixtures. *Food Hydrocoll.* 2013. 30, 393–400. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2012.07.005.
11. Di Nunzio M., Picone G., Pasini F., Chiarello E., Caboni M. F., Capozzi F. Olive oil by-product as functional ingredient in bakery products. Influence of processing and evaluation of biological effects. *Food Research International.* 2020. 131:108940. DOI: 10.1016/j.foodres.2019.108940
12. Elkatry H. O., Ahmed A. R., El-Beltagi H. S., Mohamed H. I., Eshak N. S. Biological activities of grape seed by-products and their potential use as natural sources of food additives in the production of Balady bread. *Food Secur.* 2022. 11:31948. DOI: 10.3390/foods11131948
13. Рожкован В., Чехов С., Буділка Г. Сарептська озима гірчиця – нова перспективна культура. *Пропозиція.* 2006. № 7. С. 58–60.
14. Рахметов Д. Б., Костецька К. В., Ковтун-Водяницька С. М., Рахметова С. О., Коломієць О. В. Використання макухи гірчицевої у технології хліба. *Вісник Уманського НУС.* 2024. № 2. С. 108–113. DOI: <https://doi.org/10.32782/2310-0478-2024-2-108-113>



15. Байдала В. В., Мірзоева Т. В., Мірзоев Т. Д. Господарська цінність технічних нішевих культур і перспективи розвитку їхнього виробництва. *Економіка і управління*.
16. Жуйков О. Г. Ринок гірчиці в Україні: стан, проблеми, перспективи. *Таврійський науковий вісник: зб. наук. пр.*, 2014. Вип. 87. С. 39–47.
17. ДСТУ 1052:2005. Гірчиця харчова. Загальні технічні умови. [Чинний від 2006-07-01]. Київ, 2006, 16 с.
18. Mustard production. Govt targets 17 million tonnes mustard production by 2025-26. 2021. URL: <https://www.thehindubusinessline.com/economy/agri-business/govt-targets-17-million-tonnes-mustard-production-by-2025-26/article34392637.ece>
19. Mustard Seed Crop Outlook Deteriorates in Top Exporter Canada. 2022. URL: <https://gro-intelligence.com/insights/mustard-seed-crop-outlook-deteriorates-in-top-exporter-canada>
20. Лабораторний практикум з технології хлібопекарського та макаронного виробництва: навч. посіб. [Текст] / [В. І. Дробот, Л. Ю. Арсеньєва, О. А. Білик та ін.]; за ред. В. І. Дробот. Київ: Центр навчальної літератури, 2006. 341 с.
21. ДСТУ 7517:2024. Хліб із пшеничного борошна. Загальні технічні умови: [Чинний від 2025.05.01]. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2025. 14 с.

Дата першого надходження статті до видання: 29.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



K. Kostetska¹, S. Kovtun-Vodyanytska², O. Kolomiets¹

¹ Uman National University

² M. M. Gryshko National Botanical Garden of NAS of Ukraine

TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF WHEAT BREAD USING MUSTARD PROCESSING PRODUCTS

Summary

In recent years, interest in the possibility of using a by-product of oil production has increased. The aim of the research was to evaluate flour from two types of mustard cake: white and Sarepta, including them in the recipe of wheat bread. Theoretical and practical aspects of technological parameters of wheat products were studied to justify the use of mustard cake in bread baking. Flour from dried cake was used, replacing premium wheat flour in the recipe of bread in the amount of 3, 5, 10 and 15 %. Bread samples were studied for technological characteristics using standard methods. It is worth noting that the technological indicators of experimental samples with the addition of white mustard flour (*Sinapis alba* L.) had a smaller deviation from the control variant than in samples with mustard flour (*Brassica juncea* (L.) Czern.). The use of additives reduces the porosity of wheat bread, slows down the fermentation process due to a decrease in the gluten content and acidity of the dough and contributes to an increase in the moisture content of the crumb. When using mustard seeds, the porosity of the products was inferior to the control sample by only 1–3 %, and the acidity – by 4–11 %. The introduction of mustard flour from white and Sarep mustard cake powder in the recipe composition of ordinary wheat dough products in an amount of up to 15 and 10 %, respectively, is optimal, as it will increase its biological value, without significantly reducing its technological characteristics, such as acidity, moisture and porosity of finished products. Therefore, the study of the properties of mustard cake by adding it in the form of flour to the recipe of bakery products is promising. The developed method of producing bread according to new recipes belongs to the food industry and can be used during laboratory baking of bread.

Keywords: mustard, seed mea, wheat flour, recipe, quality of bread.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-35>

УДК 663.252

О. І. Мамай, канд. техн. наук, доцент

В. А. Луцькова, канд. техн. наук, ст. викладач

Т. О. Яковенко, ст. викладач

К. В. Зубкова, канд. техн. наук, доцент

О. В. Стоянова, канд. техн. наук, доцент

Херсонський національний технічний університет

e-mail: kntuxt@gmail.com

ORCID: 0000-0002-2591-8059

ORCID: 0000-0002-8965-4224

ORCID: 0000-0002-1616-8997

ORCID: 0000-0002-8672-0855

ORCID: 0000-0002-6479-5936

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ КОНЬЯЧНИХ ВИНМАТЕРІАЛІВ

Анотація. Удосконалено технологію виробництва коньячних виноматеріалів на основі сировинної бази Херсонської та Миколаївської областей. Встановлено, що використання суміші сортів винограду Рислінг і Аліготе створює передумови для формування виноматеріалів із високим потенціалом у виробництві коньячних спиртів. Найбільш ефективними способами освітлення суслу є комбіновані методи обробки, зокрема препаратами на основі діоксиду кремнію та білкових речовин, що позитивно відображається на смако-ароматичному профілі та інших органолептичних характеристиках коньячних виноматеріалів.

Показано, що спеціалізовані штами дріжджів забезпечують більш повне та кероване зброджування суслу порівняно з дикою мікрофлорою, формуючи виноматеріали з оптимальною об'ємною часткою спирту, низьким залишковим вмістом цукрів і високими органолептичними показниками. Це підтверджує доцільність застосування селекційних дріжджів у виробництві коньячних виноматеріалів. Отриманий коньячний виноматеріал відповідає за фізико-хімічними показниками вимогам нормативних документів.

Ключові слова: сорти винограду, купаж сортів, освітлення суслу, діоксид кремнію, білкові речовини, штами дріжджів, коньячний спирт.

Постановка проблеми. Виробництво міцних напоїв коньячного типу в Україні має давні традиції та є важливою частиною алкогольної галузі країни. Ринок алкогольних напоїв є однією з найважливіших та бюджетоформуючих галузей харчової промисловості України [1].

Виробництво алкогольних напоїв, зокрема коньячної продукції, характеризується високим рівнем конкуренції, що зумовлено кількома основними чинниками [2]: усталеними традиціями споживання міцних алкогольних напоїв; стабільним рівнем попиту на продукцію; високою рентабельністю галузі; наявністю значної сировинної бази у вигляді вітчизняного та імпортованого виноматеріалу.

Виробництво міцних напоїв коньячного типу в Україні має значний потенціал розвитку. В останні роки спостерігається тенденція до збільшення частки вітчизняної продукції на ринку, що спричинене як підвищенням інтересом споживачів до локальних брендів, так і обмеженням імпорту внаслідок митно-тарифного регулювання. Водночас галузь стикається з низкою викликів, зокрема [3]: залежністю від імпортованого коньячного спирту, оскільки обсяг власного виробництва залишається недостатнім; потребою в модернізації технологічного обладнання та впровадженні інновацій у виробничий процес; посиленням конкуренції з боку іноземних виробників, що зумовлює необхідність підвищення якості продукції.

Перспективи розвитку українського ринку міцних напоїв коньячного типу тісно пов'язані з впровадженням інноваційних технологій виробництва виноматеріалів, їх перегонки і витримки спиртів, розширенням асортименту та підвищенням стандартів виробництва.



Одним із ключових напрямків модернізації є вдосконалення технології виробництва коньячних виноматеріалів, зокрема: технології переробки винограду в умовах заборони сульфитації, застосування селекційних штамів дріжджів, адаптованих до бродіння при оптимальних температурних режимах для збереження ароматичного потенціалу винограду; технології раннього формування складного ароматичного профілю дистилятів та ін.

Зростання внутрішнього споживання, підтримка національного виробника та експортна орієнтація можуть стати ключовими драйверами подальшого розвитку галузі. Впровадження сучасних технологій дозволить підвищити якість коньячних виноматеріалів, забезпечити стабільність характеристик кінцевого продукту та підвищити конкурентоспроможність українських міцних напоїв коньячного типу як на внутрішньому, так і на міжнародному ринку.

Аналіз останніх досліджень. Сорт винограду має першочерговий вплив на якість коньячної продукції, для виробництва якої використовують переважно білі сорти винограду з нейтральним або легким квітково-фруктовим ароматом, що не мають специфічних, яскраво виражених або невласливих тонів (мускатний, ізабельний) [4, 5]. Найпоширенішими білими технічними сортами коньячного напрямку є: Ркацители, Аліготе, Кокур білий, Совіньйон Блан [6]. В даний час основними фізико-хімічними показниками якості технічних сортів винограду для виноматеріалів та коньячних дистилятів є вміст цукрів, що має забезпечити об'ємну частку етилового спирту у виноматеріалах для виробництва дистилятів не менше ніж 7,0 % об. та високий вміст титрованих кислот [7, 8]. Органічні кислоти сприяють збереженню сортового аромату, захисту виноматеріалів від розвитку шкідливої бактеріальної мікрофлори, зниженню активності окисних ферментів, позитивно впливають на інтенсивність процесів ефіро- і альдегідоутворення під час бродіння і перегонки [4, 8].

Процеси переробки винограду, бродіння мають вирішальне значення для кінцевих характеристик коньячного виноматеріалу і відповідно дистиляту.

На рівень активності окисних ферментів суслу значною мірою впливає ступінь зрілості винограду та біологічні особливості сорту, зокрема склад фенольних сполук, що є для оксидаз основним субстратом [9, 10]. Регулювання складу ароматоутворюючих компонентів коньячних виноматеріалів в залежності від оксидазної активності та вмісту фенольного комплексу винограду є одним із напрямків управління якістю коньячної продукції.

Окисні ферментативні процеси протікають з моменту роздавлювання виноградної ягоди і до моменту настання інтенсивного бродіння в суслі. Оксидазна активність винограду поряд із масовою концентрацією фенольних речовин визначає сприйнятливість суслу до окислення киснем повітря. Фенольні речовини окислюються у свіжовіджатому суслі до хінонів, викликаючи його покоричневіння. При цьому можуть окислюватись інші органічні сполуки, утворюючи речовини, які можуть призвести до втрати сортового аромату [10].

У суслі, що спрямовується на бродіння, допускається вміст до 3 % об. завислих частинок (не більше 30 г/дм³). Найбільш поширеним способом освітлення суслу у коньячному виробництві є відстоювання, яке здійснюється на холоді при температурі не вище 10 °С протягом 6–15 годин без застосування сульфитації. Використання діоксиду сірки в коньячному виробництві обмежено через альдегідсірчисті сполуки, що утворюються при перегонці виноматеріалів, вони володіють різким неприємним запахом, який практично неможливо видалити, а також сірчаної кислоти, яка викликає корозію матеріалу куба. Відсутність сульфитації підвищує ризик зараження суслу при відстоюванні [7].

Для прискорення освітлення суслу та забезпечення ранньої стабілізації вина у виноробстві застосовують різні технологічні методи, зокрема обробку суслу желатином та іншими білками, бентонітом, діоксидом кремнію, а також сучасні інноваційні підходи [11, 12].

Застосування чистих культур дріжджів сприяє інтенсифікації синтезу вищих спиртів. Це свідчить про те, що кількість і склад ароматоутворюючих речовин, які утворюються під час

спиртового бродіння, значною мірою залежать від штаму мікроорганізмів, що використовуються, і є його індивідуальною та відтворюваною характеристикою [13].

Азотисті речовини винограду відіграють важливу роль у синтезі летких сполук під час бродіння, що робить їх ефективним інструментом для формування складу та ароматичного профілю вина [14–16]. Кількість цих речовин у виноматеріалі може регулюватися за рахунок таких факторів, як температура бродіння, аерація суслу та біомаса дріжджів.

Наведені дані підтверджують, що дріжджі є потужним інструментом для регулювання складу ароматоутворюючих речовин у виноматеріалах, зокрема через контроль умов проведення бродіння.

Ароматоутворюючі сполуки винограду та речовини, що утворюються під час бродіння суслу, беруть участь у складних фізико-хімічних процесах під час перегонки виноматеріалів – одному із ключових етапів коньячного виробництва [16–18].

Сучасне виробництво коньячних виноматеріалів потребує впровадження інноваційних підходів для підвищення якості продукції та оптимізації технологічних процесів. Зокрема, особливу увагу слід приділити технології освітлення суслу і використанню спеціалізованих штамів дріжджів, що дозволить покращити ароматичний профіль і стабільність кінцевого продукту.

Дослідження у цій сфері мають значний практичний потенціал, оскільки сприятимуть підвищенню ефективності виробничих процесів на виноробних підприємствах, зниженню витрат на виробництво коньячних виноматеріалів та розширенню асортименту високоякісної продукції.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Мета даної роботи – удосконалення технології виробництва коньячних виноматеріалів.

Основна частина. Об'єктом дослідження є технологічний процес виробництва коньячних виноматеріалів. Предмет дослідження – виноград білих сортів, вирощених в умовах Херсонської і Миколаївської областей, штами дріжджів, препарати для обробки виноматеріалів, коньячні виноматеріали.

Основні компоненти хімічного складу винограду, коньячних виноматеріалів визначали відповідно до діючих загальноприйнятих у енології сучасних методик [19] та нормативних документів.

Якість коньячних виноматеріалів насамперед зумовлена сортовими особливостями винограду, які залежать від ступеня його зрілості та агроекологічних умов вирощування. Ключовими показниками для оцінки сировини є вміст цукрів і титрованих кислот. Мінімальна концентрація цукрів у винограді коньячного напрямку складає 120 г/дм³, що при бродінні забезпечує близько 7,2 % об. спирту. Нормативи для коньячних виноматеріалів передбачають не менше 9,0 % об. етилового спирту в сортових і не менш 7,0 % об. – у сортозмішаних [7].

Для дослідження обрано три білих сорти винограду, що традиційно використовуються для коньячного виробництва на півдні України. Для кожного сорту визначені середні значення вмісту цукрів та титрованих кислот на основі серії відборів у період технологічної стиглості. Отримані показники наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Хімічні показники сортів винограду для коньячного виробництва

Сорт винограду	Вміст цукрів, г/дм ³	Вміст титрованих кислот, г/дм ³
Аліготе	180 ± 10	6,4 ± 0,2
Ркацителі	175 ± 10	9,1 ± 0,2
Рислінг	170 ± 10	9,0 ± 0,2

Аналіз фізико-хімічних показників білих сортів винограду показав, що у всіх сортах вміст цукрів (170–180 г/дм³) знаходиться на високому рівні для коньячної сировини, що забезпечує отримання 10–11 % об. етилового спирту.



Найнижча кислотність характерна для Аліготе, що може зменшувати врівноваженість смакового профілю і знижувати інтенсивність утворення ефірів під час перегонки. У сортах Ркацителі та Рислінг рівень кислотності значно вищий, що може інтенсифікувати реакції утворення ароматичних сполук у ректифікаті, а також забезпечувати мікробіологічну стабільність суслу й виноматеріалів під час зберігання.

Досліджувані сорти мають близькі за величиною показники вмісту цукрів, що забезпечує високий рівень утворення спирту. Для базових коньячних виноматеріалів доцільно використовувати Ркацителі та Рислінг як сировинну основу, а Аліготе – як компонент для підвищення спиртового потенціалу та формування смакових складових в купажах.

Освітлення суслу є однією з ключових операцій у технології виробництва коньячних виноматеріалів, оскільки на цьому етапі з нього видаляються завислі частинки, залишки шкірки та м'якоті, ферменти, а також значна частина дикої мікрофлори. Саме ця операція визначає початковий рівень мікробіологічної чистоти й окислювальної стабільності суслу, що безпосередньо впливає на подальший перебіг бродіння та якість виноматеріалу. Правильно проведене освітлення сприяє збереженню ароматичних сполук, забезпечує стабільність смако-ароматичного профілю та формування виноматеріалів із гармонійною структурою, високою стабільністю й потенціалом для отримання якісних коньячних дистилатів.

У рамках дослідження було проведено порівняльну оцінку ефективності різних технологічних прийомів освітлення виноградного суслу з метою мінімізації вмісту завислих частинок та зменшення інтенсивності небажаних окислювальних процесів, що особливо актуально за відсутності сірчистих препаратів у виробництві коньячних виноматеріалів.

Для освітлення суслу випробовували варіанти: бентоніт; бентоніт та казеїнат натрію; желатин з препаратом діоксиду кремнію; теплова обробка при температурі 65–70 °C протягом 5 хвилин. Усі варіанти порівнювали з контрольним зразком, у якому освітлення відбувалося шляхом відстоювання при температурі 10–12 °C протягом 10–12 годин.

Ефективність кожного способу оцінювали за ступенем зниження вмісту завислих частинок, вмісту фенольних речовин та органолептичними характеристиками. Результати узагальнено в табл. 2.

Встановлено, що освітлення виноградного суслу суттєво впливає на властивості отриманих коньячних виноматеріалів, зменшує інтенсивність окислювальних процесів, стабілізує колір, покращує аромат та смак виноматеріалу, що в підсумку позитивно позначиться на якості коньячного дистилату.

Таблиця 2

Вплив схем технологічного оброблення суслу на фізико-хімічні показники суслу та органолептичну оцінку коньячного виноматеріалу

№	Схема оброблення суслу	Вміст завислих частинок, г/дм ³	Вміст фенольних речовин, мг/дм ³	Органолептична оцінка, бал
1	Вихідний (без обробки)	16,6	360	7,5
2	Контроль (відстоювання на холоді)	9,3	310	7,6
3	Бентоніт	7,4	215	7,6
4	Бентоніт + казеїнат натрію	5,3	175	7,8
5	Діоксид кремнію + желатин	3,7	160	7,9
6	Пастеризація і відстоювання	9,0	345	7,5

Порівняння схем обробки суслу (табл. 2) показало, що найбільш виражений ефект досягається при використанні комбінованих варіантів: діоксиду кремнію з желатином та бентоніту



з казеїнатом натрію. Ці комбінації забезпечили найнижчий вміст завислих частинок та фенольних сполук, що корелює з найвищими дегустаційними оцінками.

Висока ефективність комбінації діоксиду кремнію та желатину полягає в тому, що діоксид кремнію має високу адсорбційну здатність до колоїдних речовин, що сприяє швидкому захопленню дрібнодисперсних частинок, а желатин у ролі білкового флокулянта формує великі агрегати, підсилюючи осадження адсорбованих речовин. У результаті флокуляційно-адсорбційний процес відбувається швидше і ефективніше, ніж за використання кожного препарату окремо. Застосування бентоніту з казеїнатом натрію дає аналогічний ефект. Крім того, виявляється формування щільнішого і компактнішого осаду, що свідчить про вищу ефективність коагуляційних процесів.

Теплова обробка у поєднанні з відстоюванням виявилась малоефективною в частині зниження вмісту фенольних речовин і показала найнижчу дегустаційну оцінку серед оброблених варіантів.

Таким чином, дослідження підтвердили доцільність використання комбінованих технологічних схем обробки суслу. Такий підхід не лише забезпечує прозорість та стабільність суслу, але й сприяє формуванню виноматеріалів з вираженим ароматичним профілем і потенціалом для отримання високоякісних коньячних дистилатів.

Вибір конкретної схеми обробки доцільно здійснювати з урахуванням вмісту фенольних сполук, активності ферментів та стану колоїдної системи суслу.

У технології виробництва коньячних виноматеріалів заборонено застосовувати сульфитацію для обробки виноматеріалів, тому якість коньячних виноматеріалів і дистилатів значною мірою визначається вибором і поведінкою дріжджових культур. Цікаво було простежити, як різні штами дріжджів впливають на швидкість зброджування, фізико-хімічні та органолептичні характеристики отриманих виноматеріалів.

Для досліджень використовували освітлене сусло з допомогою діоксиду кремнію і желатину на основі купажу сортів Рислінг і Аліготе, із концентрацією цукрів 175 г/дм³. Бродіння вели при температурі 16–18 °С, що є оптимальним режимом для збереження ароматичного потенціалу виноматеріалів. Для зброджування використовували штами активних сухих дріжджів SafSpirit CO-16, ActiFlore F5, Lalvin Sensy. У контрольному варіанті проводили зброджування суслу на спонтанній мікрофлорі.

Результати досліджень (табл. 3) дозволили оцінити вплив штамів дріжджів на ароматичний профіль і стабільність виноматеріалу.

Таблиця 3

Вплив штамів дріжджів на фізико-хімічні показники і органолептичну оцінку виноматеріалів

Показники	ActiFlore F5	SafSpirit CO-16	Lalvin Sensy	Дикі дріжджі
Вміст цукрів, г/дм ³	0,8	0,7	1,0	3,0
Об'ємна частка спирту, %	10,5	10,4	10,5	10,3
Вміст титрованих кислот, г/дм ³	6,4	6,8	6,1	6,2
Вміст летких кислот, г/дм ³	0,4	0,3	0,6	0,9
Органолептична оцінка, бал	8,0	8,6	8,5	7,3

Тривалість бродіння складала 10–15 діб в залежності від активності дріжджів.

Усі штами активних дріжджів забезпечили достатньо повне зброджування цукрів. Бродіння на дикій мікрофлорі тривало 15 діб, з утворенням виноматеріалу з вмістом залишкових цукрів 3 г/дм³.

Найвищу початкову швидкість зброджування продемонстрував штам ActiFlore F5, що свідчить про високу бродильну енергію. Проте, надто швидке зброджування може призводити до

неповної реалізації ароматичних потенціалів сорту, оскільки активне виділення CO₂ сприяє винесенню летких ароматичних речовин із суслу.

Дріжджі SafSpirit CO-16 та Lalvin Sensy демонстрували помірну швидкість зброджування з поступовим зменшенням вмісту цукрів.

Процес бродіння у варіанті без додавання активних дріжджів характеризувався значною інерційністю на початкових етапах, а також меншою глибиною зброджування. Залишкові цукри на рівні 3 г/дм³ свідчать про неповне зброджування, що вказує на нестабільну ферментативну активність природних дріжджів, а також на вищі ризики мікробіологічного псування виноматеріалу. Окрім того, спонтанна мікрофлора нерідко продукує небажані побічні продукти – леткі кислоти, вищі спирти, що можуть негативно впливати на чистоту смаку дистилляту.

Штами Lalvin Sensy і SafSpirit CO-16 сприяли кращому збереженню речовин, що впливають на формування аромату. Це створює передумови для формування виноматеріалів із насиченим сортовим ароматом, гармонійним смаком і чистим післясмаком. Штам Lalvin Sensy вважається особливо перспективним у контексті збереження ефірного профілю виноматеріалу за рахунок рівномірного та делікатного бродіння.

За всіма основними показниками якості – вмістом залишкових цукрів, рівнем летких кислот, органолептичною оцінкою – штами Lalvin Sensy та SafSpirit CO-16 продемонстрували найкращі результати. Вони забезпечили стабільне зброджування з формуванням виноматеріалів із гармонійним смаком, збалансованою кислотністю та найвищими сенсорними характеристиками (8,5 бала). Водночас виноматеріал, отриманий на дикій мікрофлорі, мав найгірші показники як за хімічним складом, так і за органолептикою, що підтверджує недоцільність використання спонтанного бродіння у виробництві коньячних виноматеріалів.

Питання впливу досліджуваних штамів дріжджів та способів освітлення суслу на формування коньячних дистиллятів є предметом подальших досліджень.

Висновки. У результаті проведених досліджень удосконалено технологію виробництва коньячних виноматеріалів. Встановлено, що оптимальним сортовим матеріалом для отримання коньячних виноматеріалів в Херсонській та Миколаївській областях є купаж винограду сортів Рислінг та Аліготе, що характеризуються гармонійним поєднанням цукристості і кислотності. Використання цих сортів створює передумови для формування виноматеріалів із високим потенціалом у виробництві коньячних спиртів.

Показано, що спосіб освітлення суслу істотно впливає на фізико-хімічні показники та органолептичні властивості виноматеріалів. Найбільш ефективними визнані комбіновані методи обробки, зокрема діоксид кремнію з желатином та бентоніт з казеїнатом натрію, які дозволили знизити вміст завислих речовин до 3,7–5,3 г/дм³ і фенольних сполук до 160–175 мг/дм³. Це позитивно відобразилося на смако-ароматичному профілі виноматеріалів, які отримали найвищі дегустаційні оцінки. Таким чином, доведено, що саме комбіновані схеми освітлення створюють найбільш сприятливі умови для формування гармонійних органолептичних характеристик коньячних виноматеріалів.

Доведено, що спеціалізовані штами, зокрема SafSpirit CO-16 та Lalvin Sensy, забезпечують більш повне та кероване зброджування суслу порівняно з дикою мікрофлорою, формуючи виноматеріали з оптимальною об'ємною часткою спирту, низьким залишковим вмістом цукрів і високими органолептичними показниками. Це підтверджує доцільність застосування селекційних дріжджів у виробництві коньячних виноматеріалів.

За результатами проведених досліджень удосконалено технологію переробки винограду з виробництвом коньячних виноматеріалів. Отриманий виноматеріал відповідає за фізико-хімічними показниками ДСТУ 4645:2006 Виноматеріали коньячні. Загальні технічні умови та Правилам виробництва коньяків України.



Список використаних джерел

1. Зайченко К. С., Болховська А. П. Сучасний стан та тенденції розвитку ринку алкогольних напоїв в Україні. *Економіка, управління та адміністрування*. 2023. № 2 (104). С. 101–109. DOI: 10.26642/eta-2023-2(104)-101-109
2. Луканін О. Складники конкурентоспроможності бренді та коньяків України. *Напої. Технології та Інновації*. URL: <https://techdrinks.info/skladnyky-konkurentospromozhnosti-brendi-ta-konyakiv-ukrayiny/> (дата звернення: 03.02.2026).
3. Геліч Я. В. Стан ринку алкогольних напоїв типу бренді в Україні. *Актуальні проблеми ефективного соціально-економічного розвитку України: пошук молодих* : збір. наук. праць IX Всеукр. наук.-практ. конф., 23 квіт. 2020 р. Вінниця, 2020. Вип. 94. С. 56–62.
4. Казимова І. Г., Набієв О. А. Хімічний склад винограду різної стиглості для виробництва коньячних виноматеріалів. *Виноградарство і виноробство*. 2012. № 2. С. 44–45.
5. Аванесьянц Р. В., Павлова А. М., Якуба Ю. Ф. Нові методологічні підходи до оцінки термінів збирання винограду для коньячних виноматеріалів. *Виноградарство і виноробство*. 2013. № 1. С. 16–20.
6. Вплив сортових особливостей винограду на якість коньячних виноматеріалів / О. О. Чурсіна та ін. *Виноградарство і виноробство*. 2013. Т. 42. С. 71–74.
7. Про затвердження Правил виробництва коньяків України : затв. наказом М-ва агрополітики України від 27.12.2017 № 702. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0875-18#Text> (дата звернення 02.02.2026).
8. Cherviak S. N., Anikina N. S., Gnilomedova N. V., Gerzhikova V. G., Vesiutova A. V. Study of physic-chemical and biochemical parameters of technical varieties of grapes. IOP Conf. Series: *Earth and Environmental Science*. 2021. 659. 012087. DOI: 10.1088/1755-1315/659/1/012087
9. Cosme F, Pinto T., Vilela A. Phenolic Compounds and Antioxidant Activity in Grape Juices: A Chemical and Sensory View. *Beverages*. 2018. 4, 22. 14 p. DOI: 10.3390/beverages4010022
10. Oliveira C. M., Ferreira A. C. S., De Freitas V., Silva A.M.S. Oxidation mechanisms occurring in wines. *Food Research International*. 2011. 44. PP. 1115–1126. DOI: 10.1016/j.foodres.2011.03.050
11. Ковалевський К. А., Шанін О. Д., Артьомова І. В. Дослідження нових способів освітлення соків і виноматеріалів. *Інновації в управлінні асортиментом, якістю та безпекою товарів і послуг* : матеріали V Міжнар. наук.-практ. конф. Львів : ЛТЕУ, 2017. С. 124–126.
12. Ковалевський К. А., Кузьміна Т. О., Шанін О. Д., Валько П. М. Спосіб освітлення і стабілізації суслу і виноматеріалів. *Вісник ХНТУ*. 2018. 1(64). С. 119–123.
13. Romano P., Ciani M., Fleet G. H. Yeasts in the Production of Wine. Springer Nature, 2019. 515 p. DOI: 10.1007/978-1-4939-9782-4
14. Burin V. M., Gomes T. M., Caliar V., Rosier J. P., Bordignon-Luiz M. T. Establishment of influence the nitrogen content in musts and volatile profile of white wines associated to chemometric tools. *Microchemical Journal*. 2015. Vol. 122. PP. 20–28. DOI: 10.1016/j.microc.2015.03.011
15. Burin V. M., Caliar V., Bordignon-Luiz M. T. Nitrogen compounds in must and volatile profile of white wine: Influence of clarification process before alcoholic fermentation. *Food Chemistry*. 2016. 202. PP. 417–425. DOI: 10.1016/j.foodchem.2016.01.096
16. Tsakiris A., Kallithrakab S., Kourkoutas Y. Grape brandy production, composition and sensory evaluation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2014. № 94. P. 404-414. DOI: 10.1002/jsfa.6377
17. Eliseev MN, Gribkova IN, Kosareva OA, Alexeyeva OM. Effect of organic compounds on cognac sensory profile. *Foods and Raw Materials*. 2021. 9(2). PP. 244–253. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-2-244-253>
18. Awad P., Athes V., Decloux M.E., Ferrari G., Snakkers G., Raguenaud P., Giampaoli P. Evolution of Volatile Compounds during the Distillation of Cognac Spirit. *J. Agric. Food Chem*. 2017. 65. PP. 77367748. DOI: 10.1021/acs.jafc.7b02406
19. Гержикова В. Г. Методи технохімічного контролю у виноробстві. Сімферополь: Таврида, 2009. 304 с.

Дата першого надходження статті до видання: 03.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 29.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)





О. Mamai, V. Lutskova, T. Yakovenko, K. Zubkova, O. Stoianova
Kherson National Technical University

IMPROVEMENT OF COGNAC WINE MATERIALS TECHNOLOGY

Summary

The technology for the production of cognac wine materials has been improved based on the raw material base of the Kherson and Mykolaiv regions. It has been established that the use of a mixture of Riesling and Aligote grape varieties creates the prerequisites for the formation of wine materials with a high potential in the production of cognac spirits.

Studies have confirmed the feasibility of using combined technological schemes of wort processing, in particular preparations based on silicon dioxide and protein substances. This approach not only ensures the transparency and stability of the wort, but also has a positive effect on the taste and aroma profile and other organoleptic characteristics of cognac wine materials. In addition, the formation of a denser and more compact sediment is detected, which indicates a higher efficiency of coagulation processes.

It has been shown that specialized yeast strains provide more complete and controlled fermentation of wort compared to wild microflora, forming wine materials with an optimal volume fraction of alcohol, low residual sugar content and high organoleptic indicators. This confirms the effectiveness of the use of selective yeast in the production of cognac wine materials.

According to the results of the conducted research, the technology of grape processing with the production of cognac wine materials has been improved. The obtained wine material complies with the physical and chemical parameters of DSTU 4645:2006 Cognac wine materials. General technical conditions and Rules for the production of cognacs of Ukraine.

Keywords: grape varieties, blend of varieties, wort clarification, silicon dioxide, protein substances, yeast strains, brandy alcohol.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-36>

УДК 664.8.037

К. С. Рубан, здобувачка вищої освіти

Н. А. Сова, канд. техн. наук, доцент

І. П. Холобцева, д-ка філософії

А. В. Токар, канд. хім. наук, доцент

Дніпровський державний аграрно-економічний університет

e-mail: sova.n.a@dsau.dp.ua

ORCID: 0009-0002-6469-792X

ORCID: 0000-0003-4750-2473

ORCID: 0000-0003-0500-2534

ORCID: 0000-0003-0374-8922

РОЗРОБЛЕННЯ ТА ОЦІНКА ЯКОСТІ КОНЦЕНТРАТУ СУПУ-ПЮРЕ ШВИДКОГО ПРИГОТУВАННЯ

Анотація. Обґрунтовано актуальність розроблення концентратів супів-пюре. Мета дослідження – розроблення рецептури концентрату супу-пюре швидкого приготування та оцінка показників якості готового продукту. Методики дослідження включали аналіз асортименту концентратів супів-пюре, розроблення рецептур із використанням різних видів круп (горохової, сочевиної, рисової), виготовлення зразків, визначення органолептичних показників, вологості, часу відновлення, розрахунок поживної та енергетичної цінності продукту. Найкращі органолептичні показники мав зразок із сочевицею. Оптимальні показники якості досягалися через 3 хв після відновлення продукту. Дослідний зразок характеризувався підвищеним вмістом білка, помірним вмістом жирів та зниженим рівнем вуглеводів порівняно з виробничими. Розроблений концентрат поєднує високу поживну цінність, зручність у використанні та адаптованість до сучасних умов споживання.

Ключові слова: суп-пюре, концентрат, швидке приготування, горох, сочевиця, рис, хімічний склад.

Постановка проблеми. Сучасні споживачі дедалі частіше обирають зручні, поживні та доступні харчові продукти, які не потребують значних витрат часу на приготування. У цьому контексті одним із перспективних напрямів є виробництво супів-концентратів.

Супи-концентрати дають можливість швидко приготувати повноцінну страву, що забезпечує організм енергією та поживними речовинами. Завдяки компактності, тривалому терміну зберігання та відсутності потреби в холодильному зберіганні вони є зручними як для побутового використання, так і в умовах відряджень, подорожей, навчання чи військової служби.

Значущість цієї продукції особливо зростає в періоди кризових явищ – енергетичних, воєнних або гуманітарних. У таких ситуаціях супи-концентрати можуть виступати ефективним засобом забезпечення населення гарячим харчуванням за обмежених ресурсів. У зв'язку з цим важливим є розвиток національного виробництва з використанням вітчизняної сировини, зокрема овочів, круп, бобових, зелені та прянощів.

Разом із тим актуальним завданням є підвищення поживної та біологічної цінності продукції, а також мінімізація використання штучних добавок, таких як підсилювачі смаку, барвники та стабілізатори. Зростаюча орієнтація споживачів на здорове харчування зумовлює необхідність удосконалення рецептур із акцентом на натуральність та якість.

Отже, розвиток виробництва супів-концентратів в Україні є не лише реакцією на зміну харчових уподобань населення, а й важливим чинником зміцнення продовольчої безпеки та формування сучасної культури харчування, орієнтованої на збереження здоров'я.

Аналіз останніх досліджень. На сучасному етапі як вітчизняні, так і зарубіжні науковці приділяють значну увагу розробленню рецептур і технологій виробництва супів-пюре швидкого та миттєвого приготування [1–12]. Отримані результати досліджень можуть бути ефективно

використані у виробництві харчових продуктів, призначених для споживачів із підвищеними фізичними та психоемоційними навантаженнями, зокрема в екстремальних польових умовах і під час виконання бойових завдань за відсутності постійного забезпечення.

Під час розроблення рецептур і технологій виробництва супів-пюре швидкого та миттєвого приготування вчені переважно використовували широкий спектр білкової та рослинної сировини. Як основні білкові компоненти застосовували м'ясо курки [2], філе хеку [1], антарктичні креветки [3], сушений яловичий фарш [4–6] та інші м'ясні інгредієнти. Для підвищення поживної цінності до складу вводили різні види висівків – рисові, вівсяні, пшеничні, гречані та кукурудзяні [4–6].

Овочева складова формувалася за рахунок використання картоплі, моркви, цибулі (ріпчастої та порею), буряка, гарбуза, томатів, селери, петрушки, кропу, цвітної капусти, броколі, грибів, бобових культур (квасолі, сочевиці), а також часнику та болгарського перцю [1–12]. Додатково до рецептур включали фруктові інгредієнти, зокрема курагу, фініки та яблука [8]. Для формування смакових властивостей застосовували широкий спектр спецій: чорний, духмяний і гіркий перець, зіру, коріандр, куркуму, карі, корицю, кмин, а також кухонну сіль та цукор [1–12].

Результати проведених досліджень свідчать, що впровадження таких рецептур сприяє підвищенню поживної та біологічної цінності продуктів, покращенню їх органолептичних і фізико-хімічних показників, оптимізації нутрієнтного складу та, в окремих випадках, зниженню калорійності.

Встановлено, що споживання таких продуктів позитивно впливає на загальний стан організму, забезпечуючи його енергією, вітамінами та біологічно активними речовинами. Крім того, розроблені рецептури розширюють коло споживачів, оскільки можуть бути адаптовані до раціонів людей різного віку. Водночас технології їх виробництва характеризуються високою ефективністю та дозволяють знизити собівартість готової продукції.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Мета роботи – розроблення рецептури концентрату супу-пюре швидкого приготування та оцінка показників якості готового продукту, для досягнення якої передбачено виконання таких завдань: провести аналіз асортименту супів-пюре швидкого та миттєвого приготування, які реалізують в Україні; виготовити дослідні зразки концентрату супу-пюре швидкого приготування із варіацією круп (горох колотий жовтий – зразок 1, сочевиця червона – зразок 2, рисова – зразок 3); дослідити органолептичні показники якості дослідних зразків концентрату супу-пюре, визначити їх вологість, необхідну кількість води та час для приготування готової страви; розрахувати поживну та енергетичну цінність зразка, який виявиться кращим за сукупністю показників.

За основу для розробки рецептури концентрату супу-пюре швидкого приготування взяли суп-пюре «Курячий» [2], інгредієнти підібрали в результаті аналізу джерел інформації. Серед існуючих видів круп'яної сировини нашу увагу привернули горохова, рисова та сочевична. Горохова крупа є цінним джерелом білка (13,7–35 %) та містить широкий спектр амінокислот, зокрема аргінін, лізин, фенілаланін та метіонін. Основними вуглеводами є крохмаль (40–56 %) і клітковина (2,8–20 %). Завдяки низькому глікемічному індексу горох сприяє регуляції рівня глюкози в крові, а наявність харчових волокон позитивно впливає на функціонування шлунково-кишкового тракту, знижує рівень холестерину та проявляє пребіотичні властивості. Крім того, горохова крупа містить важливі мінеральні елементи (калій, фосфор, магній, кальцій, залізо) та фолієву кислоту, що зумовлює її корисність у профілактиці серцево-судинних і метаболічних захворювань [13, 14].

Сочевиця також характеризується високою поживною цінністю, містячи 21,4–36,0 % білка, значну кількість мінеральних речовин (калій, магній, залізо) та харчових волокон. Вона позитивно впливає на серцево-судинну, нервову та кровотворну системи й рекомендована для дієтичного харчування при різних захворюваннях. Залежно від виду, сочевиця може мати додаткові лікувально-профілактичні властивості [15, 16].



Цільнозерновий рис є переважно джерелом вуглеводів (до 80 % крохмалю), містить 6–8 % білка та незначну кількість інших поживних речовин. Водночас він забезпечує організм важливими амінокислотами, зокрема лізином, а також вітамінами групи В та мікроелементами [17, 18].

У табл. 1 наведено порівняльну характеристику поживної та енергетичної цінності використаних у дослідженні круп за інформацією від виробника.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика поживної та енергетичної цінності горохової, сочевичної та рисової круп

Показник, на 100 г продукту	Вид крупи		
	Горох колотий жовтий	Сочевиця червона	Рисова
Білки, г	23,0	24,0	7,0
Жири, г	1,6	1,5	1,0
Вуглеводи, г	48,0	46,3	71,0
Енергетична цінність, ккал	299	295	333

Для виготовлення дослідних зразків концентрату супу-пюре здійснювали зважування сировини відповідно до рецептури (табл. 2). Овочі та гриби промивали, очищували та нарізали кубиками розміром до 10 мм. М'ясо також піддавали миттю, обсушували паперовим рушником і нарізали на шматки аналогічного розміру. Крупи попередньо промивали під проточною водою, зелень подрібнювали, а спеції просіювали. Кожен дослідний зразок готували окремо. У киплячу воду вносили м'ясо курятини та варили протягом 10 хв, після чого додавали крупу (горохову крупу попередньо замочували у воді протягом 4 годин). Подальше варіння тривало 30 хв для зразка № 1 та 10 хв – для зразків № 2 та № 3. Далі додавали овочі, гриби, зелень, сіль та спеції та доводили страву до готовності протягом наступних 15 хв.

Отриманий суп охолоджували до температури 30 °С, після чого подрібнювали блендером до однорідної консистенції та рівномірно розподіляли на листах для сушіння, попередньо змащених рослинною олією. Сушіння проводили при температурі 60 °С протягом 4 год. Висушені зразки подрібнювали до порошкоподібного стану в лабораторному млинку та просіювали. Для відновлення готового продукту суху суміш заливали гарячою водою (100 °С) у співвідношенні 1:5 (сухий продукт : вода).

Таблиця 2

Рецептурні співвідношення дослідних зразків концентрату супу-пюре швидкого приготування, на 100 г готового продукту

№ з/п	Інгредієнти	Вміст в рецептурі дослідних зразків, г		
		№ 1	№ 2	№ 3
1	Вода питна	510,2	543,5	555,6
2	М'ясо курятини	102,0	108,7	111,1
3	Картопля	51,0	54,3	55,6
4	Печериці	51,0	54,3	55,6
5	Горох колотий жовтий	51,0	–	–
6	Сочевиця червона	–	54,3	–
7	Крупа рисова	–	–	55,6
8	Перець солодкий	25,5	27,2	27,8
9	Цибуля	25,5	27,2	27,8
10	Морква	25,5	27,2	27,8
11	Зелень (кріп, петрушка)	10,2	10,9	11,1
12	Сіль	4,1	4,3	4,4
13	Перець чорний мелений	0,5	0,6	0,6

Масову частку вологи дослідних зразків концентрату супу-пюре визначали, використовуючи ваги-вологомір «Radwag MA 110.R». Крім того, визначали органолептичні показники якості. Масову частку білків, жирів, клітковини, золи визначали за діючими стандартними методиками.

Основна частина. Сучасні умови життя в Україні в період повномасштабного вторгнення формують нові вимоги до вітчизняної харчової промисловості, зокрема щодо розроблення продуктів швидкого та зручного приготування, у тому числі перших страв. У зв'язку з цим доцільним є дослідження асортименту супів швидкого та миттєвого приготування, представлених на ринку України.

За результатами аналізу асортименту супів-пюре швидкого та миттєвого приготування, представлених на ринку України, встановлено, що найбільш поширеною основою для їх виробництва є сухе горохове пюре. Його домінування зумовлене доступністю, високою поживною цінністю та сприятливими технологічними властивостями, зокрема здатністю забезпечувати густу консистенцію після відновлення. Значно рідше використовують сочевичне та нутове пюре, переважно у поєднанні з гороховим. Серед овочевих інгредієнтів найчастіше застосовують моркву, цибулю та часник, які формують базовий смаковий профіль продукції. Інші овочі (картопля, селера, томати, паприка, капуста, буряк, бобові) використовуються епізодично для розширення асортименту. Із зелени найпоширенішими є кріп і петрушка, а серед грибів – печериці та, рідше, білі гриби.

Склад спецій здебільшого представлений чорним, червоним і духмяним перцем, а також чилі. Додатково застосовують куркуму, кмін, лавровий лист, а рідше – орегано, базилік, майоран, коріандр, карі та мускатний горіх. Обов'язковим компонентом є кухонна сіль. У деяких рецептурах використовують різні види борошна (пшеничне, кукурудзяне, рисове, житнє), яке виконує функцію загусника та сприяє оптимізації текстури та собівартості продукту. Аналіз способів приготування показав, що більшість супів орієнтовані на швидке споживання: продукти миттєвого приготування потребують 1–2 хв, тоді як інші – від 3 до 10 хв залежно від технології відновлення. Це свідчить про адаптацію продукції до сучасних умов та потреб споживачів.

З урахуванням результатів аналізу літературних джерел і ринкового асортименту, для розроблення дослідних зразків було обрано такі інгредієнти: м'ясо курки, картоплю, моркву, цибулю, болгарський перець, печериці, крупи (горохову, сочевицю та рисову), зелень (петрушку, кріп), сіль та чорний мелений перець.

На рис. 1 зображені дослідні зразки концентрату супу-пюре.

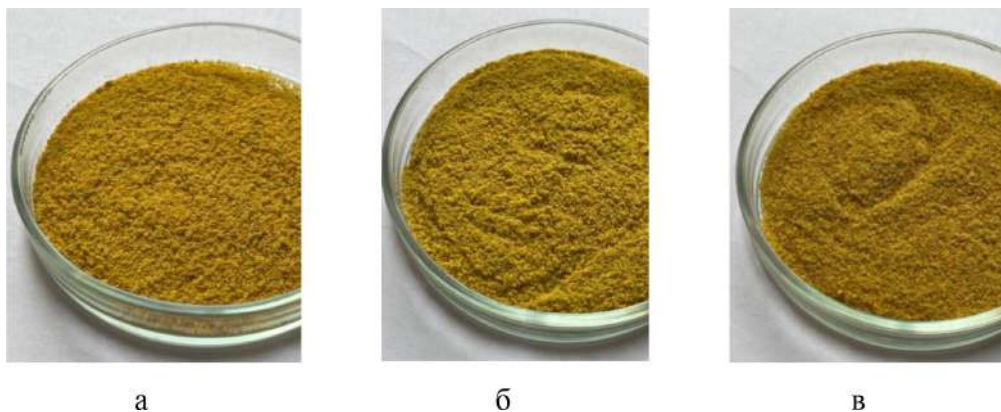


Рис. 1. Дослідні зразки концентрату супу-пюре швидкого приготування:

а – із додаванням колотого гороху, б – із додаванням сочевиці червоної, в – із додаванням крупи рисової



Вміст вологи у отриманих дослідних зразках становив 10,7 % для зразку № 1, 8,8 % для зразку № 2 і 9,3 % для зразку № 3. Визначення масової частки вологи було важливим, адже даний показник впливає на подальше зберігання харчових концентратів.

Дослідним шляхом встановлено, що для приготування супу-пюре із дослідних зразків концентрату необхідна кількість води у співвідношенні 1:5. Для дослідження часу приготування супів-пюре дегустацію дослідних зразків проводили одразу після заливання окропом із подальшою оцінкою через кожну хвилину. Встановлено, що оптимальні органолептичні показники – консистенція, смак і аромат – досягаються через 3 хв після відновлення. Це дозволяє віднести даний продукт до категорії страв швидкого приготування.

Для визначення фаворита за органолептичними показниками якості проводили дегустацію готової страви супу-пюре і оцінювали зразки за зовнішнім виглядом, кольором, запахом, консистенцією і смаком. Всі зразки отримали високі бали, але найкращим, на думку споживачів, був зразок концентрату супу-пюре із сочевицею, тому далі дослідили вміст білків, жирів, клітковини, золи в ньому. Вміст білків у зразку № 2 становив 41,1 %, жирів – 5,2 %, клітковини – 2,1 %, золи – 8,7 %. Далі розраховували поживну та енергетичну цінність. Одержані результати порівнювали з виробничими зразками концентратів супів-пюре (табл. 3).

Таблиця 3

Порівняльна характеристика поживної та енергетичної цінності дослідного зразку концентрату супу-пюре із виробничими

Назва показника, на 100 г продукту	Дослідний зразок № 2	Суп-пюре «Мівіна»	Суп-пюре із сочевицею ТМ «Трапеза»
Білків, г	41,1	8,8	21,9
Жирів, г	5,2	19,0	1,1
Вуглеводів, г	42,8	48,0	59,4
Енергетична цінність, ккал	374	407	335

Аналіз даних табл. 3 свідчить про суттєві відмінності у поживній та енергетичній цінності дослідного зразка № 2 порівняно з виробничими аналогами. Вміст білків у дослідному зразку значно перевищував показники промислових зразків. Це вказує на підвищену біологічну цінність розробленого продукту та його доцільність для раціонів із підвищеною потребою у білку. Вміст жирів у дослідному зразку був значно нижчим порівняно з «Мівіною» і дещо вищим, ніж у зразка ТМ «Трапеза». Це свідчить про більш збалансований склад із помірною кількістю ліпідів. Вміст вуглеводів у дослідному зразку був нижчим порівняно з обома виробничими аналогами, що може бути перевагою для споживачів, які контролюють вуглеводне навантаження. Енергетична цінність дослідного зразка становила 374 ккал, що є нижчим показником порівняно з «Мівіною» (407 ккал), але вищим, ніж у супу ТМ «Трапеза» (335 ккал). Це пояснюється високим вмістом білка при помірній кількості жирів.

Висновки. У результаті проведених досліджень обґрунтовано доцільність розроблення концентратів супів-пюре швидкого приготування з використанням доступної вітчизняної сировини, зокрема м'ясної, овочевої та круп'яної. Аналіз ринку показав, що найбільш поширеною основою супів-пюре є горохове пюре, що зумовлено його високою поживною цінністю та технологічними властивостями.

Розроблено рецептури трьох дослідних зразків концентрату супу-пюре з використанням горохової, сочевичної та рисової круп. Встановлено, що оптимальні органолептичні показники готового продукту досягаються через 3 хв після відновлення, що дозволяє віднести його до продуктів швидкого приготування. За результатами органолептичної оцінки найкращими споживчими властивостями характеризувався зразок із сочевицею. Він відзначався приєм-



ним смаком, ароматом і однорідною консистенцією, що обумовило його вибір для подальших досліджень.

Аналіз хімічного складу показав, що розроблений зразок має підвищений вміст білка (41,1 г/100 г), помірний вміст жирів (5,2 г/100 г) та знижений рівень вуглеводів порівняно з виробничими аналогами (42,8 г/100 г). Це свідчить про його високу біологічну та поживну цінність. Порівняння з промисловими зразками підтвердило переваги розробленого продукту за показниками білкової цінності та збалансованості нутрієнтного складу, що дозволяє розглядати його як функціональний харчовий продукт.

Таким чином, розроблений концентрат супу-пюре швидкого приготування є перспективним для впровадження у виробництво, оскільки поєднує високу поживну цінність, зручність використання та адаптованість до сучасних умов споживання. Подальші дослідження доцільно спрямувати на оптимізацію технологічних параметрів, подовження термінів зберігання та розширення асортименту продукції.

Список використаних джерел

1. Суп-пюре «Океан»: пат. 117310 Україна: МПК A23L29/212, A23L29/238; № а201613279; заявл. 26.12.2016; опубл. 26.03.2018, Бюл. № 6.
2. Суп-пюре «Курячий»: пат. 115744 Україна: МПК A23L23/00, A23L29/212; № а201613280; заявл. 26.12.2016; опубл. 11.12.2017, Бюл. № 23.
3. Суп-пюре з креветками антарктичними: пат. 120520 Україна: МПК A23L23/00, A23L17/00; № u201703867; заявл. 19.04.2017; опубл. 10.11.2017, Бюл. № 21.
4. Харчовий концентрат «Суп-пюре гречаний з м'ясом» на основі гречаних висівок: пат. 139568 Україна: МПК A23L23/10; № u201906889; заявл. 19.06.2019; опубл. 10.01.2020, Бюл. № 1.
5. Харчовий концентрат «Суп-пюре вівсяний з м'ясом» на основі вівсяних висівок: пат. 139567 Україна: МПК A23L23/10; № u201906888; заявл. 19.06.2019; опубл. 10.01.2020, Бюл. № 1.
6. Харчовий концентрат «Суп-пюре кукурудзяний з м'ясом» на основі кукурудзяних висівок: пат. 139569 Україна: МПК A23L23/10; № u201906890; заявл. 19.06.2019; опубл. 10.01.2020, Бюл. № 1.
7. Харчовий концентрат супу швидкого приготування функціонального призначення: пат. 116737 Україна: МПК A23L23/10 (2016.01); заявл. 06.04.2017; опубл. 25.04.2018, Бюл. № 8.
8. Композиція інгредієнтів приготування солодкого низькокалорійного супу-пюре для профілактики онкологічних захворювань: пат. 143936 Україна: МПК A23L21/00; № u201912155; заявл. 23.12.2019; опубл. 25.08.2020, Бюл. № 16.
9. Noordraven L. E. C., Kim H.-J., Hoogland H., Grauwet T., Van Loey A. M. Potential of chickpea flours with different microstructures as multifunctional ingredient in an instant soup application. *Foods*. 2021. Vol. 10, No. 11. Article 2622. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods10112622>
10. Chumlert K., Daengsakon N., Rassmeedara P., Phanumong P. Production of instant mixed vegetables soup using foam mat drying: impact of various additives on foam properties and physicochemical aspects. *Food Agricultural Sciences and Technology*. 2024. Vol. 10, No. 1. 90–110. DOI: <https://doi.org/10.14456/fast.2024.7>
11. Setiawan B., Aulia S. S., Sinaga T., Sulaeman A. Nutritional content and characteristics of pumpkin cream soup with tempeh addition as supplementary food for elderly. *International Journal of Food Science*. 2021. Article 6976357. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/6976357>
12. Maharjan R. Formulation of spinach based soup mix and its quality evaluation : thesis. *Tribhuvan University*. 2022. 56 p.
13. Wu D.-T., Li W.-X., Wan J.-J., Hu Y.-C., Gan R.-Y., Zou L. A comprehensive review of pea (*Pisum sativum* L.): chemical composition, processing, health benefits, and food applications. *Foods*. 2023. Vol. 12, Issue 13. Article 2527. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12132527>
14. Hrynchenko O., Radchenko A., Dehtiar V., Hrynchenko N., Serik M. Development of technology for food products with emulsion structure based on pea groats and pea aquafaba. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol. 1, No. 11 (133). 17–27. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.323339>

15. Kaale L. D., Siddiq M., Hooper S. Lentil (*Lens culinaris* Medik) as nutrient-rich and versatile food legume: a review. *Legume Science*. 2023. Vol. 5, No. 2. Article e169. DOI: <https://doi.org/10.1002/leg3.169>
16. Joshi M., Timilsena Y., Adhikari B. Global production, processing and utilization of lentil: a review. *Journal of Integrative Agriculture*. 2017. Vol. 16, Issue 12. 2898–2913. DOI: [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61793-3](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61793-3)
17. Bienvenido O. J., Arvin P., Tuaño P. Gross structure and composition of the rice grain. Rice (Fourth Edition). *Chemistry and Technology*. 2019. 31–53. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811508-4.00002-2>
18. Sultana S., Faruque M., Islam M. R. Rice grain quality parameters and determination tools: a review on the current developments and future prospects. *International Journal of Food Properties*. 2022. Vol. 25, Issue 1. 1063–1078. DOI: <https://doi.org/10.1080/10942912.2022.2071295>

Дата першого надходження статті до видання: 22.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



K. Ruban, N. Sova, I. Kholobtseva, A. Tokar
Dnipro State Agrarian and Economic University

DEVELOPMENT AND QUALITY EVALUATION OF AN INSTANT CREAM SOUP CONCENTRATE

Summary

The study substantiates the relevance of developing instant cream soup concentrates as convenient, nutritious, and technologically feasible products under modern socio-economic challenges. The increasing pace of life, limited time for food preparation, and the need for balanced nutrition contribute to the growing demand for instant foods, particularly first-course meals. The aim of the research was to develop a formulation of an instant cream soup concentrate and to comprehensively evaluate the quality indicators of the finished product. The research methodology included an analysis of the assortment of instant and quick-preparation cream soups available on the Ukrainian market, justification of raw material selection, development of formulations using various types of cereals (pea, lentil, and rice), preparation of experimental samples, and determination of their organoleptic quality characteristics. Additionally, moisture content, reconstitution time, and nutritional and energy values of the product were determined. The results showed that the lentil-based sample demonstrated the best organoleptic characteristics, including a pleasant taste, pronounced aroma, and homogeneous consistency. It was established that optimal quality indicators are achieved 3 minutes after reconstitution with hot water, which allows the product to be classified as an instant food. The experimental sample was characterized by a high protein content, moderate fat levels, and reduced carbohydrate content compared to commercial analogues, indicating its high biological and nutritional value. The study confirmed the feasibility of using domestic raw materials for the production of instant cream soups and the promising potential of the developed product. The developed concentrate combines high nutritional value, ease of use, and adaptability to modern consumption conditions, which determines its potential for industrial implementation.

Keywords: cream soup, concentrate, instant preparation, peas, lentils, rice, chemical composition.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-37>

УДК 637.344:664.039

Т. П. Синенко, д-р філософії, доцент

О. Ю. Кошель, д-р філософії, доцент

А. В. Супрун, викладач

К. В. Омельчук, студентка

Д. М. Завгородній, аспірант

Сумський національний аграрний університет

e-mail: tetiana.synenko@snau.edu.ua

ORCID: 0000-0002-5300-5142

ORCID: 0000-0002-2184-2106

ORCID: 0000-0002-0604-3082

ORCID: 0009-0009-6774-0381

ORCID: 0009-0006-0719-7047

РОЗРОБКА ТА КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ЯКОСТІ ПУДИНГУ НА ОСНОВІ МОЛОЧНОЇ СИРОВАТКИ З ДОДАВАННЯМ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ

Анотація. У роботі обґрунтовано доцільність використання молочної сироватки для створення функціонального пудингу з рослинними інгредієнтами. Метою дослідження було розроблення рецептури пудингу на основі молочної сироватки з додаванням соку манго, насіння чіа та порошку кісточок малини і комплексна оцінка його якості. Об'єктом дослідження є пудинг із молочної сироватки, предметом – вплив рецептурного складу на показники якості. Сформовано матрицю з дев'яти зразків із різним вмістом насіння чіа та порошку кісточок малини. Досліджено активну кислотність, масову частку сухих речовин, вологоутримуючу здатність та органолептичні властивості. Узагальнення результатів здійснено за допомогою інтегрального показника якості. Встановлено, що підвищення вмісту насіння чіа покращує структурні властивості пудингів, а порошок кісточок малини у кількості 0,5–1,0 % позитивно впливає на стабільність і харчову цінність продукту. Оптимальним визначено зразок із 10 % насіння чіа та 1,0 % порошку кісточок малини.

Ключові слова: молочна сироватка, пудинг, насіння чіа, порошок кісточок малини, функціональні продукти, інтегральна оцінка якості.

Постановка проблеми. У сучасних умовах розвитку харчової промисловості наукова проблематика, пов'язана з раціональним використанням сировинних ресурсів, створенням функціональних харчових продуктів та впровадженням принципів сталого розвитку, набуває особливої актуальності. Зростання попиту на продукти з підвищеною харчовою цінністю, орієнтовані на здорове харчування, поєднується з необхідністю зменшення харчових відходів та більш ефективного використання побічної сировини агропромислового комплексу.

Однією з важливих наукових проблем сучасного харчування є пошук шляхів технологічної трансформації вторинної молочної сировини, зокрема молочної сироватки, у продукти з високою споживчою та біологічною цінністю. Молочна сироватка традиційно розглядається як побічний продукт переробки молока, однак вона містить значну кількість повноцінних білків, лактози, мінеральних речовин та біологічно активних компонентів. Наукові дослідження, спрямовані на розробку нових харчових продуктів на її основі, є важливими з огляду на екологічні, економічні та технологічні аспекти.

Паралельно з цим актуальною науковою проблематикою є інтеграція рослинної сировини та функціональних інгредієнтів у складі молочних і комбінованих продуктів. Використання насіння чіа як джерела харчових волокон, рослинного білка та поліненасичених жирних кислот відповідає сучасним тенденціям функціонального харчування. Не менш важливим є науковий інтерес до застосування порошків, отриманих із побічних продуктів переробки ягід, зокрема



кісточок малини, які характеризуються високим вмістом антиоксидантних сполук, клітковини та мікронутрієнтів. Дослідження впливу таких інгредієнтів на структуру, якість та споживчі властивості продуктів є актуальним науковим завданням.

З практичної точки зору результати досліджень у цій галузі є необхідними для розширення асортименту десертної продукції, створення продуктів з підвищеною харчовою та біологічною цінністю, а також для впровадження безвідходних і ресурсоефективних технологій у харчовій промисловості. Розробка рецептур пудингів на основі молочної сироватки з додаванням рослинної сировини має потенціал для використання у виробництві продуктів оздоровчого та функціонального призначення, орієнтованих на різні групи споживачів.

Таким чином, наукові дослідження, присвячені розробці та комплексній оцінці якості пудингів на основі молочної сироватки з рослинними інгредієнтами, є важливими з позицій сучасної харчової науки, оскільки поєднують вирішення актуальних завдань раціонального використання сировини, підвищення харчової цінності продуктів і задоволення практичних потреб харчової індустрії та споживачів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У науковій спільноті значну увагу приділяють раціональному використанню молочної сироватки як перспективної сировини для створення продуктів з підвищеною харчовою та біологічною цінністю.

У роботі [1] наведено результати досліджень щодо технологічного та нутрієнтного потенціалу молочної сироватки у складі десертних і напоїв на молочній основі. Показано, що використання сироваткових білків сприяє підвищенню білкової цінності продуктів і покращенню текстурних характеристик. Проте залишилися невирішеними питання, пов'язані з формуванням стабільної структури у комбінованих системах із високим вмістом рослинних інгредієнтів.

Аналогічні результати наведено у роботі [2], де досліджено можливості використання молочної сироватки в інноваційних харчових продуктах у контексті сталого розвитку. Автори показали, що переробка сироватки у десертні продукти є перспективною з екологічної та економічної точок зору. Водночас автори зазначають обмеженість досліджень, спрямованих на поєднання сироватки з нетрадиційною рослинною сировиною.

Окремий напрям сучасних досліджень присвячений використанню насіння чіа у функціональних харчових продуктах. У роботі [3] показано, що насіння чіа є цінним джерелом харчових волокон, омега-3 жирних кислот та білка, а також здатне впливати на реологічні властивості харчових систем завдяки високій водоутримувальній здатності. Однак нерозглянуте питання щодо оптимальних дозувань чіа у молочно-рослинних десертах, оскільки підвищення його вмісту може негативно впливати на сенсорні властивості та споживче сприйняття продукту.

У роботі [4] досліджено структуроутворення пудингів і гелеподібних продуктів з додаванням рослинних гідроколідів. Показано, що поєднання молочних білків і рослинних компонентів дозволяє формувати стабільну структуру без використання синтетичних загущувачів.

Значний науковий інтерес становлять дослідження, присвячені використанню порошків із побічних продуктів переробки ягід. У роботі [5] наведено результати досліджень антиоксидантного потенціалу кісточок малини та продуктів їх переробки. Показано, що порошок кісточок малини характеризується високим вмістом фенольних сполук і харчових волокон. Проте залишилися невирішеними питання щодо впливу такої сировини на текстуру та органолептичні показники молочних десертів, що обмежує її практичне застосування.

У роботах [6, 7] досліджено використання соків у молочних і сироваткових продуктах. Автори показали, що додавання соків дозволяє підвищити споживчу привабливість продуктів та їх антиоксидантну активність. Разом з тим підкреслюється необхідність оптимізації співвідношення молочної та фруктово-овочевої фаз з метою запобігання розшаруванню та зниженню стабільності продукту.



Питання комплексної оцінки якості функціональних десертів розглянуто у роботі [8], де акцент зроблено на поєднанні фізико-хімічних, мікробіологічних і сенсорних показників. Автори зазначають, що більшість досліджень зосереджена на окремих показниках якості, тоді як комплексний підхід до оцінювання комбінованих молочно-рослинних продуктів залишається недостатньо розробленим.

Узагальнення наведених літературних даних дозволяє стверджувати, що доцільним є проведення дослідження, присвяченого розробці та комплексній оцінці якості пудингу на основі молочної сироватки з додаванням рослинної сировини, зокрема насіння чіа, порошку кісточок малини та соку манго, з урахуванням їх взаємного впливу на структурні, фізико-хімічні та споживчі властивості продукту.

Формулювання мети (постановка завдання). Мета роботи – розробити рецептуру та виконати комплексну оцінку якості пудингу на основі молочної сироватки з додаванням рослинної сировини, зокрема насіння чіа, порошку кісточок малини та соку манго.

Відповідно до цього поставлені наступні завдання: обґрунтувати вибір рослинних інгредієнтів (насіння чіа, порошок кісточок малини, сік манго) для використання у складі пудингу на основі молочної сироватки; розробити рецептури дослідних зразків пудингу з різним вмістом рослинних інгредієнтів та дослідити їх вплив на якісні показники продукту; обґрунтувати оптимальний рецептурний склад пудингу на основі молочної сироватки з рослинною сировиною.

Основна частина. Розробка функціональних десертів на основі молочної сироватки є актуальною з огляду на її високу харчову цінність та технологічний потенціал. Сироватка містить білки з високою біологічною цінністю, лактозу та мінеральні речовини [9], а також розглядається як перспективна сировина для створення нових продуктів із підвищеною доданою вартістю. У роботі [10] підкреслюється, що практичне застосування сироватки в харчових системах потребує оптимізації рецептури, оскільки смак і стабільність структури можуть бути обмежувальними факторами.

Використання фруктової складової у сироваткових продуктах дозволяє підвищити споживчу привабливість завдяки інтенсивнішому аромату й смаку, а також додатковим біоактивним речовинам. Чудовою комбінацією є використання натуральних соків у складі сироваткових продуктів [6]. Це підтримує технологічну доцільність введення соку манго як смако-ароматичного та функціонального компонента. Додатково, манго характеризується наявністю поліфенолів і каротиноїдів (антиоксидантний потенціал) [11], що підсилює функціональність продукту. Вибір пропорції 1:1 у даному дослідженні обґрунтовано необхідністю сформулювати виражений фруктовий профіль, достатній для маскування можливого «сироваткового» присмаку; забезпечити достатній вміст рідкої фази для гідратації чіа та рівномірного розподілу часток порошку кісточок малини; зберегти молочну основу як джерело білків і мінералів.

Насіння чіа (*Salvia hispanica* L.) є широко дослідженим інгредієнтом завдяки високому вмісту харчових волокон і здатності утворювати слиз (mucilage), який проявляє високу водоутримувальну здатність і підвищує в'язкість/стабільність дисперсних систем [12]. У молочних продуктах застосування слизу чіа досліджували у роботах [13], зокрема, для зниження синерезису та поліпшення реологічних властивостей, що підтверджує його роль як функціонального гідрокооліду.

Побічні продукти переробки малини розглядаються як перспективні функціональні інгредієнти завдяки вмісту харчових волокон і поліфенольних сполук [14].

Узагальнення наведених даних дозволяє стверджувати, що вибір насіння чіа як природного структуроутворювача, порошку кісточок малини як джерела волокон і поліфенолів та соку манго як смако-ароматичного і функціонального компонента є науково й технологічно обґрунтованим, а варіювання їх у заданих межах створює умови для пошуку рецептури з оптимальним балансом структури, стабільності та сенсорної привабливості.



Сформована матриця експерименту з дев'яти зразків (табл. 1) дозволить оцінити вплив різних концентрацій рослинних інгредієнтів на показники якості пудингу та визначити оптимальні межі їх використання.

Для дослідження було сформовано 9 дослідних зразків пудингу, рецептурний склад яких відрізнявся вмістом насіння чіа та порошку кісточок малини (табл. 1). Молочну сироватку та сік манго використовували у співвідношенні 1:1, що забезпечувало поєднання молочного та фруктового смакового профілю.

Таблиця 1

Матриця експериментальних зразків пудингу

Зразок	Порошок кісточок малини, %	Чіа, %	Молочна сироватка : сік манго (1:1), %
S1	0,5	5,0	94,5
S2	1,0	5,0	94,0
S3	1,5	5,0	93,5
S4	0,5	10,0	89,5
S5	1,0	10,0	89,0
S6	1,5	10,0	88,5
S7	0,5	15,0	84,5
S8	1,0	15,0	84,0
S9	1,5	15,0	83,5

Приготування дослідних зразків пудингів здійснювали за єдиною технологічною схемою: молочну сироватку та сік манго змішували у співвідношенні 1:1. До отриманої суміші вносили порошок кісточок малини відповідно до рецептури. Насіння чіа попередньо гідратували у частині рідкої фази, після чого вводили до основної суміші. Суміш ретельно перемішували до однорідного стану. Зразки витримували за температури $(4 \pm 2) ^\circ\text{C}$ до повного формування структури пудингу.

Рецептурний склад пудингів, зокрема співвідношення рідкої фази (молочна сироватка : сік манго) та вміст рослинних інгредієнтів (насіння чіа і порошок кісточок малини), може істотно впливати на перебіг фізико-хімічних процесів у системі. Насіння чіа характеризується високою водоутримувальною здатністю, що потенційно змінює розподіл вільної та зв'язаної вологи, тоді як порошок кісточок малини, як джерело харчових волокон і біоактивних сполук, здатний впливати на концентрацію сухих речовин і кислотно-лужну рівновагу продукту.

У зв'язку з цим дослідження впливу варіювання рецептурних параметрів на фізико-хімічні показники пудингів є необхідним етапом для обґрунтування оптимального складу продукту. Середні значення фізико-хімічних показників представлено в табл. 2.

Таблиця 2

Фізико-хімічні показники якості пудингів

Зразок	Активна кислотність, од. рН	Масова частка сухих речовин, %	Вологоутримуюча здатність (ВУЗ), %
S1	$5,44 \pm 0,03$	$17,80 \pm 0,25$	$74,0 \pm 1,5$
S2	$5,06 \pm 0,03$	$18,40 \pm 0,30$	$76,0 \pm 1,6$
S3	$4,81 \pm 0,04$	$19,00 \pm 0,35$	$78,0 \pm 1,7$
S4	$5,36 \pm 0,03$	$20,60 \pm 0,40$	$84,0 \pm 1,8$
S5	$5,11 \pm 0,03$	$21,20 \pm 0,45$	$86,0 \pm 1,9$
S6	$5,01 \pm 0,04$	$21,90 \pm 0,50$	$88,0 \pm 2,0$
S7	$5,37 \pm 0,04$	$23,80 \pm 0,55$	$90,0 \pm 2,1$
S8	$4,98 \pm 0,04$	$24,60 \pm 0,60$	$91,0 \pm 2,2$
S9	$4,86 \pm 0,05$	$25,30 \pm 0,65$	$92,0 \pm 2,3$

Аналіз наведених даних (табл. 2) показує, що зі збільшенням вмісту рослинних інгредієнтів у рецептурі спостерігається загальна тенденція до зниження показника активної кислотності (рН), що є більш вираженим у зразках з підвищеною часткою насіння чіа та порошку кісточок малини. Мінімальні значення рН зафіксовано у зразках 3, 8 та 9, що може бути зумовлено внеском органічних кислот рослинної сировини та змінами кислотнo-лужної рівноваги внаслідок зв'язування води структуроутворюючими компонентами.

Паралельно зі зменшенням рН відмічено стійке зростання масової частки сухих речовин – від 17,80 % у зразку 1 до 25,30 % у зразку 9. Така закономірність безпосередньо пов'язана зі збільшенням вмісту насіння чіа та порошку кісточок малини, які є джерелами харчових волокон і здатні інтенсифікувати зв'язування води, зменшуючи частку вільної рідкої фази в системі.

Вологоутримуюча здатність пудингів зростала пропорційно до підвищення частки рослинних компонентів і змінювалася в діапазоні 74,0–92,0 %. Найнижчі значення ВУЗ характерні для зразків із мінімальним вмістом чіа (5 %), тоді як максимальні – для зразків із 15 % насіння чіа у поєднанні з 1,0–1,5 % порошку кісточок малини. Це підтверджує визначальну роль слизових полісахаридів чіа та харчових волокон малини у формуванні вологоутримуючих властивостей продукту.

Слід зазначити, що хоча підвищення ВУЗ позитивно впливає на стабільність структури пудингу, її надмірне зростання (зразки 8 і 9) може супроводжуватися надмірним ущільненням структури, що потенційно погіршує однорідність і сенсорні властивості продукту. Це узгоджується з результатами органолептичної оцінки.



Рис. 1. Зовнішній вигляд дослідних зразків пудингу

На рис. 1 представлено зовнішній вигляд і характер консистенції дослідних зразків пудингів на основі молочної сироватки з додаванням соку манго, насіння чіа та порошку кісточок малини за різного рецептурного складу.

Візуально всі зразки пудингів мають однорідний кремово-бежевий колір, зумовлений поєднанням молочної сироватки, фруктового компонента та рівномірно розподілених насінин чіа. За низького вмісту насіння чіа (5 %) спостерігається більш рідка, текуча консистенція, що проявляється у легкому розтікання продукту на поверхні ложки та менш вираженій здатності утримувати форму. Із підвищенням частки насіння чіа структура пудингів стає більш щільною та гелеподібною, що проявляється у здатності продукту утримувати форму при заборі ложкою та зменшенні вільної рідкої фази. Насіння чіа чітко візуалізується у вигляді набухлих гелеутворюючих часток, рівномірно розподілених по всьому об'єму продукту.

За максимального вмісту насіння чіа (15 %) та порошку кісточок малини (1,5 %) спостерігається надмірне ущільнення структури, зменшення пластичності та поява більш грубої текстури, що проявляється у підвищеній в'язкості й меншій кремоподібності продукту. Такі зразки характеризуються високою вологоутримуючою здатністю, що узгоджується з результатами фізико-хімічних досліджень (табл. 2).

Органолептичну оцінку якості проводили за п'ятибальною шкалою, де 1 бал відповідав дуже низькій якості показника, а 5 балів – оптимальному, найбільш бажаному рівню. Для побудови профілограми використовували середні значення балів за кожним органолептичним показником.

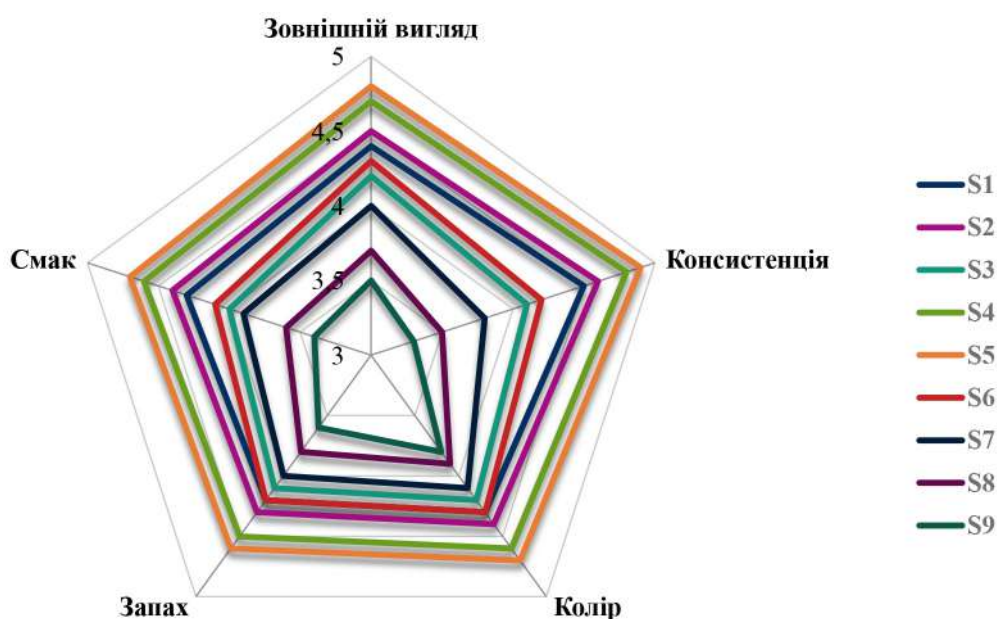


Рис. 2. Органолептична оцінка дослідних зразків пудингу

Побудована профілограма (рис. 2) показує, що найбільш гармонійний сенсорний профіль характерний для зразків 4 та 5, які мають високі та збалансовані оцінки за всіма органолептичними показниками. Зразки з підвищеним вмістом насіння чіа (15 %) демонструють зниження оцінок за показниками консистенції та смаку, що пов'язано з надмірним ущільненням структури продукту. Таким чином, профілограмний аналіз підтверджує результати фізико-хімічних і структурно-механічних досліджень та підтверджує доцільність використання 10 % чіа та 0,5–1,0 % порошку кісточок малини у рецептурі продукту.



Оскільки окремі показники якості характеризують різні аспекти властивостей продукту і мають різні одиниці вимірювання, для їх зіставлення було застосовано багатофакторний підхід, що передбачає нормування показників, розрахунок інтегрального показника якості, ранжування дослідних зразків. Такий підхід дозволяє об'єктивно оцінити якість продукту з урахуванням сукупності характеристик, а не окремих показників.

Для кількісної інтерпретації результатів комплексної оцінки якісні характеристики було переведено у числову форму за п'ятибальною шкалою. Це дало змогу уніфікувати різноманітні показники та забезпечити коректне порівняння дослідних зразків за інтегральним показником якості. Результати представлено в табл. 3.

Таблиця 3

Комплексна оцінка якості дослідних зразків пудингу

Зразок	Фізико-хімічні показники (бал)	Структурно-механічні властивості (бал)	Органолептична оцінка (бал)	Інтегральний показник якості (Q)	Ранг
S1	4	4	4	0,71	4
S2	4	4	4	0,74	3
S3	3	3	3	0,65	6
S4	5	5	5	0,89	2
S5	5	5	5	0,92	1
S6	4	3	3	0,73	5
S7	3	3	3	0,62	7
S8	3	2	2	0,55	8
S9	3	2	2	0,52	9

За результатами комплексної оцінки встановлено, що найвищі значення інтегрального показника якості отримали зразки S4 та S5, які характеризувалися оптимальним поєднанням фізико-хімічних, структурно-механічних та органолептичних властивостей.

Зразок S5 (10 % насіння чіа та 1,0 % порошку кісточок малини) продемонстрував найкращий баланс кремоподібної консистенції, стабільної структури та високої сенсорної привабливості, що дозволяє рекомендувати його як оптимальний рецептурний варіант.

Таким чином, комплексна оцінка якості підтвердила доцільність використання 10 % насіння чіа та 1,0 % порошку кісточок малини у складі пудингу на основі молочної сироватки, а також ефективність застосування багатокритеріального підходу для оптимізації рецептур харчових продуктів.

Розробка технології пудингу на основі молочної сироватки з додаванням рослинної сировини здійснювалася з урахуванням результатів фізико-хімічних та органолептичних досліджень, а також вимог до якості десертних продуктів функціонального призначення. На основі результатів комплексної оцінки якості як оптимальний обрано рецептурний склад представлений в табл. 4. Пудингу на основі молочної сироватки з додаванням рослинних компонентів присвоєно назву «ManChia».

Таблиця 4

Рецептурний склад пудингу «ManChia»

Інгредієнт	Вміст, г на 100 г продукту
Молочна сироватка	44,5
Сік манго	44,5
Насіння чіа	10,0
Порошок насіння малини	1,0

Розроблений пудинг характеризується однорідною гелеподібною або кремоподібною консистенцією, приємним фруктовим-молочним смаком і ароматом, високою вологоутримуючою здатністю та стабільною структурою, підвищеною харчовою цінністю за рахунок білків сироватки та харчових волокон рослинної сировини.

Висновки. Обґрунтовано доцільність використання молочної сироватки як основи для створення функціонального пудингу з додаванням насіння чіа, порошку кісточок малини та соку манго, що підвищують харчову й біологічну цінність та формують структурно-сенсорні властивості продукту. Встановлено істотний вплив рецептурного складу на фізико-хімічні показники пудингів: зі збільшенням частки рослинних інгредієнтів знижується активна кислотність, зростає масова частка сухих речовин і вологоутримуюча здатність. Доведено, що насіння чіа є основним структуроутворювачем, який забезпечує формування стабільної гелеподібною структури. Порошок кісточок малини у кількості 0,5–1,0 % позитивно впливає на властивості продукту без погіршення органолептичних показників, тоді як його надлишок може знижувати сенсорну привабливість. Органолептична та комплексна оцінка якості підтвердили оптимальність рецептури з 10 % насіння чіа та 1,0 % порошку кісточок малини. На основі отриманих результатів розроблено рецептуру виробництва пудингу на основі молочної сироватки з рослинною сировиною.

Список використаних джерел

1. Whey: Composition, Processing, Application, and Prospects in Functional and Nutritional Beverages – A Review / A. Mirzakulova et al. *Foods*. 2025. Vol. 14, no. 18. P. 3245. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods14183245>
2. Özer B., Evrendilek G. A. Whey beverages. *Dairy Foods*. 2022. P. 117–137. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-820478-8.00012-2>
3. Shrestha M., Shrestha S., Shrestha N. K. Chemical Composition, Health Benefits and Applications of Chia seeds: A Review. *Tribhuvan University Journal of Food Science and Technology*. 2022. P. 31–37. DOI: <https://doi.org/10.3126/tujfst.v1i1.49934>
4. Nonconventional Hydrocolloids' Technological and Functional Potential for Food Applications / S. V. Medina-López et al. *Foods*. 2022. Vol. 11, no. 3. P. 401. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11030401>
5. Sławińska N., Prochoń K., Olas B. A Review on Berry Seeds—A Special Emphasis on Their Chemical Content and Health-Promoting Properties. *Nutrients*. 2023. Vol. 15, no. 6. P. 1422. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu15061422>
6. Novgorodska N., Bernyk I. Drink based on milk whey with vegetable fillers. *Human and nation's health*. 2024. Vol. 2, no. 4. P. 18–27. DOI: <https://doi.org/10.31548/humanhealth.4.2024.18>
7. Skrypnichenko D. M., Kaziuk V. O., Bezzemelnyy O. M. The technology development of whey drinks with a sport purpose. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*. 2019. Vol. 4, no. 2. P. 122–127. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.4-2/20>
8. Технологія десертів функціонального призначення / А. В. Антоненко та ін. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. 2022. № 5. С. 27–37. DOI: <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.5.4>
9. Utilization of Whey: Sustainable Trends and Future Developments / N. Kumar et al. *Whey Valorization*. Singapore, 2023. P. 47–62. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-5459-9_3
10. Whey—A Valuable Technological Resource for the Production of New Functional Products with Added Health-Promoting Properties / E. Czarniecka-Skubina et al. *Foods*. 2025. Vol. 14, no. 24. P. 4258. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods14244258>
11. Phenolic compounds in mango fruit: a review / V. G. Tacias-Pascacio et al. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2021. Vol. 16, no. 1. P. 619–636. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11694-021-01192-2>
12. A Critical Review of the Health Benefits Associated with Chia Seeds (*Salvia Hispanica* L.) / Z. K. Al-Younis et al. *Plant Foods for Human Nutrition*. 2025. Vol. 80, no. 4. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11130-025-01401-z>
13. Impact of whole chia seeds (*Salvia Hispanica*) addition on the properties and stability of the set-type yogurt / K. Tazart et al. *The Annals of the University Dunarea de Jos of Galati. Fascicle VI – Food Technology*. 2023. Vol. 47, no. 1. P. 125–139. DOI: <https://doi.org/10.35219/foodtechnology.2023.1.08>



14. Ispiryan A., Kraujutiene I., Viskelis J. Quality Characteristics of Raspberry By-Products for Sustainable Production. *Foods*. 2024. Vol. 13, no. 10. P. 1436. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods13101436>

Дата першого надходження статті до видання: 24.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



T. Synenko, O. Koshel, A. Suprun, K. Omelchuk, D. Zavgorodnii
Sumy National Agrarian University

DEVELOPMENT AND COMPREHENSIVE QUALITY ASSESSMENT OF A WHEY-BASED PUDDING WITH ADDED PLANT-BASED INGREDIENTS

Summary

The paper substantiates the feasibility of using whey to create a functional pudding with plant ingredients. This study aimed to develop a recipe for a whey-based pudding incorporating mango juice, chia seeds, and raspberry seed powder, and to conduct a comprehensive quality assessment of the resulting product. The object of the study is milk whey pudding, and the subject is the influence of the recipe composition on quality indicators. A matrix of nine samples with different contents of chia seeds and raspberry seed powder was formed. Active acidity, mass fraction of dry substances, moisture retention capacity, and organoleptic properties were studied. The results were summarized using an integral quality indicator. It was found that increasing the content of chia seeds improves the structural properties of puddings, and raspberry seed powder in an amount of 0.5–1.0 % has a positive effect on the stability and nutritional value of the product. The optimal sample was determined to be 10 % chia seeds and 1.0 % raspberry seed powder.

Keywords: whey, pudding, chia seeds, raspberry seed powder, functional products, integral quality assessment.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-38>

УДК 664.68

С. В. Смірнов, аспірант

ORCID: 0009-0005-9083-2496

О. П. Прісс, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-6395-4202

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: ukrbread@gmail.com

МІКРОБІОЛОГІЧНА СТАБІЛЬНІСТЬ ПРЯНИКОВИХ ВИРОБІВ З НАЧИНКОЮ ПІД ЧАС ЗБЕРІГАННЯ

Анотація. Мікробіологічна стабільність пряників з начинкою визначається не лише середнім значенням активності води, а насамперед поєднанням локальної міграції вологи, контамінації після випікання та умов зберігання. Метою роботи було встановлення впливу міграції вологи та активності води в окремих шарах пряників з начинкою на їх мікробіологічну стабільність під час зберігання. Визначали активність води в начинці, шарі дотичному до начинки та коржі, а також вологість і мікробіологічні показники у свіжому продукті та після 120 діб зберігання за нерегламентованих температурно-вологісних умов. Протягом вказаного терміну зберігання, встановлено зниження a_w в усіх зонах виробу та зменшення вологості з 15,09 до 12,68 %. Після 120 діб виявлено дріжджі <5 КУО/г за відсутності плісневих і коліформ, що свідчить про початкову мікробіологічну дестабілізацію. Практичний контроль доцільно базувати на моніторингу a_w , вологості, дріжджів і санітарно-гігієнічних заходах.

Ключові слова: пряники з начинкою; активність води; міграція вологи; осмофільні дріжджі; мікробіологічна стабільність; термін придатності.

Постановка проблеми. Пряники належать до борошняних кондитерських виробів із відносно високою стабільністю під час зберігання завдяки підвищеному вмісту цукрів, спецій та порівняно невисокій активності води [1, 2]. Однак, використання фруктових, ягідних або горіхових начинок формує гетерогенну систему, у якій окремі шари відрізняються за вологістю, кислотністю та водозв'язувальною здатністю. За таких умов ризик псування визначається не стільки середнім значенням a_w для всього виробу, скільки локальними мікросередовищами на межі «корж–начинка», а також якістю санітарного контролю після випікання та реальними умовами зберігання [3, 4].

Як приклад, на рис. 1 наведено псування пряників через неналежні умови зберігання в торговельній мережі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних роботах щодо подовження терміну придатності борошняних виробів наголошено, що вирішальне значення для мікробіологічної стабільності мають не лише рецептурні чинники, а й процеси, що відбуваються після випікання [3, 4]. Для пряників описано наявність ксерофільних грибів, здатних розвиватися за знижених значень активності води (a_w), а зонами підвищеного ризику визначено охолодження та пакування [5]. Сорбційні властивості продукту, форма ізотерми та внутрішній перерозподіл вологи істотно впливають на локальну доступність води, а отже – і на потенціал росту мікроорганізмів [6, 7].

Окремі дослідження показали, що стабільність виробів з начинкою підвищується за рахунок контролю вмісту розчинних сухих речовин, кислотності, використання гумектантів, гідроколоїдів та бар'єрних матеріалів [8–11]. Разом із тим для пряників з начинкою недостатньо



Рис. 1. Ріст поверхневої плісняви на пряниках (пряники з вишневою начинкою – упаковані в поліпропіленовий пакет; третій місяць зберігання в літній період; недотримання рекомендованих температурно-вологісних умов у роздрібній мережі). Фото автора

дослідженими залишаються локальні зміни a_w у різних шарах виробу та їх зв'язок із ранніми мікробіологічними ознаками дестабілізації під час реального зберігання.

Формулювання мети статті. Метою роботи було встановлення впливу міграції вологи та активності води в окремих шарах пряників з начинкою на їх мікробіологічну стабільність під час зберігання. Для досягнення мети поставлено такі завдання: проаналізувати ключові ризики для пряників з начинкою; визначити a_w у різних шарах виробу, загальну вологість і мікробіологічні показники; оцінити практичне значення отриманих результатів для забезпечення стабільності під час зберігання.

Ключові чинники мікробіологічної нестабільності. Для пряників з начинкою найбільш значущими є три взаємопов'язані чинники. Перший – міграція вологи у системі «м'якуш–начинка». Вона зумовлена не лише градієнтом a_w , а й різницею у водозв'язувальній здатності компонентів, що може формувати локальні зони з підвищеним ризиком росту мікрофлори [5, 6]. Другий чинник – контамінація після випікання, оскільки саме повітря виробничого середовища, зони охолодження та пакування можуть бути джерелом спор грибів і дріжджів [5, 6]. Третій чинник – умови зберігання в поєднанні з бар'єрними властивостями упаковки: коливання температури та відносної вологості змінюють швидкість вологообміну через простір над упаковкою і здатні зміщувати систему в бік дестабілізації [5, 6, 9].

Рецептурні параметри начинки також мають принципове значення. Підвищений вміст сухих речовин, контрольована кислотність, використання гумектантів і гідрокоолоїдів дають змогу зменшити доступність води та уповільнити структурні зміни під час зберігання [8–10]. Тому оцінка стабільності пряників з начинкою має ґрунтуватися на поєднаному аналізі складу продукту, санітарії технологічного процесу та фактичних умов обігу.

Матеріали та методика досліджень. У дослідженні використовували м'які глазуrowані пряники з фруктовোю вишневою начинкою виробництва ТОВ «HD Bakery & Snacks», Україна. Для дослідження можливих причин мікробіологічного псування пряників з вишневою начинкою було проаналізовано два зразки: свіжий зразок пряників (С) та зразок із перевищеним

терміном зберігання (П). Останній зберігався протягом 120 діб з дати виробництва в оригінальній упаковці за умов, що не відповідали рекомендованому режиму зберігання. Рекомендовані умови передбачали температуру $(18 \pm 5) ^\circ\text{C}$ та відносну вологість не вище 75 %. Під час експерименту зразки перебували в умовах неконтрольованих коливань температури $(0 ^\circ\text{C} \leq T \leq 24 ^\circ\text{C})$ та відносної вологості $(55 \% \leq RH \leq 90 \%)$.

Активність води (a_w) зразків пряників визначали за допомогою приладу AquaLab 3TE. Кожне вимірювання проводили у трьох повторностях, і використовували середнє значення.

Масову частку води (%) визначали термогравіметричним методом при температурі висушування $102 \pm 2 ^\circ\text{C}$. За результат приймали середнє арифметичне двох паралельних визначень. Різниця між паралельними визначеннями не перевищувала 0,24 %.

Визначення кількості мезофільних аеробних та факультативно-анаеробних мікроорганізмів (МАФАНМ) ДСТУ 8446:2015 Продукти харчові. Методи визначення кількості мезофільних аеробних та факультативно-анаеробних мікроорганізмів.

Визначення бактерій групи кишкових паличок (коліформи) ДСТУ ISO 4832:2015 Мікробіологія харчових продуктів та кормів для тварин. Горизонтальний метод підрахування коліформ. Метод підрахування колоній (ISO 4832:2006, IDT)

Визначення плісневих грибів, дріжджів ДСТУ 8447:2015 Продукти харчові. Метод визначення дріжджів і плісневих грибів

Патогенні мікроорганізми, в т. ч. бактерії роду Сальмонела, ДСТУ EN 12824:2004 Мікробіологія харчових продуктів і кормів для тварин. Горизонтальний метод виявлення *Salmonella* (EN 12824:1997, IDT)

Результати досліджень та обговорення. Активність води обох зразків не перевищувала рівні, які вважаються критичними для мікробіологічної стабільності харчових продуктів (табл. 1).

Таблиця 1

Активність води та вміст води в пряниках «Вишневий сад»

Зразок	a_w	Вологість, %
Свіжий зразок	0,747	15,09
Після 120 діб зберігання	0,713	12,68

Однак це не гарантувало мікробіологічної стабільності продукту за умов порушення режимів зберігання (табл. 2).

Таблиця характеризує мікробіологічні показники продукту під час зберігання та їх відповідність чинним нормативним вимогам., а саме ДСТУ 4187:2003 Вироби кондитерські пряникові. Загальні технічні умови. Згідно з отриманими даними, кількість мезофільних аеробних та факультативно-анаеробних мікроорганізмів (МАФАНМ) на початку зберігання становила $5,0 \times 10^4$ КУО/г, що значно нижче встановленої норми $5,0 \times 10^5$ КУО/г. Після 120 діб зберігання цей показник зріс до $2,0 \times 10^5$ КУО/г, однак залишався в межах допустимого рівня.

Таблиця 2

Мікробіологічні показники пряників «Вишневий сад»

Показник	Норма за ДСТУ 4187:2003	0 діб	120 діб
Дріжджі, КУО/г, не більше	$5,0 \times 10^1$	0	<5
Плісняви, КУО/г, не більше	$5,0 \times 10^1$	0	0
Бактерії групи коліформних	Не дозволено в 0,1 г	Не виявлено	Не виявлено
Кількість мезофільних аеробних та факультативно-анаеробних мікроорганізмів, КУО/г, не більше	$5,0 \times 10^3$	$5,0 \times 10^1$	$2,0 \times 10^3$
Патогенні мікроорганізми, включаючи <i>Salmonella spp.</i> , у 25 г	Не дозволено	Не виявлено	Не виявлено

Бактерії групи кишкових паличок (коліформи) у зразках продукту не були виявлені ні на початку дослідження, ні після 120 діб зберігання, що відповідає вимогам нормативної документації (відсутність у 0,1 г продукту).

Плісєневі гриби протягом усього періоду зберігання не було виявлено, що свідчить про належний санітарний стан продукту. Також встановлено відсутність патогенних мікроорганізмів, зокрема бактерій роду *Salmonella*, у 25 г продукту як на початку зберігання, так і після 120 діб. Вміст дріжджів у досліджуваному продукті на початок зберігання не виявлено. Разом із тим після 120 діб зберігання у зразку з'явилися дріжджі < 5 КУО/г. Хоча це значення не перевищує допустимого рівня, сама поява дріжджів є важливим раннім індикатором початкової мікробіологічної дестабілізації за нестабільних температурно-вологісних умов [3, 4].

У поєднанні з даними табл. 1 це свідчить, що для дослідженого виду пряників найбільш чутливим маркером ризику є саме поява осмофільних дріжджів на тлі зміни вологості та зниження a_w , тоді як відсутність плісняв вказує на належний санітарний стан виробництва. Отже, практично важливо контролювати не лише кінцеву відповідність нормативам, а й динаміку показників у процесі зберігання.

Стратегії забезпечення мікробіологічної стабільності. З технологічної точки зору отримані результати підтверджують доцільність комплексного підходу до забезпечення стабільності пряників з начинкою. Насамперед доцільно проектувати начинку з контрольованими a_w , кислотністю та часткою розчинних сухих речовин; використовувати рецептурні компоненти, що зменшують втрати вологи та уповільнюють текстурні зміни в коржі; мінімізувати контамінацію після випікання у зонах охолодження та пакування; добирати пакувальні матеріали з урахуванням сорбційної поведінки виробу [5, 8–11]. Для виробничого контролю найбільш інформативним є сумісний моніторинг a_w , вологості та дріжджів у динаміці зберігання.

У таблиці 3 наведені узагальнені стратегії контролю пряників з начинкою, розроблені на підставі аналізу відомих досліджень

Висновки: 1. Для пряників з начинкою найважливішими чинниками мікробіологічної нестабільності є міграція вологи у системі «корж–начинка», контамінація після випікання та порушення температурно-вологісного режиму зберігання.

Таблиця 3

Узагальнення стратегій контролю псування пряників з начинкою

Стратегія	Основний механізм	Практичне рішення	Джерела
Зниження/ зв'язування води	Обмежує ріст грибів і сповільнює міграцію вологи	Фруктові начинки з високим вмістом сухих речовин (~65 % сухих речовин); гумектанти (гліцерин ≤ 5 %); гідроколоїди	[6, 12, 13]
Кислотність начинки	Пригнічує бактерії й частину грибів; підвищує ефективність консервантів	Цільове рН ~3,3–3,5 для фруктових начинок;	[8,13]
Цільові консерванти	Безпосереднє інгібування плісняв/дріжджів	Калію сорбат / натрію пропіонат; можливі комбінації з хітозаном	[8]
Гігієна та зонування	Зменшує спороносне навантаження та перехресну контамінацію після випікання	Очищення повітря у зоні охолодження; санітарія конвеєрів і пакування; мінімізація відкритого охолодження сиропів/розчинів	[5,8]
Бар'єрне/активне пакування й покриття	Контроль O_2 та вологи; можливе вивільнення антимікробних агентів	Плівки з вибірковою проникністю; їстівні покриття	[6, 10, 14]
Нетермічна поверхнева деконтамінація	Знижує початкове мікробне навантаження	УФ-С тунель перед пакуванням; САР-обробка виробу/пакування	[15, 16]
Опромінення (у пакуванні)	Глибоке знезараження; дуже довгий термін зберігання	Гамма-опромінення для спеціальних продуктів	[17]

2. Після 120 діб зберігання а_w знижувалася в усіх досліджених зонах виробу, а вологість зменшувалася з 15,09 до 12,68 %, що підтверджує перерозподіл і втрату вологи під час зберігання.

3. Попри відсутність коліформ, *Salmonella* spp. і плісняв, після 120 діб було виявлено дріжджі <5 КУО/г, що свідчить про початкову стадію мікробіологічної дестабілізації за порушення умов зберігання.

4. Перспективою подальших досліджень є локальний моніторинг а_w на межі «корж–начинка» у динаміці зберігання та узгодження рецептури й пакування з фактичними умовами обігу продукту.

Список використаних джерел

1. Machado, T., Pacheco, M., De Cássia Ramos Do Egypto Queiroga, R., Cavalcante, L., Bezerril, F., Ormenese, R., Garcia, A., Nabeshima, E., Pintado, M., & De Oliveira, M. Nutritional, physicochemical and sensorial acceptance of functional cookies enriched with xiquexique (*Pilosocereus gounellei*) flour. *PLoS ONE*. 2021. 16. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0255287>
2. Tulbure, A., Ognean, M., Ognean, C., & Danciu, I. Sorption Properties of Some Romanian Gingerbread. *Acta Universitatis Cibiniensis. Series E: Food Technology*. 2014. 18, 25 –32. DOI: <https://doi.org/10.2478/auaft-2014-0003>
3. Noshirvani, N., & Abolghasemi Fakhri, L.. Advances in extending the microbial shelf-life of bread and bakery products using different technologies: A Review. *Food Reviews International*. 2025. 41(1), 87–112. DOI: <https://doi.org/10.1080/87559129.2024.2386029>
4. De Carvalho, T., Silva, B., Tomé, E., & Teixeira, P. Preventing Fungal Spoilage from Raw Materials to Final Product: Innovative Preservation Techniques for Fruit Fillings. *Foods*. 2024. 13. <https://doi.org/10.3390/foods13172669>
5. Vytrasová J., Pribánová P., Marvanová L. Occurrence of xerophilic fungi in bakery gingerbread production. *International Journal of Food Microbiology*. 2002. 72,, 91–96. DOI: 10.1016/S0168-1605(01)00626-2
6. Cervenka L., Řezková S., Kralovský J. Moisture adsorption characteristics of gingerbread, a traditional bakery product in Pardubice, Czech Republic. *Journal of Food Engineering*. 2008. 84, 4. 601–607. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2007.06.014
- 7 Zardetto S., Dal Martello V., Pasini F. A model for moisture migration of packaged fresh-filled pasta during storage. *Food Research International*. 2025. 201. Article 116134. DOI: 10.1016/j.foodres.2025.116134
- 8 Rahman, M. N., Islam, M., Hasan, M. R., Alim, M. A., Begum, R., Li, S., Samapundo, S., Eeckhout, M., & Devlieghere, F. Evaluation of gingerbread spoilage factors: Study of fungal causative agents and tracing of their environmental sources. *Applied Research*. 2025. 4(5), Article e70039. <https://doi.org/10.1002/appl.70039>
9. Iorgachova, K., Makarova, O., & Khvostenko, K. (2014). Stabilisation Of Gummy Gingerbread Quality During Storage. *Eastern-European Journal of enterprise technologies*, 2(12). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2014. 2(12(68)), 4–9. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.23775>
10. Shulga, O., Chorna, A., & Kobylinskyi, S. Differential scanning calorimetry research of biodegradable films for confectionery and bakery products. *Chemistry & Chemical Technology*. 2017. 11(4), 492–496. <https://doi.org/10.23939/chcht11.04.49211>
11. Kovalchuk, K., Bodak, M., Katruk, M., Gyrka, O., Tkachenko, A., Guba, L., Havrylyshyn, V. Influence of raw materials on the change of crystal structure of gingerbread in the storage process. *Technology Audit and Production Reserves*. 2020. 1 (3 (51)), 53–57. <http://doi.org/10.15587/2312-8372.2>
12. Miquelim, J. N., Alcântara, M. R., & Lannes, S. C. S. Stability of fruit bases and chocolate fillings. *Food Science and Technology (Campinas)*. 2011. 31(1), 270–276. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612011000100041>
13. Слащева, А. В., Боднарчук, О. А., Закусило, Т. І., & Деньгуб, А. Д. Technology of thermo-resistant filling with bioprotective action for confectionery products. *Обладнання та технології харчових виробництв*. 2024. 49(2), 5–12. <https://doi.org/10.33274/2079-4827-2024-49-2-5-12>
14. Lee, K.-Y., & Robertson, G. L. Shelf-life estimation of packaged dried foods as affected by choice of moisture sorption isotherm models. *Food and Bioprocess Processing*. 2022. 132, 270–281. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2022.02.005>



15. Romano, R., Sannino, M., De Lorenzo, A., Masi, P., & Romano, P. Effect of UV-C treatment on shelf life of soft wheat bread (bun). *Foods*. 2024. 13(6), 949. <https://doi.org/10.3390/foods13060949>
16. Starek-Wójcicka, A., Sagan, A., Terebun, P., Kwiatkowski, M., & Pawlat, J. Pilot study on the use of cold atmospheric plasma for preservation of bread. *Scientific Reports*. 2022. 12, 22003. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26701-1>
17. Yusof, S. C. M., Mohamad, A., Nasir, M. H. A., George, C., & Wahab, A. A. Determination of the microbiological quality and acceptance of selected irradiated perishable food products during storage. *International Journal of Innovation and Industrial Revolution*. 2024. 6(19), 140–151. <https://doi.org/10.35631/IJIREV.619011>

Дата першого надходження статті до видання: 11.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.03.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



S. Smirnov, O. Priss
Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

MICROBIOLOGICAL STABILITY OF GINGERBREAD PRODUCTS WITH FILLING DURING STORAGE

Summary

The microbiological stability of filled gingerbread is determined not only by the average water activity value but primarily by the combination of local moisture migration, post-baking contamination, and storage conditions. The aim of the study was to determine the influence of moisture migration and water activity in individual layers of filled gingerbread on their microbiological stability during storage. Water activity was measured in the filling, in the layer adjacent to the filling, and in the cake layer, as well as moisture content and microbiological indicators in the fresh product and after 120 days of storage under non-regulated temperature and humidity conditions. During the specified storage period, a decrease in a_w in all zones of the product and a reduction in moisture content from 15.09 % to 12.68 % were observed. After 120 days, yeasts <5 CFU/g were detected in the absence of molds and coliforms, indicating initial microbiological destabilization. Practical control should be based on monitoring of a_w , moisture content, yeast counts, and sanitary-hygienic measures.

Keywords: filled gingerbread; water activity; moisture migration; osmophilic yeasts; microbiological stability; shelf life.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-39>

УДК 664.8.03:637.56:66.061

В. О. Сукманов, д-р техн. наук

А. А. Поліщук, д-р с.-г. наук

М. О. Ільченко, канд. с.-г. наук

Б. С. Шаферівський, канд. с.-г. наук

О. Г. Фесенко, канд. с.-г. наук

Полтавський державний аграрний університет

e-mail: sukmanovvaleri@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1248-4068

ORCID: 0000-0003-3572-8491

ORCID: 0000-0003-0163-1384

ORCID: 0000-0001-5742-5016

ORCID: 0009-0006-5047-7781

ПРОЛОНГАЦІЯ ТЕРМІНІВ ЗБЕРІГАННЯ РИБНИХ ПРОДУКТІВ ТА ФАРШУ СКУМБРІЇ (*SCOMBER SCOMBRUS*) ДОДАВАННЯМ ЕКСТРАКТУ КАРТОПЛЯНОЇ ШКІРКИ

Анотація. У статті досліджено ефективності використання екстрактів (водних, етанольних та субкритичних) з картопляної шкірки, як природнього антиоксиданта, при пролонгація термінів зберігання фаршу скумбрії (*Scomber scombrus*): визначено основні фенольні кислоти в екстрактах картопляної шкірки та загальний вихід фенольних сполук з шкірки картоплі; порівняно антиокидантні властивості екстрактів, отриманих за технологією мацерації (водної та етанольної) та екстрагування субкритичною водою; досліджено динаміку уповільненні окислення ліпідів, та білків у фарші з скумбрії шляхом визначення перекисного числа та концентрації токоферолу, вмісту карбонільних сполук у зразках фаршу; втрату флуоресценції триптофану та тирозину; кольору зразків та органолептичні показники фаршу та рибних ковбасок, виготовлених із нього.

Ключові слова: рибні продукти, рибний фарш, властивості фаршу скумбрії, термін зберігання, антиоксиданти, екстракти, окислення ліпідів та білків.

Постановка проблеми. Жирні види риби, в тому числі і скумбрія, мають велику харчову цінність завдяки вищому вмісту довголанцюгових омега-3 поліненасичених жирних кислот, які не виробляється в організмі людини самостійно, але які є ключовим структурним компонентом клітин мозку, сітківки ока та нервової системи. Епідеміологічні дослідження свідчать про те, що високе споживання цих жирних кислот пов'язане з низьким ризиком серцево-судинних захворювань, різних видів раку, діабету та психічних захворювань [1]. Незважаючи на ці очевидні переваги, однією з основних перешкод у вживанні жирної риби є те, що вона дуже схильна до окислення через наявність поліненасичених жирних кислот. Окислення ліпідів призводить до розвитку неприємного запаху, прогірклого смаку та зміни кольору [1, 2]. Більше того, сполуки, що утворюються в результаті окислення ліпідів, можуть модифікувати білки та амінокислоти, що мають поживне значення, та знижувати функціональність білка через його денатурацію [2].

Аналіз останніх публікацій. Споживання водних продуктів пов'язане з користю для здоров'я, оскільки це продукт, багатий на вітаміни, незамінні амінокислоти та поліненасичені жирні кислоти, а раціон із регулярним їх споживанням знижує ризики розвитку хронічних неінфекційних захворювань серцево-судинної, імунної та когнітивної систем [1, 2]. Термін придатності рибних продуктів є вирішальним моментом для споживача. Ряд властивих характеристик рибних продуктів сприяє прискоренню автолізу, таких як окислення ліпідів, структура м'язів, що сприяє росту мікробів, та інші механізми псування [3, 4].



Використання хімічних або штучних консервантів для контролю механізмів псування рибних продуктів та прагнення споживачів до здорового харчування порушили актуальні питання щодо ризиків використання синтетичних хімікатів [5, 6]. Як альтернатива, численні дослідження вказують на застосування природних сполук, таких як ефірні олії та рослинні екстракти з біоактивним потенціалом, як антиоксидантів та антимікробних засобів для майбутніх поколінь продуктів з чистою етикеткою. Позитивний вплив цих сполук головним чином пов'язаний з наявністю вторинних метаболітів, таких як фенольні кислоти, які демонструють взаємодію з ліпідним та білковим складом продуктів тваринного походження, що призводить до значних результатів у продовженні терміну придатності [7, 8]. Враховуючи, що споживачі рибних продуктів прагнуть до безпечного та здорового харчування, поєднання натуральних сполук для консервування риби, як правило, охоплює більше споживачів продуктів з екологічно чистим етикетуванням.

Нові підходи до зменшення використання синтетичних консервантів у консервуванні харчових продуктів привертають увагу до біоактивних сполук рослинного походження, особливо для застосування в продуктах, схильних до псування, таких як рибні продукти. Аналіз наявних публікацій надав уявлення про застосування біоактивних природних сполук у рибних продуктах [9]. Великий об'єм наявної інформації не дозволяє на сьогодні отримати обґрунтовані рекомендації про вибір рослинної сировини, методи вилучення цільових сполук та отримані позитивні ефекти їх застосування.

Різні методи екстракції та застосування біоактивних сполук рослинного походження призводять до різних ефектів, таких як зменшення окислення ліпідів, антимікробні ефекти та збереження сенсорних характеристик, що сприяє продовженню терміну придатності. Загалом, біоактивні сполуки рослинного походження є альтернативою для консервування рибних продуктів [10]. Серед потенційних джерел природних антиоксидантних сполук в першу чергу заслуговує на увагу вторинна сировина та відходи від діяльності агропромислового комплексу, що у повній мірі відповідає цілям сталого розвитку.

Картопля (*Solanum tuberosum*) є одним з найбільш поширених овочів у всьому світі. Шкірка є основним побічним продуктом картопляно-переробної промисловості, що становить серйозну проблему утилізації відходів для цієї галузі. Перетворення цього побічного продукту на продукти з доданою вартістю тому є цікавим для картопляної промисловості [11, 12]. Екстракти картопляної шкірки виявилися хорошим джерелом харчових волокон та багатими на фенольні кислоти, особливо хлорогенову, галову, протокатехову та кавову кислоти [13].

Доведено, що екстракти шкірки картоплі є ефективними у зменшенні перекисного окислення ліпідів як у риб'ячому жирі, так і в емульсіях «олія у воді» [14, 15]. Однак використання картопляних екстрактів як антиоксиданту у м'язах риби, які є складною сумішшю білків, ліпідів, прооксидантів, таких як гемоглобін, залізо, та антиоксидантів, таких як альфа-токофероли, аскорбінова кислота, ще не вивчалось.

Враховуючи відносно високу ефективність таким інноваційних методів екстрагування, як субкритичне екстрагування, та яке вже було застосовано для екстрагування біологічно активних речовин з картопляної шкірки [14], слід вважати, що дослідження, спрямовані на порівняльні дослідження при використанні екстрактів з картопляної шкірки, отриманих за різними методами екстрагування [16, 17] з метою пролонгація термінів зберігання рибних продуктів та фаршу скумбрії (*Scomber scombrus*) є актуальними.

Мета дослідження – оцінка ефективності використання екстракту картопляної шкірки, як природного антиоксиданта, при пролонгація термінів зберігання фаршу скумбрії (*Scomber scombrus*) та оцінка сенсорних властивостей рибних ковбасок, виготовлених з даної сировини.



Для досягнення даної мети було сформульовано та вирішено наступні завдання: визначити основні фенольні кислоти в екстрактах картопляної шкірки та загальний вихід фенольних сполук з шкірки картоплі; порівняти антиокисдантних властивостей екстрактів картопляної шкірки, отриманих за технологією мацерації (водної та етанольної) та екстрагування субкритичною водою; дослідити динаміку уповільненні окислення ліпідів, та білків у фарші з скумбрії шляхом визначення перекисного числа та концентрації токоферолу, вміст карбонільних сполук у зразках фаршу, втрату флуоресценції триптофану та тирозину; колір зразків та органолептичні показники фаршу та рибних ковбасок, виготовлених із нього.

Основна частина.

Використана сировина. Тушки скумбрії було придбано у ТОВ «Fish-Market». Маса тушки – 500–600 г, ціла, з головою та хвостом; країна походження – Ісландія, регіон вилову – FAO 27, Атлантичний океан; дата вилову та заморозки – весна 2025 року; спосіб заморозки – шокова (суха). Картоплю сорта Біла роса – високоврожайний ранній сорт картоплі, закуповували у супермаркеті «Метро» м. Полтава у травні 2025 року. Хімічні речовини та стандарти для продуктів окислення та фенольних сполук були аналітичного класу та придбані в ТОВ «Хімлаборреактив» (м. Бровари).

Приготування екстрактів картопляної шкірки. Картоплю промивали водопровідною водою та очищали вручну за допомогою кухонної овочечистки (середній вихід картопляної шкірки становив 12 %). Шкірку сушили в духовці з гарячим повітрям при температурі 45 °C протягом 72 годин та подрібнювали кухонним блендером до отримання часток з розміром $0,6 \pm 0,1$ мм. Для приготування водного екстракту у субкритичному середовищі було використано лабораторний реактор високого тиску РВД-2-500 (НПП «УКРОРГСИНТЕЗ», м. Київ, Україна) з магнітною мішалкою з підігрівом платформи РІВА – 04.3 (НПО «Оргсинтез», Україна) та компресором високого тиску «PCP ELECTRIC AIR» (Китай) (рис. 1) за методикою, викладеною у [18]. Дослідження було проведено у НДЛ «Субкритичні технології у харчових виробництвах» ПДАУ.

Екстрагент – дистильована вода. Екстракт відділяли від твердого залишку методом вакуумної фільтрації із використанням насосу Камовського, колби Бунзена, фільтр-паперу марки Ф. Екстракти висушували із використанням сушильної шафи Memmert UF 30. Для аналізу екстрактів використовували: рН-метр SevenCompact pH/Ion S220, аналітичні ваги XPE105 Mettler Toledo, електронні ваги XPR6002SDR/A, сушильну шафу Memmert UF 30, муфельну піч Nabertherm LT5/12, титратор автоматичний Excellence T5 та спектрофотометр UV-1800.

Для приготування етанольного екстракту 5 г порошкоподібної шкірки екстрагували 50 мл 96 % етанолу при кімнатній температурі протягом ночі та центрифугували при 2800 об/хв протягом 10 хвилин. Супернатант збирали в окрему пляшку, а залишок повторно екстрагували тричі за тих самих умов, що й вище. Об'єднаний фільтрат випарювали у роторному випарнику при температурі нижче 40 °C. Екстракт, отриманий після випаровування органічного розчинника, використовували як природний антиоксидант.

У випадку водного екстракту, 5 г порошкоподібної шкірки екстрагували протягом ночі 100 мл дистильованої води при кімнатній температурі та центрифугували при 2800 об/хв протягом 10 хвилин. Супернатант збирали в окрему пляшку, а залишок повторно екстрагували тричі за тих самих умов, що й вище. Об'єднані екстракти випаровували, висушували та зберяли при 4 °C для подальших досліджень.

Загальний вміст фенольних сполук в екстрактах визначали за допомогою реактиву Фоліна-Чокальтеу за методом, описаним у роботі [19]. Стандартну криву побудували з використанням різних концентрацій галової кислоти, а кількість загальних фенолів розраховували як еквіваленти галової кислоти в мг/100 г сухої картопляної шкірки. Ідентифікацію індивідуальних

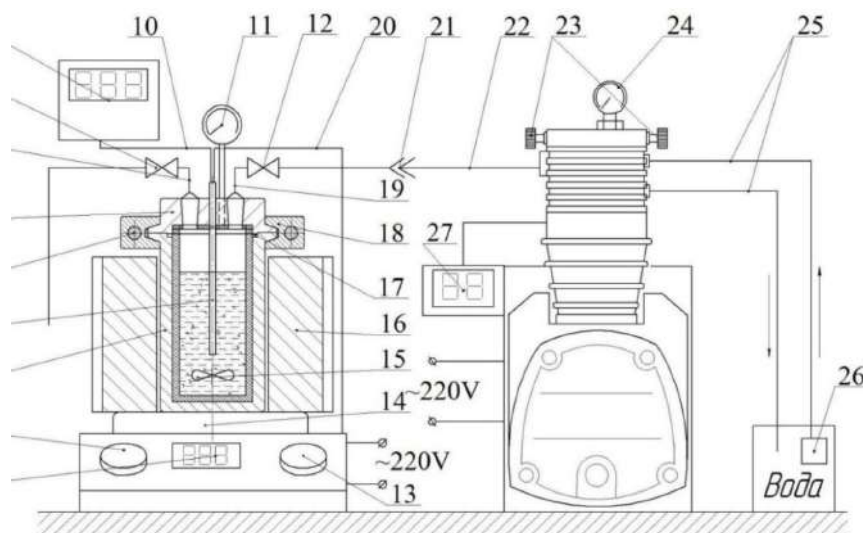


Рис. 1. Принципова схема установки для отримання екстрактів в середовищі субкритичної води

1 – дисплей магнітної мішалки; 2 – регулятор температури; 3 – стакан реактора; 4 – термopapa; 5 – гвинти; 6 – кришка стакану реактора; 7 – спускний канал; 8 – вентиль спускного каналу; 9 – додатковий датчик температури; 10 – провід додаткового датчика температури; 11 – манометр реактора; 12 – вентиль впускного каналу; 13 – регулятор магнітної мішалки; 14 – магнітна мішалка з підігрівом; 15 – елемент магнітної мішалки; 16 – термоблок; 17 – прокладка фторопластова; 18 – хомут; 19 – впускний канал; 20 – провід основного датчика температури; 21 – з'єднання високого тиску; 22 – шланг високого тиску; 23 – спускні гвинти компресора; 24 – манометр компресора; 25 – водопровід охолодження; 26 – насос системи охолодження компресора; 27 – датчик температури компресора

фенольних кислот проводили за процедурою, описаною в [19] з використанням ВЕРХ серії Agilent 1100 (Agilent Technologies, США).

Технологія виготовлення зразків фаршу скумбрії. Скумбрію розморожували, обезголювали, патрвали, розділяли на філе та вручну знімали шкіру; філе подрібнювали за допомогою кухонного блендера після додавання екстрактів водного (В), етанолового (Е) та субкритичного (СКВ) у концентрації 2,5 та 5 г/кг ставриди. Фарш без додавання будь-якого екстракту був виготовлений аналогічним чином і використовувався як контрольний. Щоб забезпечити рівномірний розподіл екстрактів по всьому фаршу, екстракти розчиняли у 5 мл дистильованої води та додавали до фаршу. У контрольному зразку додавали 5 мл дистильованої води без екстракту. Кожен з семи отриманих зразків (контроль, 2,5 В, % В, 2,5 Е, 5 Е, 2,5 СКВ та 5 СКВ) додатково розділяли на порції по 150 г та поміщали в алюмінієві коробки, закриті картонною та алюмінієвою кришкою. Коробки зберігали при температурі 5 °С протягом 96 годин. У кожену точку часу (Т0, Т24, Т48, Т72 та Т96) вміст коробок вакуумно пакували в поліетиленові пакети та зберігали при температурі 80 °С до подальшого аналізу. У час Т0 зразки вакуумно пакували в поліетиленові пакети та зберігали при температурі 80 °С одразу після подрібнення. Всі етапи обробки виконувалися в приміщенні з контрольованою температурою 2 °С.

Технологія виготовлення ковбасок з фаршу скумбрії. Було використано наступний рецептурний склад контрольного зразка: яйце куряче – 12 г/100г фаршу скумбрії; сало свіже – 16 г/100 г; олія соняшникова рафінована – 16 г/100 г; перець чорний мелотий – 1 г/100 г; сіль – 1 г/100 г; цибуля ріпчаста – 8 г/100 г відповідно. У фарш зразки ковбасок додавали водні, етанольні або субкритичні екстракти картопляної шкірки у кількості 2,5 та 5 г/100 г сировини. Інгредієнти вимішували, формували ковбаски, обвалювали у панірувальних сухарях, обсмажували до підрум'янення на пательні, а потім випікали у розігрітій духовці 15 хв при 200 °С. Готові

ковбаски охолоджували при кімнатній температурі до 50 °С, позначали тризначним кодом та надавали експертній комісії на дегустацію.

Вміст води визначали за різницею у вазі після сушіння приблизно 3 г зразка при 115 °С протягом 18 годин відповідно до [20]. Аналізи проводили у трьох повторностях, а результати виражали у г води на 100 г вологого зразка. рН зразків вимірювали за допомогою рН-метра Metrohm 780. Вимірювання кольору проводили за допомогою хроматометра Minolta (Cr-200, Minolta, Японія). Колір вимірювали у трьох різних місцях зразка, і кожне вимірювання складалося з 3 показників. Було розраховано середнє значення трьох вимірювань L , a та b .

Визначення загального вмісту ліпідів та перекисного числа (ПЧ). Загальні ліпіди екстрагували у трьох повторностях з 10 г зразка метанолом/хлороформом (1:1, об./об.) згідно з методом [21]. Вміст ліпідів визначали гравіметрично, а результати виражали у г ліпідів/100 г вологого зразка. ПЧ вимірювали безпосередньо на екстракті відповідно до методу [21].

Визначення вмісту токоферолу. Вміст токоферолу визначали в ліпідних екстрактах Блая та Дайєра за допомогою ВЕРХ з використанням ВЕРХ Agilent серії 1100 (Agilent Technologies, США), оснащеного флуоресцентним детектором, згідно з методом [22]. Результати виражені в 1 г токоферолу на грам фаршу.

Визначення карбонілів білка. Карбоніли білка вимірювали, як описано у роботі [23]. Зразок фаршу (0,5 г) гомогенізували у 10 мл трис-буфера (рН: 7,4, 50 мМ, 1 мМ ЕДТА), що містив 0,01 % ВНТ, та 200 мкл гомогенату осаджували 50 мкл ТСА (100 %). Після центрифугування (12 000 г, 3 хв) осад інкубували з 500 мкл 10 мМ динітрофенілгідразину (DNPH) у 2 М НСІ у темряві протягом 1 години. Для кожного зразка паралельно проводили холостий аналіз, інкубований у 2 М НСІ без додавання DNPH. Зразки осаджували 50 мкл ТСА (100 %), центрифугували (12 000 г, 3 хв), а гранули промивали тричі 1 мл суміші етанол/етилацетат 1:1 (об./об.). Гранули повторно розчиняли в 1 мл 6 М гуанідину хлориду в 20 мМ KH_2PO_4 . Вміст карбонілу визначали шляхом вимірювання поглинання при 370 та 280 нм відносно гуанідину як холостого розчину. Результати виражаються в нмолях карбонілу на мг білка.

Вимірювання флуоресценції триптофану та тирозину. Природну флуоресценцію триптофану та тирозину оцінювали за допомогою флуоресцентної спектроскопії. 1 г фаршу гомогенізували в 10 мл (1:10 мас./об.) 20 мМ натрій-фосфатного буфера (рН 6,5), що містить 0,6 М NaCl, за допомогою Polytron PT1200CL (Kinematica AG, Швейцарія) протягом 30 с. Гомогенати фільтрували через марлю для видалення нерозчинних речовин, і 250 мкл відфільтрованого гомогенату переносили на мікропланшети. Спектри випромінювання триптофану реєстрували від 300 до 500 нм з довжиною хвилі збудження, встановленою на 280 нм. Спектри випромінювання тирозину реєстрували від 300 до 500 нм з довжиною хвилі збудження, встановленою на 270 нм. Ширину щілини збудження та випромінювання встановлювали на 10 нм, а дані збирали зі швидкістю 500 нм/хв. Флуоресценцію триптофану визначали як одиниці інтенсивності флуоресценції, випромінювані при 350 нм, а тирозин – як інтенсивність флуоресценції, випромінювану при 310 нм. Відсоток (%) втрати флуоресценції розраховували як $(F_0 - F_{96})/F_0 \cdot 100$, де F_0 – інтенсивність флуоресценції в момент часу 0, а F_{96} – інтенсивність флуоресценції, випромінювану через 96 годин.

Сенсорне оцінювання зразків. Сенсорну оцінку дослідних разків фаршу проводила експертна комісія, що складалася з п'яти осіб. Фарш оцінювали на наявність запаху за дескрипторами «рибний», «прогірклий». Зразки оцінювали за шкалою інтенсивності від нульової до максимальної 9. Члени комісії оцінювали зразки індивідуально. Згодом комісія погодила середній бал для кожного дескриптора. Зразки по 20 г подавали у випадковому порядку після інкубації протягом 1 години при 5 °С.

Сенсорну оцінку ковбасок з розроблених зразків фаршу проводили з урахуванням вимог ДСТУ 8451:2015 «Риба та рибні продукти. Методи визначення органолептичних показників». Дегустаційну комісію (7 осіб) було створено на основі відбору дегустаторів з урахуванням їхньої індивідуальної чутливості, здатність тривалий час зберігати у пам'яті сенсорні характеристики еталонних зразків, володіти методологією оцінювання, а також мати професійну освіту. Для сенсорного оцінювання зразків ковбасок було використано 9-бальну шкалу (від 1 до 9), де кожен бал відповідав певному вербальному опису: 1 – не прийнятно; 2 – дуже не подобається; 3 – не подобається; 4 – помірно не подобається; 5 – нейтральний варіант уподобань (експерт не може визначитися); 6 – помірно подобається; 7 – подобається; 8 – дуже подобається; 9 – вища оцінка. Оцінювання було проведено за наступними показниками властивостей: зовнішній вигляд, колір, смак, запах, консистенція (структура), загальне сприйняття. Узгодженість між оцінками експертів, що характеризує їх рівень кваліфікації, було оцінено коефіцієнтом конкордації.

Всі визначення були у трьох примірниках. Для всіх статистичних аналізів використовувалося програмне забезпечення EXCEL.

Узагальнення та обговорення результатів експериментів.

Визначення раціональних параметрів субкритичного екстрагування. Аналіз інформації [24] дозволив нам обрати діапазон варіювання параметрів, вагомість впливу яких на ефективність субкритичного екстрагування розташована у наступному порядку: температура > тривалість процесу > розмір фракції > гідромодуль > тиск. У даному процесі тиск потрібний для підтримання води-розчинника у субкритичному стані та прискорення руйнування матриці сировини, тому, враховуючи аналіз апріорної інформації, значення тиску було прийнято на рівні 3 МПа. Гідромодуль та розмір фракції сировини непрямым чином впливають на тривалість процесу екстрагування, та враховуючи наші попередні дослідження було прийнято гідромодуль 1:20 та розмір часток шкірки картоплі – $0,6 \pm 0,1$ мм.

Результати досліджень впливу температури та тривалості субкритичного екстрагування шкірки картоплі на загальний вихід фенольних сполук наведені на рис. 2.

Узагальнення та аналіз отриманих результатів (рис. 2) дозволив обрати параметри температури (180 °C) та тривалість (40 хв.), які забезпечували максимальний загальний вихід фенольних сполук.

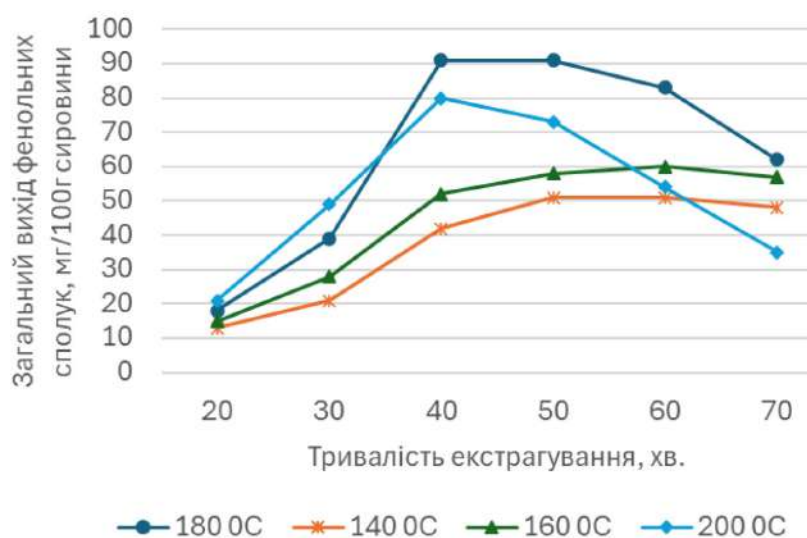


Рис. 2. Вплив параметрів екстрагування картопляної шкірки субкритичною водою на загальний вихід фенольних сполук

Аналіз загальної кількості та окремих фенольних сполук у екстрактах картопляної шкірки. Фенольні сполуки становлять одну з основних груп сполук, що діють як первинні антиоксиданти або термінатори вільних радикалів, і тому, на першому етапі досліджень, було визначено загальну кількість фенолів, а також вміст окремих фенольних кислот в екстрактах картопляної шкірки. Більший вміст фенольних сполук було отримано в субкритичних екстрактах ($95,7 \pm 0,6$ мг/100 г картопляної шкірки), що може бути пов'язано з властивостями субкритичної води як розчинника.

Етанольний екстракт містив більшу кількість загальних фенолів ($68,7 \pm 5,7$ мг/100 г картопляної шкірки) порівняно з водними екстрактами ($27,76 \pm 0,5$ мг/100 г картопляної шкірки). Цей висновок узгоджується з результатами, наведеними у роботі [25]. Ці результати можуть бути пов'язані зі здатністю етанолу вивільняти фенольні сполуки, приєднані до білків, але також може бути пов'язаний з вищою розчинністю певних фенольних сполук в етанолі, ніж у воді. Основні фенольні кислоти в екстрактах були ідентифіковані за допомогою ВЕРХ (табл. 1).

Таблиця 1

Основні фенольні кислоти в екстрактах картопляної шкірки (мг/г екстракту)

Фенольні кислоти	Розчинник		
	Вода, В	Етанол, Е	Субкритична вода, СКВ
Галлова кислота	$11,38 \pm 0,25$	$2,90 \pm 0,01$	$19,56 \pm 0,79$
Протокатехова кислота	$6,82 \pm 0,51$	$7,38 \pm 0,04$	$13,58 \pm 0,13$
Гентизинова кислота	$3,66 \pm 1,29$	$13,42 \pm 0,10$	$18,42 \pm 0,19$
Р-гідроксибензойна кислота	$4,76 \pm 0,29$	–	$5,12 \pm 0,22$
Хлорогенова кислота	$0,56 \pm 0,02$	$0,43 \pm 0,12$	$9,59 \pm 0,98$
Ванілова кислота	$0,45 \pm 0,09$	$1,10 \pm 0,08$	$2,02 \pm 0,10$
Сирингова кислота	–	$0,64 \pm 0,06$	$3,69 \pm 0,06$
Кавова кислота	$0,11 \pm 0,01$	$2,79 \pm 2,01$	$7,23 \pm 0,73$
Саліцилова кислота	–	$0,11 \pm 0,04$	$0,77 \pm 0,04$
Р-кумарова кислота	$0,05 \pm 0,01$	$0,58 \pm 0,09$	$11,18 \pm 0,16$
Ферулова кислота	$0,09 \pm 0,04$	–	$4,54 \pm 0,14$
Разом	27,76	31,35	$95,70 \pm 0,6$

Серед 3-х досліджуваних зразків, субкритичні екстракти містили максимум вихід всіх досліджуваних кислот. Як водні, так і етанольні екстракти містили високий рівень протокатехової кислоти. Водні екстракти містили значно вищий рівень галлової кислоти порівняно з відповідними етанольними екстрактами, тоді як етанольні екстракти показали вищий рівень гентизинової та кавової кислот. Р-гідроксибензойна кислота та ферулова кислоти були присутні лише у водних екстрактах, тоді як саліцилова та сирингова кислоти були присутні лише в етанольних екстрактах. Різниця у складі трьох екстрактів зумовлена різницею в розчинності цих фенольних сполук у субкритичній воді, та воді і етанолі при традиційному екстрагуванні. Отримані нами результати узгоджуються з матеріалами роботи [26], де повідомлялося, що розчинність фенольних сполук збільшується зі збільшенням температури.

Загальний склад фаршу. Вміст вологи та жиру у зразках фаршу коливався в межах 61,1–63,1 та 21,4–24,7 г/100 г відповідно, при їх значеннях у контрольному зразку – 61,9 та 22,9 г/100 г відповідно. Значення рН у всіх фаршах становило приблизно 6,07–6,10.

Окислення ліпідів під час зберігання при 5 °С. Результати досліджень динаміки ПЧ при зберігання дослідних зразків фаршу при 5 °С наведено на рис. 3.

При Т0 не було суттєвих відмінностей у значеннях ПЧ між зразками. У міру продовження зберігання зразків, ПЧ демонструвало поступове збільшення в контролі та у зразках з дода-

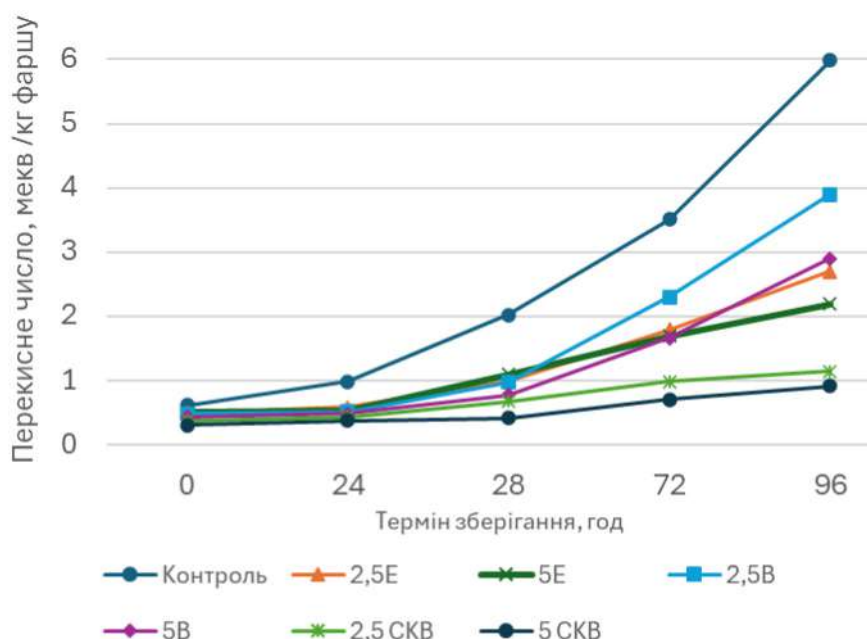


Рис. 3. Динаміки ПЧ при зберігання зразків фаршу при 5 °С

ними екстрактами. ПЧ контролю досягло 5,98 мекв/кг фаршу наприкінці періоду зберігання. Фарші з СКВ екстрактами після 96 годин зберігання мав 1,15 та 0,92 мекв/кг фаршу відповідно.

Після 48 годин зберігання зразків з водними та етанольними екстрактами спостерігалось значне збільшення значень ПЧ і його значення досягло 3,9 мекв/кг фаршу наприкінці періоду зберігання у водних екстрактах 2,5 г/кг, та 2,9 мекв/кг фаршу при додаванні 5 г/кг водного екстракту. Фарш з етанольними екстрактами 2,5 або 5 г/кг продемонстрував більшу стійкість до окислення завдяки нижчому значенню ПЧ у порівнянні з водними екстрактами, а наприкінці періоду зберігання ПЧ становило 2,7 та 2,2 мекв/кг фаршу при додаванні 2,5 або 5 г/кг екстрактів відповідно.

Динаміка вмісту α -токоферолу у зразках фаршу показано на рис. 4.

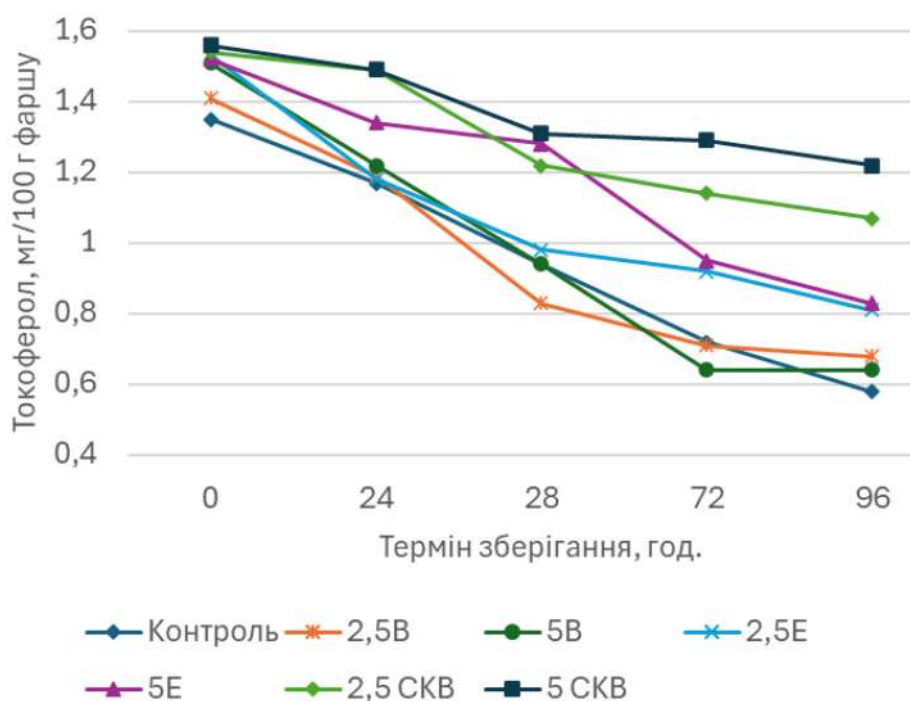


Рис. 4. Динаміка вмісту α -токоферолу при зберігання зразків фаршу при 5 °С



При Т₀ не було суттєвої різниці між концентраціями α -токоферолу в зразках фаршу та його значення знаходилося в межах 1,35–1,56 мг/100г фаршу. Використання екстрактів 2,5СКВ та 5СКВ забезпечило незначне зменшення вмісту α -токоферолу, яке склало після 96 годин зберігання 1,07 та 1,22 мг/100г фаршу відповідно.

На відміну від цього, спостерігалось значне зниження вмісту α -токоферолу в контролі та у фаршах, до яких додавали водні екстракти. Фарш, що містив 2,5 та 5 г/кг водних екстрактів, показав найнижчу концентрацію α -токоферолу наприкінці періоду зберігання: 0,68 та 0,64 мг/100г фаршу. Використання етанольних екстрактів забезпечило кінцеві значення вмісту α -токоферолу на рівні 0,81–0,83 мг/100г фаршу.

З цих результатів видно, що субкритичні екстракти були дуже ефективними у уповільненні окислення ліпідів рибного фаршу. Таким чином, загальний порядок окислювальної стабільності становить 5 СКВ > 2,5 СКВ > 5 Е > 2,5 Е > 5 В > контроль.

Отримані нами результати узгоджуються з роботою [25], де було виявлено, що етанольні екстракти мали вищу антиоксидантну активність порівняно з водними екстрактами при дослідженні емульгованих олій та роботою [27], де повідомляли, що етанольні екстракти картоплі ефективно уповільнюють окислення ліпідів у м'ясі ягнятини. Повідомлялося, що ліофілізований екстракт картопляної шкірки ефективно контролює окислення ліпідів та зміни кольору під час холодного зберігання яловичих котлет, хоча й меншою мірою, ніж порівняно з кореневищами імбиру та насінням пажитника [28]. Отримані нами результати свідчать, що субкритичні та етанольні екстракти картоплі запобігають окисленню ліпідів у такій чутливій до окислення системі, як фарш з скумбрії.

Наведені вище результати показують, що високий рівень інгібування окислення ліпідів у фарші скумбрії добре корелює з високим загальним вмістом фенолів у субкритичних та етанольних екстрактах. Окрім загального вмісту фенолів, окремі фенольні сполуки в екстрактах також відіграють важливу роль в їхній антиоксидантній активності. СКВ та етанольні екстракти містили значно вищі рівні кавової та гентизинової кислот і слідові рівні сиригової та саліцилової кислот порівняно з водними екстрактами.

Нижча ефективність водних екстрактів у уповільненні окислення ліпідів може бути пов'язана або з прооксидантним ефектом деяких спільно екстрагованих сполук, таких як аскорбінова кислота, або деяких фенольних сполук, які присутні у більших кількостях у водних екстрактах. Водні екстракти містили значно вищі рівні галової кислоти порівняно з етанольними екстрактами. У багатофазній системі, такій як рибний фарш, на антиоксидантну активність впливає кілька факторів, включаючи концентрацію антиоксидантів, розподіл антиоксидантів та взаємодію з іншими сполуками, такими як перехідні метали. Автори роботи [29] повідомляли, що галова кислота та епігалокатехін переважно локалізовані у водній фазі, і таким чином мають менший доступ до ліпідних пероксильних радикалів. Це може бути однією з причин нижчої ефективності водних екстрактів у запобіганні окисленню ліпідів порівняно з етанольними *nf* СКВ екстрактами. Однак, автори роботи [30] показали, що кавова кислота, незважаючи на її локалізацію у водній фазі, була ефективнішою у уповільненні перекисного окислення ліпідів у фарші ставриди, ніж інші гідроксикоричні та бензойні кислоти. Вони також припустили, що висока антиоксидантна ефективність пов'язана з відмінними відновлювальними властивостями кавової кислоти, а не з її металохелатною здатністю.

Зміни білка під час зберігання при 5 °С. Окислення ліпідів та білків каталізується одними й тими ж сполуками. Ці процеси можуть розвиватися незалежно або паралельно [31]. Більше того, ці два процеси можуть взаємодіяти один з одним. Таким чином, добре відомо, що радикали, гідропероксида та вторинні сполуки, що утворюються в результаті окислення ліпідів, реагують з білком, що призводить до втрати функціональності білка. Альдегіди, що утворю-

ються під час окислення ліпідів, можуть взаємодіяти з аміногрупами білка, утворюючи продукти основи Шиффа [32].

Утворення карбонільних сполук білка є однією з найважливіших змін, що відбуваються під час окислення білків та характеризує ступінь пошкодження білкових молекул (окиснення білків). Деякі основні амінокислоти, такі як лізин, гістидин, пролін та аргінін, утворюють карбонільні сполуки, і тому концентрація таких сполук є значущим показником окислювального статусу м'язових білків [33]. Динаміка вмісту карбонільних сполук білків при зберіганні зразках фаршу скумбрії показана на рис. 5.

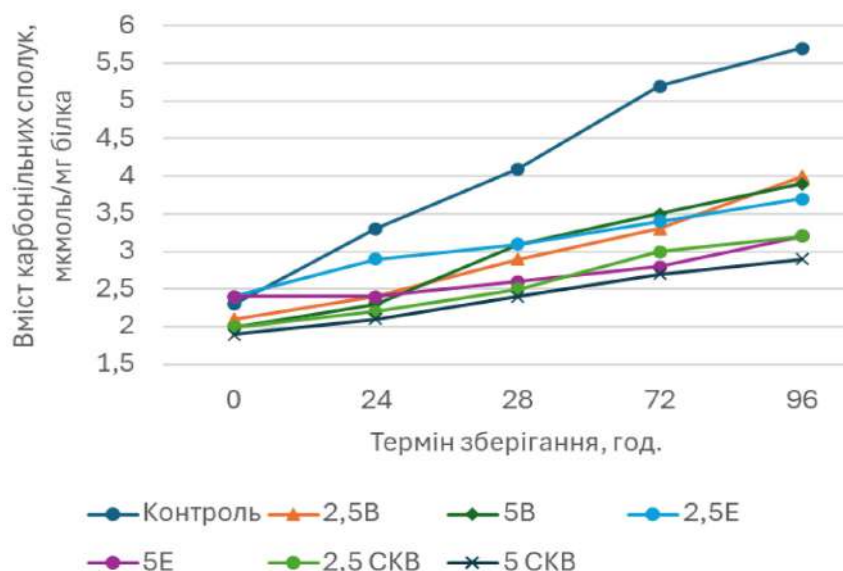


Рис. 5. Динаміка вмісту карбонільних сполук у зразках фаршу скумбрії

При T0 не було суттєвої різниці у вмісті карбонільних груп білків між групами обробки. У міру продовження зберігання окислення білка було очевидним за значним збільшенням вмісту карбонільних груп білків.

Наприкінці періоду зберігання контрольна група показала найвищий (5,7 ммоль/мг білка), а фарш з 2,5 та 5 г/кг СКВ екстрактів – найнижчий рівень вмісту карбонільних груп. Порядок захисту від утворення карбонільних сполук становив 5 СКВ > 2,5 СКВ > 5 Е > 2,5 Е > 5 В > 2,5 В > контрольна група. Утворення карбонільних сполук білка є другою ознакою окислення білка через взаємодію білків з вторинними продуктами окислення ліпідів. Найнижчий вміст карбонільних сполук у фарші з екстрактами 5 СКВ та 2,5 СКВ свідчить про потужну захисну роль цього екстракту проти окислення білків. Було виявлено, що деякі фенольні кислоти, фенольні дитерпени, флаванолі [34, 35] пригнічують утворення карбонільних сполук білка в м'ясних продуктах. Аналогічно, у нашому дослідженні також багаті на фенолі екстракти картопляної шкірки запобігали утворенню карбонільних білків і, таким чином, окисленню білків. Було висловлено припущення, що фенольні сполуки пригнічують окислення білків або шляхом уповільнення реакцій окислення ліпідів, або шляхом зв'язування з білками, або шляхом утворення комплексу з ними [35].

Наявність ароматичного кільця в залишках триптофану та тирозину відповідає за природну флуоресценцію, що випромінюється цими амінокислотами при 350 нм та 310 нм при збудженні при 280 та 270 нм відповідно. Флуоресценція триптофану та тирозину показує, як добре вона корелює з їх концентрацією та деградацією. Більше того, у роботі [36] було показано, що утворення бітрозину при окисленні радикалами зменшує флуоресценцію. Таким чином, зміни власної флуоресценції можна використовувати для моніторингу структурних

змін у білках. У нашому дослідженні спектр флуоресценції тирозину нагадував спектр триптофану, але інтенсивність флуоресценції тирозину була нижчою, ніж у триптофані при збудженні при 270 нм та 280 нм відповідно. Це може бути пов'язано з тим, що тирозин є слабшим випромінювачем, ніж триптофан. Флуоресценцію залишків триптофану та тирозину вимірювали та представляли у вигляді % втрати інтенсивності флуоресценції (рис. 6).

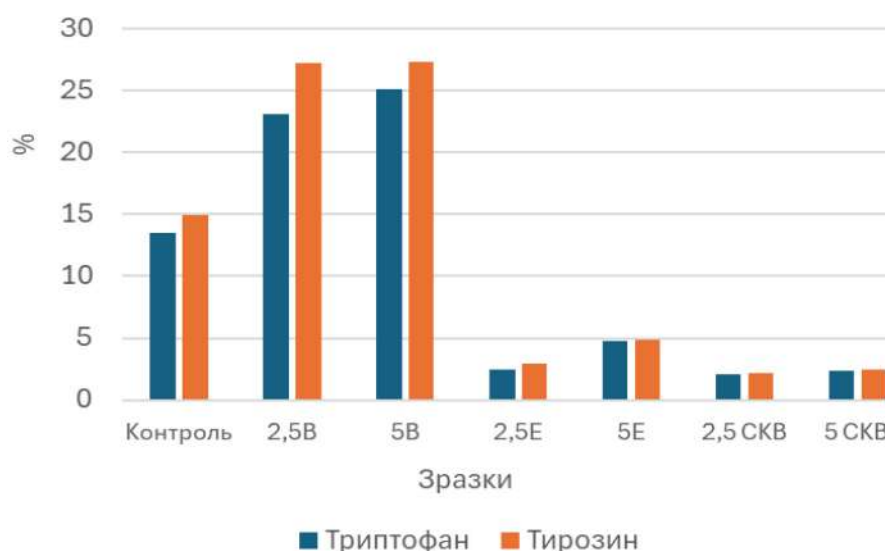


Рис. 6. Відсоток втрати флуоресценції триптофану та тирозину у фарші скумбрії при додаванні водних, етанольних та субкритичних екстрактів

Фарш з СКВ та етанольними екстрактами показав значно вищий захист від втрати флуоресценції триптофану та тирозину, тоді як фарш, що містив водні екстракти, показав значно нижчий захист від втрати триптофану та тирозину порівняно з контролем. Цей результат узгоджується з динамікою показника ПЧ. Наведені результати узгоджується з даними роботи [37], де показано, що втрата флуоресценції триптофану є ранньою подією окислення білка та слідує за первинними продуктами окислення. Зниження власної флуоресценції триптофану та тирозину можна пояснити фізико-хімічними змінами в білках, включаючи ті, що походять від окислятивного стресу. Різниця у відсотках втрат флуоресценції триптофану та тирозину у фарші скумбрії при додаванні водних, етанольних та субкритичних екстрактів може бути пов'язана з нижчим рівнем окислення ліпідів, що пояснюється високою концентрацією фенольних сполук, включаючи кавову кислоту, в цьому екстракті.

Серед гідроксикоричних кислот, кавова та хлорогенова кислоти, як повідомлялося, мають більш виражений антиоксидантний ефект щодо окислення триптофану [38]. Рослинні фенольні сполуки відомі як окисно-відновні сполуки, що проявляють антиоксидантну та прооксидантну дію залежно від їх концентрації та наявності інших окисно-відновних сполук. Отже, загальний ефект (антиоксидантний або прооксидантний) рослинних фенольних сполук значною мірою визначається балансом між антиоксидантною та прооксидантною дією. Вища втрата триптофану та тирозину у фаршах, що містять водні екстракти, узгоджується з вимірюванням ПЧ і може бути пов'язана з вищим окисленням ліпідів та/або прооксидантною дією певних фенольних сполук та коекстрагованих сполук на білки.

Колір. При дослідження кольору (світлота L^*), почервоніння a^* та жовтизна b^*) зразків фаршу спостерігалось значне зниження почервоніння у всіх групах, і контрольна група мала найменше почервоніння наприкінці терміну (рис. 7). Це вказує на те, що фарш, оброблений екстрактами, запобіг окисленню гемових білків, гемоглобіну та міоглобіну, які є червоними у відновленій

формі та коричневими в окисленій формі заліза. Не спостерігалось суттєвої зміни жовтизни у фарші з етанольними екстрактами, але контрольний варіант та фарш з водними екстрактами показали значне збільшення жовтизни при зберіганні.

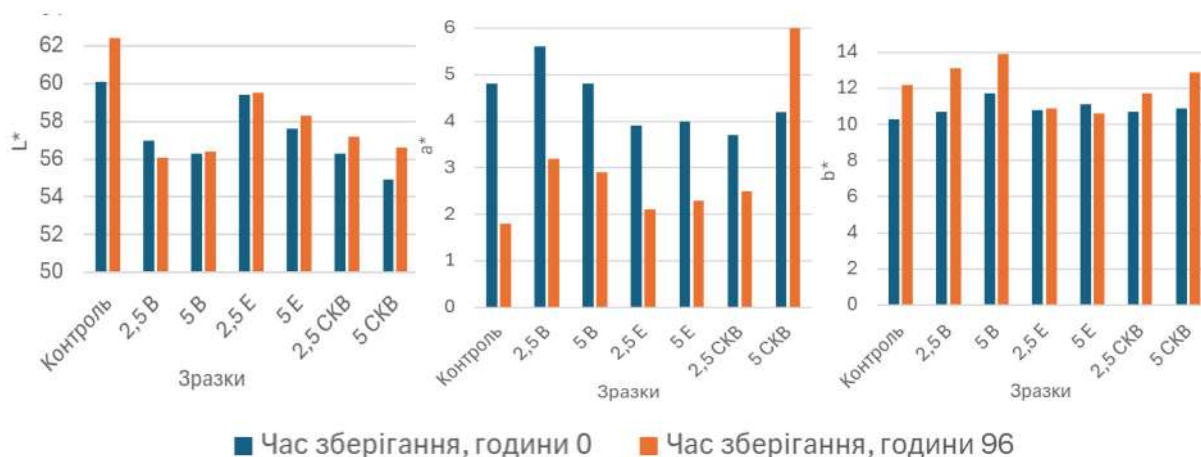


Рис. 7. Показники кольору досліджуваних зразків фаршу скумбрії

Збільшення жовтизни в контрольному та водному екстрактах може бути пов'язане зі збільшенням окислення ліпідів, і ці дані також добре корелюють зі значеннями ПЧ. Альдегіди, що утворюються в результаті окислення ліпідів, здатні дуже швидко модифікувати деякі амінокислотні залишки, такі як лізин, що утворює піроли, які за допомогою реакції полімеризації відповідають за зміни кольору. Хоча зміни кольору, пов'язані з окисленням ліпідів, повідомляються, зміни кольору в цьому дослідженні важко порівняти з окисленням ліпідів або білків, оскільки самі екстракти мають певний колір (жовтий для етанольних екстрактів і чорний для водних екстрактів) і можуть мати певний вплив на колір.

Сенсорний аналіз фаршу та рибних ковбасок з фаршу скумбрії. Згідно обраної методики, сенсорний аналіз фаршу було проведено з використанням дискрипторів запаху (рис. 8). Коефіцієнт конкордації, розрахований за результатами роботи експертної групи ($W = 0,78$) показав високий рівень узгодженості оцінок.

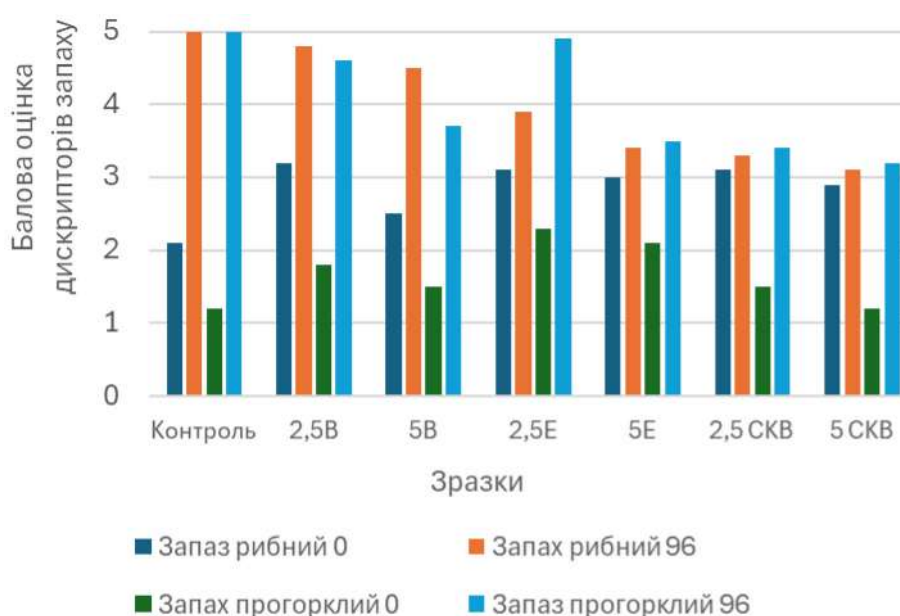


Рис. 8. Балова оцінка дискрипторів запаху досліджуваних зразків фаршу скумбрії

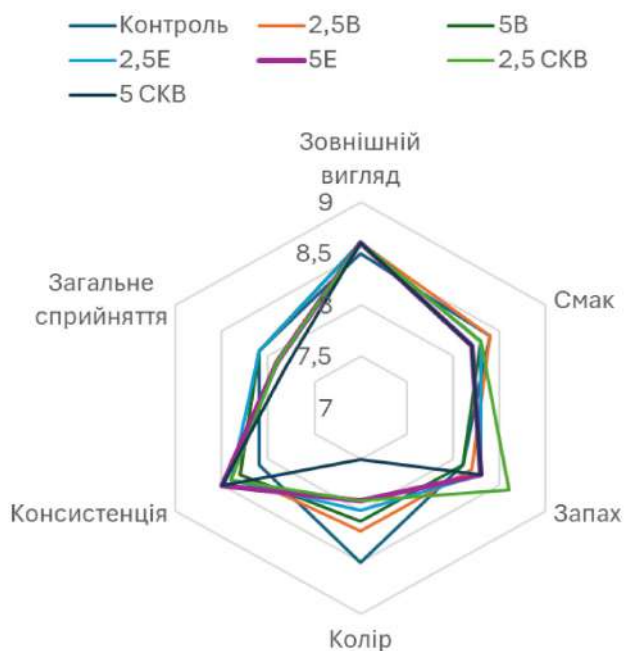


Рис. 9. Профілограма сенсорного оцінювання ковбасок з фаршу скумбрії, виготовлених із додаванням екстрактів картопляної шкірки

Загалом, спостерігалось збільшення рибного та прогірклого запахів для всіх зразків фаршу після зберігання. Дані сенсорного аналізу для фаршу погано корелюють з ПЧ та іншими параметрами окислення. Тим не менш, сенсорні дані також вказують на те, що 5 Е, 2,5 СКВ та 5 СКВ екстракти з картопляної шкірки потенційно можуть зменшити окислювальне погіршення смаку рибного фаршу.

На рис. 9 наведена профілограма показників сенсорного оцінювання ковбасок, виготовлених із розроблених зразків фаршу.

Аналіз результатів свідчить про несуттєве зменшення показника «смак» для ковбасок з 5 СКВ екстрактом (8,2 бали) у порівнянні з контролем (8,4 бали), зменшенні оцінок кольору з 8,5 до 7,5 та «загального сприйняття» з 8,1 до 7,8. В той же час, оцінка за «зовнішнім виглядом» підвищилася з 8,5 до 8,6; запаху – з 8,1 до 8,3. В цілому, всі досліджувані зразки ковбасок з екстрактами 2,5В, 5В та 2,5Е за показником «загального сприйняття» (8,1) відповідали контрольному зразку (8,1). Зменшення балів за даним показником для зразків ковбасок з екстрактами 5Е, 2,5СКВ та 5СКВ було несуттєвим (< 1 %).

Висновки. Екстракти з картопляної шкірки є ефективним природнім антиоксидантом при пролонгація термінів зберігання рибних продуктів та фаршу скумбрії (*Scomber scombrus*). Додавання субкритичних екстрактів з картопляної шкірки в концентрації 2,5 та 5 г/кг фаршу забезпечило найкращий захист від окислення ліпідів та білків у фарші скумбрії. Висока ефективність субкритичних та етанольних екстрактів корелювала з вищим загальним вмістом фенолів та кавової кислоти в цих екстрактах. Субкритичні та етанольні екстракти зменшують втрату токоферолу, що вказує на зберігання токоферолу фенольними сполуками. Водні екстракти показали нижчу ефективність та/або проокислювальну дію. Це може бути пов'язано з низьким вмістом фенолів та/або проокислювальною дією певних фенольних сполук та коекстрагованих сполук. Утворення карбонільних сполук білка є другою ознакою окислення білка через взаємодію білків з вторинними продуктами окислення ліпідів. Найнижчий вміст карбонільних сполук у фарші з екстрактами 5 СКВ та 2,5 СКВ свідчить про потужну захисну роль цих екстрактів проти окислення білків. Таким чином, результати цього дослідження свідчать

про те, що субкритичні та етанольні екстракти картопляної шкірки можуть бути використані як природний антиоксидант для запобігання окисленню ліпідів та білків рибного філе/фаршу скумбрії при охолодженню зберіганні.

Список використаних джерел

1. Chen J., Jayachandran M., Bai W., & Xu B. A critical review on the health benefits of fish consumption and its bioactive constituents. *Food Chemistry*, 2022. 369. 130874. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130874>
2. Longteng Zhang, Qian Li, Yulong Bao, Yuqing Tan, René Lametsch, Hui Hong, Yongkang Luo. Recent advances on characterization of protein oxidation in aquatic products: A comprehensive review. *Crit Rev Food Sci Nutr*. 2024;64(6):1572-1591. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2117788>
3. Sheng L., & Wang L. The microbial safety of fish and fish products: Recent advances in understanding its significance, contamination sources, and control strategies. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020. 20(1), 738–786. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12671>
4. Nie X., Zhang R., Cheng L., Zhu W., Li S., & Chen X. Mechanisms underlying the deterioration of fish quality after harvest and methods of preservation. *Food Control*, 2022. 135, 108805. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108805>
5. Liu R., & Mabury S. A. Synthetic phenolic antioxidants: A review of environmental occurrence, fate, human exposure, and toxicity. *Environmental Science & Technology*, 2020. 6. 54(19), 11706–11719. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c05077>
6. Xu X., Liu A., Hu S., Ares I., Martínez-Larranaga M. R., Wang X., et al. Synthetic phenolic antioxidants: Metabolism, hazards and mechanism of action. *Food Chemistry*, 2021. 15(353), 129488. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129488>
7. Basavegowda N., & Baek K. H. Synergistic antioxidant and antibacterial advantages of essential oils for food packaging applications. 2021. *Biomolecules*, 2, 11(9). 1267. DOI: <https://doi.org/10.3390/biom11091267>
8. Huang X., Lao Y., Pan Y., Chen Y., Zhao H., Gong L., et al. Synergistic antimicrobial effectiveness of plant essential oil and its application in seafood preservation: A review. *Molecules*, 2021. 26, 307. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules26020307>
9. Shahidi F., & Hossain A. Preservation of aquatic food using edible films and coatings containing essential oils: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2022. 62(1), 66–105. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1812048>
10. Leandro Presenza, Bianca Ferraz Teixeira, Juliana Antunes Galvao, Thais Maria Ferreira de Souza Vieira. Technological strategies for the use of plant-derived compounds in the preservation of fish products. Review. *Food Chemistry* 2023. 419. 136069. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136069>
11. Khanal S., Karimi K., Majumdar S. et al. Sustainable utilization and valorization of potato waste: state of the art, challenges, and perspectives. *Biomass Conv. Bioref.* 2024. 14, 23335–23360. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04521-1>
12. Nabia Ijaz, Shahid Bashir, Ali Ikram, Aimen Zafar, Huma Bader Ul Ain, Saadia Ambreen, Muhammad Ahmad, Riyadh S. Almalki, Muhammad Zubair Khalid, Waseem Khalid. Valorization of potato peel: a sustainable eco-friendly approach. Review Article. *CyTA – Journal of Food* 2024, Vol. 22, No. 1. DOI: <https://doi.org/10.1080/19476337.2024.2306951>
13. Salem M.A., Mansour H.E.A., Mosalam E.M. et al. Valorization of by-products Derived from Onions and Potato: Extraction Optimization, Metabolic Profile, Outstanding Bioactivities, and Industrial Applications. *Waste Biomass Valor* 2023. 14, 1823–1858. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12649-022-02027-x>
14. Franková H., Musilová J., Árvay J., Harangozo L., Šnirc M., Vollmannová A., Lidiková J., Hegedúsová A., Jaško E. Variability of Bioactive Substances in Potatoes (*Solanum tuberosum* L.) Depending on Variety and Maturity. *Agronomy*. 2022. 12. 1454. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12061454/>
15. Micael de Andrade Lima, Rafaela Andreou, Dimitris Charalampopoulos and Afroditi Chatzifragkou. Supercritical Carbon Dioxide Extraction of Phenolic Compounds from Potato (*Solanum tuberosum*) Peels. *Appl. Sci.* 2021, 11(8), 3410. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11083410>

16. Jimenez-Champi D., Romero-Oregon F. L., Moran-Reyes A., Muñoz A. M., Ramos-Escudero F. Bioactive Compounds in Potato Peels, Extraction Methods, and Their Applications in the Food Industry: A Review. *CYTA – J. Food* 2023, 21, 418–432. <https://doi.org/10.1080/19476337.2023.2213746>
17. Martínez-Inda B., Esparza I., Moler J.A., Jiménez-Moreno N., Ancín-Azpilicueta C. Valorization of Agri-Food Waste through the Extraction of Bioactive Molecules. Prediction of Their Sunscreen Action. *J. Environ. Manag.* 2023, 325, 116460. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116460>
18. Valerii O. Sukmanov, Olena V. Kovalchuk. Influence of extraction parameters on the properties of subcritical water extracts of soybean meal. *Journal of Chemistry and Technologies*. 2023. Vol. 31 No. 1. 72–81. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2022-311-4-256-264>
19. Valerii A. Sukmanov, Andrey V. Suprun. Extraction of biologically active substances from onion peel with the subcritical water in a static mode. *Journal of Chemistry and Technologies*. 2021. 29(2). 265–278. URL: <http://chemistry.dnu.dp.ua/issue/view/14066>
20. AOAC (1995). Official method of analysis (16th ed.). Arlington, VA, USA: AOAC.
21. Gotoh N., Miyake S., Takei H. et al. Simple Method for Measuring the Peroxide Value in a Colored Lipid. *Food Anal. Methods*. 2011. 4, 525–530. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12161-011-9193-5>
22. AOCS (1992). Official method Ce 8-89. Determination of tocopherols and tocotrienols in vegetable oils and fats by HPLC. Champaign, IL: AOCS.
23. Levine R. L., Williams J. A., Stadtman E. R., & Shacter E. Carbonyl assays for determination of oxidatively modified proteins. *Method in Enzymology*, 1994. 233, 346–357. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(94\)33040-9](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(94)33040-9)
24. J. Zhang, C. Wen, H. Zhang. Recent advances in the extraction of bioactive compounds with subcritical water: A review. *Trends in Food Science & Technology*. 2020. Vol.95. P. 183–195. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.11.018>
25. Habeebullah S. F. K., Nielsen N. S., & Jacobsen C. Antioxidant activity of potato peel extracts in a fish-rapeseed oil mixture and in oil-in-water emulsions. *Journal of American Oil Chemist's Society*, 2010. 87. 1319–1332. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11746-010-1611-0>
26. Mota F. L., Queimada A. J., Pinho S. P., & Macedo E. A. Aqueous solubility of some natural phenolic compounds. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2008. 47. 5182–5189. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie071452o>
27. Kanatt S. R., Chander R., Radhakrishna P., & Sharma A. Potato peel extract a natural antioxidant for retarding lipid peroxidation in radiation processed lamb meat. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 2005. 53. 1499–1504. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf048270e>
28. Mansour E. H., & Khalil A. H. Evaluation of antioxidant activity of some plant extracts and their application to ground beef patties. *Food Chemistry*. 2000. 69. 135–141. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(99\)00234-4](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(99)00234-4)
29. Rice-Evans C. A., Miller N. J., & Paganga G. Antioxidant properties of phenolic compounds. *Trends in Plant Science Reviews*, 1997. 2, 152–159. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(97\)01018-2](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(97)01018-2)
30. Medina I., Gallardo J. M., Gonzalez M. J., Lois S., & Hedges N. Effect of molecular structure of phenolic families as hydroxycinnamic acids and catechins on their antioxidant effectiveness in minced fish muscle. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007. 55. 3889–3895. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf063498i>
31. Karel M., Schaich K., & Roy R. B. Interaction of peroxidizing methyl linoleate with some proteins and amino acids. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1975. 23. 159–163. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf60198a046>
32. Guadalupe López-García, Octavio Dublan-García, Daniel Arizmendi-Cotero, Leobardo Manuel Gómez Oliván. Antioxidant and Antimicrobial Peptides Derived from Food Proteins. *Molecules*. 2022 Feb 16;27(4):1343. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27041343>
33. Dalle-Donne I., Rossi, R., Giustarini D., Milzani A., & Colombo R. Protein carbonyl group as biomarkers of oxidative stress. *Clinica Chimica Acta*, 2003. 329. 23–38. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0009-8981\(03\)00003-2](https://doi.org/10.1016/S0009-8981(03)00003-2)
34. Vuorela S., Salminen H., Mäkelä M., Kivikari R., Karonen M., & Heinonen M. Effect of plant phenolics and protein and lipid oxidation in cooked pork meat patties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2005. 53(22). 8492–8497. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf050995a>
35. Salminen H., Estevez M., Kivikari R., & Heinonen M. Inhibition of protein and lipid oxidation by rapeseed, camelina and soy meal in cooked pork meat patties. *European Food Research and Technology*, 2006. 223(4). 461–468. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00217-005-0225-5>



36. Davies K. J. A., Delsignore M. E., & Lin S. W. Protein damage and degradation by oxygen radicals. I. Modification of amino acids. *Journal of Biological Chemistry*. 19. 87262. 9902–9907. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(18\)48019-2](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(18)48019-2)
37. Rampon V., Lethuaut L., Mouhous-Riou N., & Genot C. Interface characterization and aging of bovine serum albumin stabilized oil-in-water emulsions as revealed by front-surface fluorescence. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2001. 49. 4046–4051. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf001170y>
38. Salminen H., & Heinonen M. Plant phenolics affect oxidation of tryptophan. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2008. 56(16). 7472–7481. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf800708t>

Дата першого надходження статті до видання: 10.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



V. Sukmanov, A. Polishchuk, M. Ilchenko, B. Shaferivskyi, O. Fesenko
Poltava State Agrarian University

PROLONGATION OF SHELF LIFE OF FISH PRODUCTS AND MACKEREL (*SCOMBER SCOMBRUS*) MIXED BY ADDING POTATO PEEL EXTRACT

Summary

The article investigates the effectiveness of using extracts (aqueous, ethanolic and subcritical) from potato peels in prolonging the shelf life of minced mackerel. Subcritical extraction of potato peels 0.6 ± 0.1 mm. at 180°C , hydromodulus 1:20 and 40 min. provided the maximum yield of total phenolic compounds at the level of 95.7 ± 0.6 mg/100 g of raw material; The antioxidant properties of extracts obtained by maceration technology (aqueous and ethanolic) and extraction with subcritical water were compared. The peroxide value of minced mackerel with the addition of 2.5 and 5 g of subcritical extract per 100 minced meat after 96 hours of storage was 1.15 and 0.92 mEq/kg of minced meat, respectively, with 5.98 for the control sample. The use of subcritical extracts compared to aqueous and ethanolic extracts ensured maximum preservation of α -tocopherol, (1.07 and 1.22 mg/100g of minced meat). At the end of the storage period, the control group showed the highest (5.7 mmol/mg protein), and minced meat with 2.5 and 5 g/kg of subcritical extracts showed the lowest level of carbonyl groups (3.2 and 2.9 mmol/mg protein), respectively. Subcritical and ethanolic extracts reduced the loss of tocopherol. Evaluation of the color of minced meat samples indicated that the addition of extracts prevented the oxidation of heme proteins, hemoglobin and myoglobin, which are red in the reduced form and brown in the oxidized form of iron. No significant change in yellowness was observed in minced meat with ethanolic extracts, but the control and minced meat with aqueous extracts showed a significant increase in yellowness during storage.

Sensory evaluation of minced meat using odor descriptors and fish sausages according to the following indicators: appearance, color, taste, odor, consistency (structure) and overall perception, indicate that subcritical and ethanolic extracts of potato peel can be used as a natural antioxidant to prevent lipid and protein oxidation of minced mackerel fish during refrigerated storage.

Keywords: fish products, minced fish, properties of minced mackerel, shelf life, antioxidants, extracts, lipid and protein oxidation.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-40>

УДК 663.16:631.563:664.8

В. О. Троєкурова, асистент

В. С. Калина, канд. техн. наук, доцент

М. В. Денисенко, аспірант

Дніпровський державний аграрно-економічний університет

e-mail: miss.troekurova@gmail.com

ORCID: 0009-0002-9117-696X

ORCID: 0000-0002-3061-3313

ORCID: 0009-0000-4563-2499

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ І ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ ЗЕРНА ЯЧМЕНЮ В ОХОЛОДЖЕНОМУ СТАНІ: ВПЛИВ НА ОРГАНОЛЕПТИЧНІ ТА ФІЗИЧНІ ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ

Анотація. У роботі обґрунтовано доцільність застосування охолоджуючого режиму зберігання зерна ячменю продовольчого 1-го класу та визначено вплив на показники якості і тривалість безпечного зберігання. Досліджено зміни вологості, температури зернової маси і навколозернового простору за традиційної технології та за умов штучного охолодження у сховищах підлогового типу. Проаналізовано якість зерна до і після зберігання у виробничих та лабораторних умовах: органолептичні та фізичні показники якості. Встановлено, що при застосуванні охолодження показники якості залишалися стабільними тривалістю усього періоду зберігання; відсутність пророслого зерна та шкідників підтверджує ефективність режиму. Незначне зростання натурної маси свідчить про інтенсифікацію післязбиравального дозрівання. Рекомендовано впровадження способу зберігання зерна ячменю в охолоджену стані з періодичністю охолодження один раз на місяць як енергоощадної альтернативи сушінню та активному вентильованню.

Ключові слова: ячмінь, зернова маса, режими зберігання зерна, технологія охолодження, штучний холод, органолептичні та фізичні показники якості.

Постановка проблеми. Пріоритетним напрямком розвитку підприємств зернопереробної галузі є освоєння інноваційних систем і технологій з метою подовження терміну зберігання зернових продуктів в умовах, несприятливих для розвитку шкідників зернової маси та негативних фізичних явищ, які впливають на її якість.

Зерно ячменю є стратегічною сировиною для харчової, кормової та броварної промисловості, проте його біологічна активність під час післязбиравального дозрівання створює ризики інтенсивного самозігрівання, а також розвитку шкідників хлібних запасів та патогенної мікрофлори. Традиційні методи зберігання не завжди забезпечують стабільність якісних показників, особливо в умовах нестабільних температур навколишнього середовища та несприятливих погодних умов.

Основна проблема полягає в тому, що інтенсивне дихання зернової маси та активність ферментів призводять до незворотних змін у хімічному складі: розпаду крохмалю, окиснення ліпідів та денатурації білків. Це, у свою чергу, провокує погіршення органолептичних характеристик (поява сторонніх запахів, втрата природного блиску) та зниження фізико-хімічних показників якості, таких як енергія проростання та натурна маса.

Аналіз останніх досліджень. На інтенсивність процесу дихання зерна впливає багато факторів. З підвищенням вологості процес дихання зернової маси суттєво збільшується. Зерно вологістю 14...15,5 % дихає в 2...4 рази інтенсивніше, ніж сухе, а інтенсивність дихання вологістю вище 17 % і вище зростає в 20...30 разів. Збільшення вмісту вологи в зернівці призводить до стрибкоподібної активації дихального катаболізму. Це зумовлено зміною форм зв'язку

вологи з біополімерами зерна: досягнення критичної межі супроводжується накопиченням вільної вологи, яка стає доступним середовищем для ферментативних реакцій. Саме цей стан визначає перехід зерна з фази фізіологічного спокою до активного енергообміну [1, 7].

Ключовим параметром, що підлягає контролю безпосередньо під час приймання зернової маси, є вологість, оскільки вона детермінує частку сухих речовин та потенційну тривалість зберігання продукції. Оптимальний рівень вологості є вирішальним чинником забезпечення стійкості зерна до псування. Встановлено обернену залежність: підвищення вмісту вологи призводить до зниження концентрації поживних нутрієнтів та інтенсифікації фізіологічних і фізико-хімічних процесів, що негативно впливає на якісні показники сировини [2].

Ще одним важливим фактором, який впливає на інтенсивність дихання зерна є температура. При постійній вологості інтенсивність дихання зерна буде тим вищою, чим більша температура. Однак, стимулююча дія температури проявляється лише до певної межі (близько 45...55 °C), а при подальшому її рості дихання знижується. Це відбувається тому, що високі температури призводять до денатурації білка [1, 3].

Сучасні тенденції в елеваторній промисловості спрямовані на впровадження енергоефективних та екологічно безпечних технологій. Охолодження зернової маси є одним із найбільш перспективних методів, оскільки дозволяє перевести зерно у стан анабіозу, що мінімізує інтенсивність біохімічних процесів [4, 8].

Незважаючи на наявні дослідження в галузі консервації холодом, залишаються недостатньо вивченими наступні аспекти:

- оптимальні температурно-вологісні режими саме для ячменю різних цільових призначень;
- динаміка зміни органолептичних показників (колір, запах, блиск) при тривалому зберіганні в охолодженому стані;
- вплив параметрів охолодження на активність ферментних систем та фізико-хімічні константи (кислотне число жиру, вміст крохмалю, енергія проростання).

Через значний вплив змін у середовищі зберігання на якість зерна, зерносховища застосовують різні технології для регулювання умов з метою ефективного зменшення втрат під час зберігання, забезпечення відсутності шкідників та цвілі, збереження свіжості та високої якості зерна. Виходячи з прагнення споживачів до здорового харчування та важливості захисту навколишнього середовища в різних країнах світу, безпечне зберігання зерна є дуже популярним у всьому світі; ця технологія не використовує синтетичних хімікатів та характеризується технологіями зберігання зерна за низьких температур та контрольованої атмосфери [5].

Технологія низькотемпературного зберігання зерна переважно використовує природне або штучне охолодження під час процесу зберігання, щоб підтримувати зерно на складі при нижчій температурі, запобігаючи або уповільнюючи вторгнення шкідливих організмів та погіршення якості. Виходячи з кліматичних характеристик місцевостей для зниження температури зернових мас часто використовують методи: оновлення теплоізоляції складів, герметичне консервування у полімерні рукави, природне або механічне охолодження. Аналіз проведених наукових досліджень якісних характеристик різного роду зенових культур в умовах низькотемпературного зберігання з використанням холодного повітря навколишнього середовища взимку показали, що порівняно зі зберіганням при звичайній температурі, метод використання охолодженого повітря краще підтримував схожість та якість зерна, викликав менші зміни фізіологічної активності та призвів до меншої втрати зерна [6].

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою роботи є встановлення доцільності застосування охолоджуючих режимів зберігання зерна, а також їх вплив на зміну якості зерна та тривалість його безпечного зберігання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- визначити показники якості зерна ячменю продовольчого 1-го класу при зберіганні його у звичайних виробничих умовах хлібоприймального підприємства;
- визначити показники якості даного виду зерна в лабораторних умовах при певній температурі та вологості;
- встановити вплив температурних умов на збереженість зернової маси та зміну показників якості зерна при тривалому зберіганні;
- дослідити технологію охолодження зерна у сховищах підлогового типу зберігання;
- визначити оптимальні режими та параметри процесу зберігання зерна ячменю в умовах штучного охолодження.

Основна частина. Для здійснення досліджень використовували дослідні зразки ячменю продовольчого 1 класу сорту «Сталкер» – це еталонний сорт ярого ячменю української селекції, який цінується аграріями за феноменальну посухостійкість та стабільну врожайність (до 7–8 т/га) навіть в екстремальних умовах південного Степу.

В ході досліджень визначено перелік та послідовність необхідних технологічних прийомів щодо організації зберігання зерна ячменю: приймання, сушіння, вентильовання, зберігання.

Технологічний процес приймання та зберігання зерна ячменю здійснювали на підприємстві ТОВ «НЕЗАБУДИНСЬКИЙ ЕЛЕВАТОР». Під час зберігання зерна визначено показники якості, що представлено в табл. 1.

Паралельно до звичайних умов зберігання на підприємстві зразки зерна зберігали в приміщенні навчальної лабораторії, де підтримували низькі температури (від +4 до +8 °C). Для зберігання зерна використовували герметичну тару, а для страхування охолодження – охолоджуючий вентилятор «Beurer LV 50».

Результати досліджень вимірювання температури та вологості зразків зерна представлено в таблиці 2.

Періодичність вимірювань встановлювали за найбільш високою температурою, виявленою хоча б в одному із шарів насипу. Перевіряючи температуру зернового насипу, звертали увагу на ту частину, яка знаходиться ближче до південних стін складу, оскільки ці сторони зерносховищ нагріваються особливо інтенсивно, що може створювати сприятливі умови для життєдіяльності мікроорганізмів і шкідників в зерновій масі.

Графічне представлення результатів дослідження зміни температури та вологості ячменю при зберіганні у звичайних умовах підприємства та в експериментальних умовах (рис. 1, 2).

Аналізуючи графіки залежності зміни вологості зерна від його температури можна зробити висновок, що зерно яке постійно перебуває в охолодженому стані є більш стабільним при зберіганні. Це дозволяє знизити затрати на зниження вологості, оскільки можна проводити охолодження один раз на місяць. За звичайних умов зберігання застосовують сушіння та активне вентильовання, але ці операції доводилося проводити відносно часто.

Кондиційне зерно ячменю повинно мати характерні для біологічного виду колір та запах, бути термічно неушкодженим та перебувати у стані фізіологічного спокою (без самозігрівання). Згідно з чинними стандартами, зараженість шкідниками хлібних запасів не допускається (виняток – кліщ I ступеня). У випадку невідповідності нормам якості зерна навіть за одним із показників – його переводять у нижчий клас [8, 9].

Досліджувані зразки проаналізовано за органолептичними та фізичними показниками якості та представлено в таблиці 3.

Дані таблиці 3 свідчать про те, що показники якості досліджуваних проб ячменю, що зберігалися в різних умовах суттєво не змінилися при зберіганні і повністю відповідають вимогам державного стандарту. Незначна зміна кольору зерна, що зберігалось у звичайних умовах, може



Таблиця 1

Середні значення температури та вологості зерна ячменю при зберіганні на хлібоприймальному підприємстві

№ з/п	Дата проведення вимірювань	Вологість зерна (факт.), %	Вологість повітря, %	Температура зерна, °С	Температура повітря, °С	Проведення технологічних операцій
1	11.07.25р.	14,0	65	+17	+23	
2	15.07.25р.	14,3	65	+18	+22	
3	18.07. 25р.	14,5	68	+20	+31	
4	23.07. 25р.	14,9	70	+20	+33	
5	25.07. 25р.	15,3	70	+26	+32	Сушіння
6	26.07. 25р.	13,8	68	+20	+29	
7	31.07. 25р.	13,9	65	+22	+30	AB* – 8 год
8	01.08. 25р.	13,4	65	+19	+30	AB* – 8 год
9	04.08. 25р.	13,5	65	+20	+32	
10	10.08. 25р.	13,8	65	+21	+28	
11	13.08. 25р.	14,3	65	+23	+30	AB* – 8 год
12	23.08. 25р.	13,8	62	+23	+24	
13	26.08. 25р.	14,5	60	+25	+22	AB* – 10 год
14	27.08. 25р.	13,5	59	+17	+20	AB* – 8 год
15	31.08. 25р.	13,0	62	+16	+20	
16	11.09. 25р.	13,9	75	+22	+18	
17	14.09. 25р.	14,4	75	+23	+15	AB* – 10 год
18	15.09. 25р.	13,5	74	+14	+15	
19	23.09. 25р.	14,0	75	+19	+18	
20	26.09. 25р.	14,3	72	+20	+17	AB* – 10 год
21	27.09. 25р.	13,5	70	+15	+15	
22	30.09. 25р.	13,5	70	+15	+12	
23	14.10.25р.	13,9	74	+18	+12	AB* – 8 год
24	15.10.25р.	13,2	74	+15	+14	
25	25.10.25р.	13,3	75	+16	+9	
26	31.10.25р.	13,5	75	+18	+5	AB* – 8 год
27	01.11.25р.	13,0	75	+10	+3	
28	16.11.25р.	13,0	80	+10	–2	
29	30.11.25р.	13,0	80	+10	–5	
30	15.12.25р.	13,2	80	+13	+2	
31	02.01.25р.	13,5	80	+14	–10	
32	14.01.26р.	13,5	75	+14	–11	
33	24.01.26р.	13,8	70	+15	–18	
34	04.02.26р.	13,9	75	+17	+2	
35	19.02.26р.	14,0	80	+19	0	

AB* – активне вентилювання

бути викликана проведенням сушіння зерна перед закладанням. Повна відсутність пророслих зерен підтверджує високу якість підготовки зерна до зберігання та дотримання технологічних режимів. Вологість зерна в умовах підприємства коливається в межах, що є безпечними для зберігання (нижче критичної норми. В зерновій масі, що перебувала охолоджену стані, спостерігається тенденція до зниження вологості. Це вказує на те, що охолодження сприяє кращій консервації зернової маси та мінімізує ризик активізації мікрофлори.

Показник натурі незначно підвищився у пробах, що зберігалися в охолоджену стані, що може бути наслідком більшої меншої інтенсивності дихання, внаслідок зниження вологості. Вміст дрібного зерна знаходиться в межах норми, що свідчить про вирівняність партії.

Таблиця 2

Дані вимірювання температури та вологості зразків зерна ячменю у спеціальних умовах

№ з/п	Дата проведення вимірювань	Вологість зерна (факт.), %	Вологість повітря, %	Температура зерна, °С	Температура повітря, °С	Охолодження зерна, год
1	11.07.25р.	14,0	55	+17	+23	8
2	15.07.25р.	13,2	55	+18	+22	
3	18.07.25р.	13,2	55	+20	+31	
4	23.07.25р.	13,2	55	+11	+30	
5	27.07.25р.	13,2	50	+11	+34	
6	31.07.25р.	13,2	50	+11	+31	
7	03.08.25р.	13,2	50	+11	+29	
8	07.08.25р.	13,4	55	+11	+32	
9	10.08.25р.	13,4	50	+11	+33	
10	14.08.25р.	13,4	50	+11	+28	8
11	17.08.25р.	13,0	50	+8	+30	
12	21.08.25р.	13,0	50	+8	+27	
13	24.08.25р.	13,0	48	+8	+24	
14	28.08.25р.	13,0	48	+8	+20	
15	31.08.25р.	13,2	50	+8	+20	
16	04.09.25р.	13,2	51	+8	+23	
17	07.09.25р.	13,4	53	+8	+23	
18	11.09.25р.	13,4	55	+8	+19	
19	14.09.25р.	13,4	55	+9	+18	8
20	18.09.25р.	13,0	55	+7	+14	
21	21.09.25р.	13,0	55	+7	+12	
22	25.09.25р.	13,0	55	+7	+15	
23	28.09.25р.	13,0	55	+7	+11	
24	05.10.25р.	13,0	55	+7	+14	
25	09.10.25р.	13,0	55	+7	+14	
26	12.10.25р.	13,0	55	+7	+10	8
27	27.10.25р.	12,5	55	+5	+8	
28	06.11.25р.	12,5	55	+5	0	
29	21.11.25р.	12,5	55	+5	+2	
30	06.12.25р.	12,0	52	+4	-1	
31	21.12.25р.	12,0	50	+4	-6	
32	05.01.26р.	11,8	50	+4	-14	
33	19.01.26р.	11,8	50	+4	-21	
34	02.02.26р.	11,8	50	+4	-8	
35	19.02.26р.	11,8	50	+4	-2	

Зерно досліджуваних зразків ячменю характеризується високою якістю та стабільністю. Режим зберігання в охолоджену стані є більш ефективним, оскільки він забезпечує кращі показники натури та нижчий рівень вологості, що гарантує тривале збереження технологічних властивостей зерна без ризику втрат.

Оцінку органолептичних показників якості проводили згідно стандарту на обрану культуру за наступними диференційними показниками: смак, запах, колір, зовнішній вигляд.

Результати органолептичної оцінки досліджених зразків зерна ячменю представлено в графічному вигляді (рисунок 3).

Балова оцінка від 0 до 5, де 0 балів – повністю не відповідає вимогам стандарту, а 5 балів – відповідає вимогам стандарту.

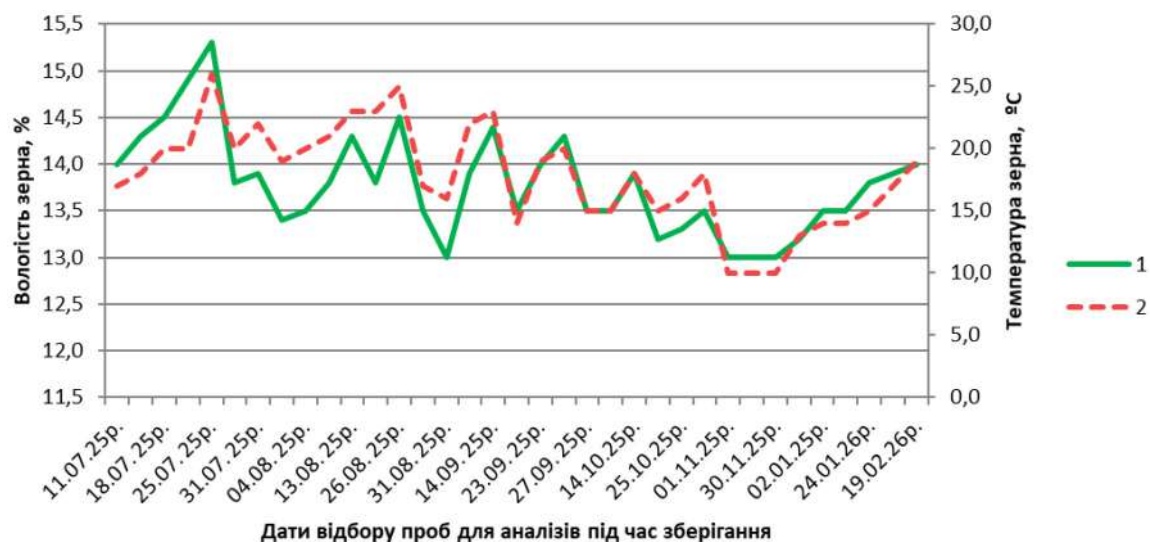


Рис. 1. Залежність вологості зерна ячменю від температури зернової маси (в умовах підприємства):
1 – вологість, %; 2 – температура, °C

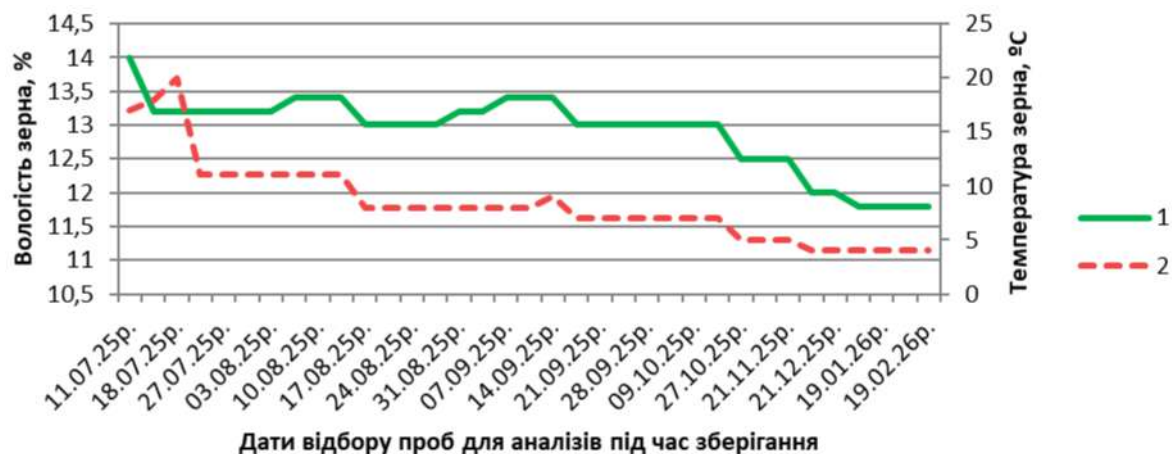


Рис. 2. Залежність вологості зерна ячменю від температури зернової маси (в охолодженому стані):
1 – вологість, %; 2 – температура, °C

Таблиця 3

Показники якості зерна ячменю при зберіганні

Показник	ДСТУ 3769-98	За звичайних умов зберігання		В охолодженому стані	
		1 проба*	2 проба**	1 проба*	2 проба**
Колір	Жовтий з різними відтінками	Жовтий	Жовтий, ледь тьмяний	Жовтий	Жовтий
Натура, г/л, не менше,	600	603	602	603	604
Вологість, %, не більше	14,5	14,0	13,5	14,0	13,0
Смітна домішка, %, не більше	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Зернова домішка, %, не більше	7,0	2,8	3,0	2,8	3,0
в т. ч. пророслі зерна, %, не більше,	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Дрібні зерна, не більше, %	5,0	4,0	4,2	4,0	4,1

* – зразок, відібраний до закладання на зберігання;

** – зразок, відібраний наприкінці зберігання

Таблиця 4

Органолептична оцінка якості дослідних зразків зерна ячменю

Зразок зерна	Колір	Запах	Смак	Зовнішній вигляд (стан оболонки)
Зерно ячменю (звичайні умови)	4	5	5	4,5
Зерно ячменю (охолоджений стан)	5	5	5	5

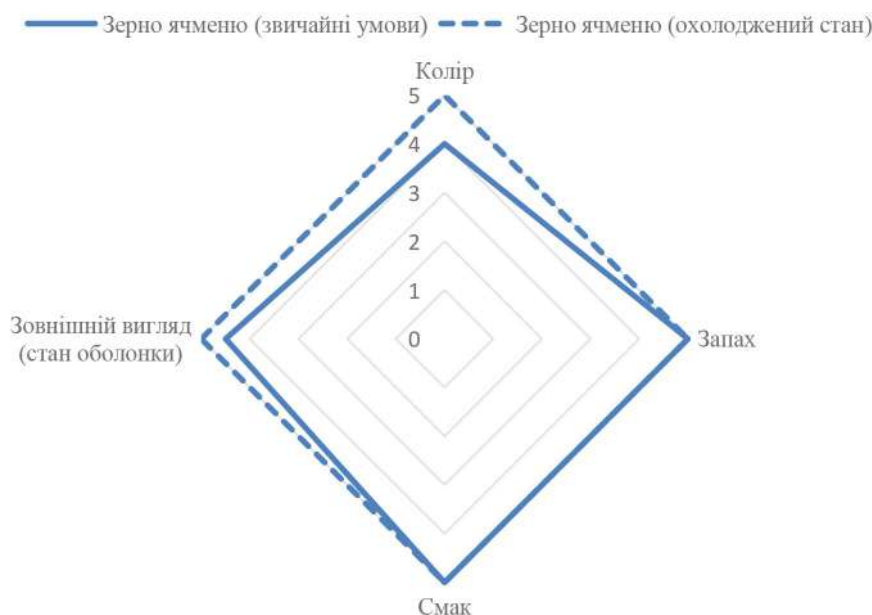


Рис. 3. Органолептична оцінка якості дослідних зразків

Висновки. Здійснювали дослідження ефективності застосування охолодження зернових мас штучним холодом. Для порівняння методу із традиційною технологією зберігання зерна ячменю продовольчого призначення досліджували зміну вологості і температури зернової маси та навколосернового простору, аналізували якість зерна до та після зберігання.

Визначено та встановлено, що показники якості зерна залишалися стабільними тривалістю усього періоду зберігання. Незначне зростання натурної маси свідчить про інтенсифікацію процесів післязбирального дозрівання, що стало можливим завдяки швидкому охолодженню та підтримці стабільної вологості. Відсутність пророслого зерна та шкідників підтверджує високу ефективність обраного режиму зберігання, за якого досліджуваний ячмінь за всіма показниками відповідав вимогам до 1-го класу продовольчого зерна.

За класичною технологією зберігання застосовують сушіння та активне вентилявання, що є досить затратним та сприяє частковому травмуванню зерна, тому нами рекомендовано впровадження нового альтернативного способу зберігання зерна в охолодженому стані і запропоновано проведення охолодження один раз на місяць.

Список використаних джерел

1. Подпратов Г. І., Рожко В. І., Скалецька Л. Ф. Технологія зберігання та переробки продукції рослинництва: підручник. Київ : Аграрна освіта, 2014. 393 с.
2. Кюрчев С. В., Верхоланцева В. О. Визначення параметрів оптимізації процесу охолодження зерна. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. 2015. С. 228–239.
3. Фоміна І. М., Гавриш Т. В., Шаніна О. М., Боровікова Н. О. Інноваційні технології зберігання і переробки зерна: навчально-методичний посібник. Харків : ДБТУ. 2025. 134 с.



4. Коваленко І. Зберігання зерна: Холодна «консервація». *Журнал та мультимедійна платформа. «Агробізнес Сьогодні»*. 2019.
5. Zhao Y., Naoxin L. V., Yanfei L. I. Grain storage: Theory, technology and equipment. *Foods*. 2023. 12.20. 3792.
6. Ning X. F. Storage characteristics of low-temperature grain warehouse using ambient cold air in winter. *Biosystems Engineering (formerly the Korean Society of Agricultural Machinery)*. 2012. 37.3. С. 184–191.
7. Федотова М., Трушаков Д. Вплив охолодження зерна на процес зберігання. *Головний журнал з питань агробізнесу «Пропозиція»*. 2020 р. № 4.
8. Особливості формування якості зерна. 2025. [Електронний ресурс]. URL: <https://propozitsiya.com/articles/tekhnohiiyi-zberihannya-ta-pererobka/osoblyvosti-formuvannya-yakosti-zerna>
9. Чурсінов Ю. О., Ковальова О. С., Калина В. С., Пилипенко Г. О., Хомик Н. І., Lehmann Ch. Аналітичне дослідження перспективи процесів автоматизації прийому, оцінки якості та закладання зерна на зернопереробних підприємствах. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання*. Мелітополь : ТДАТУ. 2020. № 20. Т. 1. С. 93–107.

Дата першого надходження статті до видання: 05.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



V. Troiekurova, V. Kalyna, M. Denysenko
Dnipro State Agrarian and Economic University

RESEARCH ON MODES AND PARAMETERS OF SYSTEMS FOR STORAGE OF BARLEY GRAIN IN A COOLED STATE: IMPACT ON ORGANOLEPTIC AND PHYSICAL QUALITY INDICATORS

Summary

The study substantiates the feasibility of applying a cooled storage regime for first-class food-grade barley grain and determines its impact on quality indicators and the duration of safe storage. Changes in moisture content, grain mass temperature, and the temperature of the intergranular space were investigated under conventional technology and under conditions of artificial cooling in floor-type storage facilities. Grain quality was analyzed before and after storage under both industrial and laboratory conditions, including organoleptic and physicochemical quality indicators. The assessment of organoleptic quality parameters was carried out in accordance with the standard for the selected crop based on the following differential indicators: taste, odor, color, and appearance. It was established that when cooling was applied, quality indicators remained stable throughout the entire storage period; the absence of sprouted grains and pests confirms the effectiveness of the regime. A slight increase in test weight indicates the intensification of post-harvest ripening processes. The implementation of cooled barley grain storage with a cooling frequency of once per month is recommended as an energy-efficient alternative to drying and active aeration.

Keywords: barley, grain mass, grain storage regimes, cooling technology, artificial cooling, organoleptic and physical quality indicators.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-41>

УДК 664.87:664.8/9

В. А. Черняков, аспірант

ORCID: 0009-0005-9679-5219

О. Ю. Мельник, канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0002-9201-7955

Сумський національний аграрний університет

e-mail: v.chernyakov.gs@snau.edu.ua

ОЦІНКА СНЕКОВОЇ ПРОДУКЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ БОРОШНА ЧЕРВОНОЇ СОЧЕВИЦІ

Анотація. У статті наведено результати дослідження органолептичних властивостей снекової продукції на основі борошна червоної сочевиці та овочевої сировини. Метою роботи є встановлення впливу рецептурного складу на формування сенсорного профілю продукту. Наукова новизна полягає у застосуванні дескрипторного аналізу відповідно до ДСТУ ISO 13299:2016 для оцінювання органолептичних характеристик снєків із комбінованої рослинної сировини та визначенні закономірностей їх зміни залежно від вмісту сочевичного борошна. Проведено оцінювання трьох дослідних зразків із вмістом борошна 26 %, 33 % та 40 %. Встановлено, що збільшення його частки до 33 % сприяє покращенню текстури, смаку та загальної гармонійності продукту, тоді як подальше підвищення призводить до погіршення окремих показників. Практична цінність полягає у визначенні оптимального рецептурного складу для забезпечення високої споживчої цінності снекової продукції.

Ключові слова: дескрипторний аналіз, сенсорний профіль, зернобобові культури, овочеві компоненти, рецептурний склад, споживча цінність, текстурні характеристики.

Постановка проблеми. У сучасних умовах розвитку харчової промисловості одним із пріоритетних напрямів є створення харчових продуктів із підвищеною біологічною цінністю, здатних поєднувати зручність споживання із збалансованим нутрієнтним складом. Особливу увагу дослідників привертає сегмент снекової продукції, що характеризується стабільним зростанням попиту серед різних груп населення. Снеки є популярною категорією харчових продуктів завдяки їхній доступності, тривалому терміну зберігання та зручності споживання, однак традиційні види такої продукції часто характеризуються високим вмістом жиру, солі та рафінованих вуглеводів, що знижує їхню харчову цінність і може негативно впливати на стан здоров'я споживачів [1].

У зв'язку з цим актуальним є пошук нових підходів до формування рецептури снекової продукції із використанням рослинної сировини, що дозволяє підвищити вміст білка, харчових волокон та біологічно активних речовин. Одним із перспективних напрямів є застосування зернобобових культур, які характеризуються високою харчовою цінністю та можуть виступати джерелом рослинного білка у технології снекової продукції функціонального призначення [2].

Серед зернобобових культур значний науковий інтерес становить сочевиця, яка відзначається високим вмістом білка, харчових волокон, мінеральних речовин та антиоксидантних сполук. Доведено, що використання продуктів перероблення сочевиці у складі харчових систем сприяє підвищенню їхньої біологічної цінності та формуванню функціональних властивостей готових виробів. Крім того, сочевиця не містить глютену, що дозволяє використовувати її у виробництві безглютенових харчових продуктів, попит на які зростає у зв'язку з поширенням целіакії та підвищеною увагою споживачів до здорового харчування [3].



Важливим напрямом удосконалення рецептур снекової продукції є також використання овочевої сировини, що характеризується високим вмістом харчових волокон, мікроелементів та біологічно активних речовин. Додавання овочевих компонентів до складу снєків дозволяє не лише підвищити їхню харчову цінність, але й сприяє формуванню оптимальної текстури, кольору та смаку продукту, що є важливим для забезпечення високого рівня споживчої цінності [4].

Таким чином, розроблення технологій снекової продукції на основі рослинної сировини, зокрема із використанням борошна сочевиці та овочевих компонентів, є актуальним науковим і практичним завданням харчової промисловості. Особливого значення набуває дослідження органолептичних властивостей таких продуктів, оскільки саме сенсорні характеристики визначають рівень споживчої привабливості та конкурентоспроможності нових харчових виробів.

Аналіз останніх досліджень. Упродовж останнього десятиліття значна кількість наукових досліджень присвячена розробленню нових видів снекової продукції з підвищеною харчовою цінністю, зокрема із використанням рослинної сировини. Сучасні тенденції розвитку харчових технологій спрямовані на створення функціональних продуктів, які поєднують високу поживну цінність, збалансований склад і привабливі органолептичні характеристики. У цьому контексті особливу увагу приділяють використанню зернобобових культур, які характеризуються високим вмістом білка, харчових волокон і біологічно активних сполук [5].

У роботах сучасних дослідників показано, що зернобобові культури можуть ефективно використовуватися, як основна сировина для виробництва снекових продуктів. Так, у дослідженні С. Proserpio та співавторів встановлено, що використання борошна та висівків зернобобових культур у технології снєків дозволяє отримувати продукти з підвищеним вмістом білка та харчових волокон, а також формувати альтернативу традиційним безглютеновим виробам. При цьому сенсорні дослідження показали, що органолептичні характеристики таких снєків значною мірою залежать від складу рецептури та співвідношення інгредієнтів, оскільки збільшення частки бобових компонентів може впливати на текстуру, хрусткість і смакові властивості продукту [6].

Результати досліджень інших науковців підтверджують, що використання білкових фракцій зернобобових культур у поєднанні з іншими рослинними компонентами дозволяє створювати снєки з покращеним амінокислотним складом і підвищеним вмістом білка. Водночас встановлено, що збільшення концентрації білкових компонентів у рецептурі може призводити до зменшення ступеня розширення продукту та підвищення його твердості, що впливає на текстурні та сенсорні властивості готового виробу [7].

При розробці безглютенових екструдованих снєків, що містять борошно з сочевиці, науковцями було зазначено, що сенсорні властивості таких виробів значною мірою визначаються структурою продукту, ступенем пористості та хрусткістю. Найбільш важливими показниками, які впливають на споживчу прийнятність снєків, є колір, аромат, смак, текстура та загальне сенсорне сприйняття продукту [8].

Разом з тим сучасні дослідження демонструють, що перспективним напрямом вдосконалення технологій хрустких хлібців є додавання в рецептуру пюре бобових культур. Науковцями встановлено, що в залежності від типу доданого пюре відслідковувалась відмінність морфологічних характеристик, а використання різних видів бобових впливає на спектральні особливості, що є фундаментальною основою для формування кольору готового виробу [9].

У дослідженнях українських науковців також розглядаються питання розроблення снекової продукції з використанням рослинної сировини. Зокрема у роботах, присвячених створенню овочевих та комбінованих снєків, обґрунтовано доцільність використання плодово-овочевої та іншої рослинної сировини для підвищення харчової цінності продукції, поліпшення органо-

лептичних показників та розширення її асортименту. Показано, що склад рецептури суттєво впливає на якісні характеристики готових виробів, зокрема їх смак, колір та загальне сприйняття [10, 11].

Окремі дослідження вітчизняних авторів також присвячені аналізу впливу рослинних інгредієнтів на органолептичні показники харчових продуктів. Встановлено, що введення додаткових рослинних компонентів, зокрема овочевої сировини або прянощів, сприяє покращенню смакових і ароматичних характеристик продукції, а також формуванню більш вираженого сенсорного профілю [12].

Разом з тим аналіз наукових праць показує, що у більшості досліджень органолептична оцінка снекової продукції має обмежений характер і, як правило, зводиться до загальної бальної оцінки без детального аналізу сенсорного профілю. Недостатньо вивченими залишаються питання комплексного дослідження органолептичних властивостей снеків на основі комбінованої рослинної сировини, зокрема при поєднанні зернобобових культур та овочевих компонентів.

Особливої уваги потребує встановлення впливу рецептурного складу, зокрема вмісту борошна зернобобових культур, на формування окремих сенсорних характеристик продукту – смаку, аромату та текстурних показників. Відсутність детального дескрипторного аналізу таких виробів ускладнює визначення оптимального співвідношення інгредієнтів та обґрунтування їх впливу на споживчу прийнятність.

Таким чином, подальші дослідження у цьому напрямі є актуальними та повинні бути спрямовані на поглиблене вивчення сенсорного профілю снекової продукції з використанням рослинної сировини із застосуванням дескрипторного аналізу, що дозволяє встановити взаємозв'язок між рецептурними чинниками та органолептичними властивостями готового продукту.

Мета і методи дослідження. Метою дослідження є оцінка органолептичних властивостей снекового продукту залежно від рецептурного складу.

Методологічною основою дослідження є аналіз органолептичних показників якості розробленого продукту, порівняння дослідних зразків, виготовлених із використанням борошна червоної сочевиці та комбінованої рослинної сировини, а також застосування загальноприйнятих методів сенсорної оцінки харчових продуктів і детального аналізу сенсорного профілю з подальшою обробкою та узагальненням отриманих результатів.

Методи дослідження. Органолептичну оцінку розробленої снекової продукції здійснювали із застосуванням дескрипторного аналізу (Descriptive Analysis, DA) відповідно до вимог ДСТУ ISO 13299:2016.

Для проведення оцінювання було сформовано дегустаційну комісію у складі 7 осіб, які мають досвід участі в сенсорному аналізі харчових продуктів та пройшли попередній інструктаж щодо процедури оцінювання. Перед початком дослідження було визначено та узгоджено перелік дескрипторів, що характеризують основні сенсорні властивості снекової продукції.

Оцінювання проводили за такими групами показників: зовнішній вигляд (форма, рівномірність поверхні), колір (інтенсивність, однорідність), запах (вираженість, характер), смак (інтенсивність, гармонійність, наявність сторонніх присмаків), текстура (хрусткість, твердість, однорідність структури).

Інтенсивність кожного дескриптора визначали за уніфікованою бальною шкалою від 0 до 5, де 0 – відсутність прояву ознаки, 5 – максимально виражена інтенсивність. Дегустацію проводили в однакових умовах для всіх зразків із дотриманням вимог щодо підготовки продукції до оцінювання та мінімізації впливу сторонніх факторів.

Результати сенсорного аналізу обробляли шляхом розрахунку середніх значень показників для кожного дескриптора з подальшим узагальненням отриманих даних. Для наочного пред-

ставлення сенсорного профілю досліджуваних зразків використовували графічну інтерпретацію у вигляді профілограм (радар-діаграм), що дозволяє комплексно оцінити інтенсивність органолептичних характеристик та провести їх порівняльний аналіз.

Об'єктом дослідження є процес формування органолептичних властивостей снекової продукції, виготовленої на основі борошна червоної сочевиці та овочевої сировини.

Предметом дослідження є органолептичні показники снекової продукції залежно від вмісту борошна червоної сочевиці у рецептурі (26 %, 33 % та 40 %), зокрема зовнішній вигляд, колір, запах, смак і текстура (хрусткість).

Наукова новизна одержаних результатів полягає у встановленні впливу вмісту борошна червоної сочевиці у рецептурі снекової продукції (26 %, 33 % та 40 %) на формування її органолептичних властивостей. Вперше для даного виду комбінованої рослинної сировини (сочевичне борошно – овочева основа) сформовано сенсорний профіль із застосуванням дескрипторного аналізу відповідно до вимог ДСТУ ISO 13299:2016 та визначено характер зміни основних показників якості залежно від рецептурного складу.

Інформаційну базу дослідження становлять наукові праці вітчизняних та зарубіжних авторів, присвячені технології снекової продукції з використанням рослинної сировини, зокрема зернобобових культур, а також дослідження у сфері сенсорного аналізу харчових продуктів. Методичну основу роботи сформовано на базі положень ДСТУ ISO 13299:2016.

Основна частина. Для дослідження органолептичних властивостей снекової продукції було сформовано три дослідні зразки (рис. 1), що відрізнялися вмістом борошна червоної сочевиці у рецептурі: 26 % (зразок 1), 33 % (зразок 2) та 40 % (зразок 3).



Рис. 1. Зовнішній вигляд дослідних зразків снекової продукції на основі рослинної сировини з додаванням борошна червоної сочевиці:

1 – з додаванням 26 % борошна; 2 – з додаванням 33 % борошна; 3 – з додаванням 40 % борошна

Вміст інших компонентів (молодий кабачок, ріпчаста цибуля, вода та сіль), а також технологія і параметри виготовлення залишалися сталими, що забезпечило можливість оцінки впливу виключно рецептурного чинника.

Органолептичне оцінювання здійснювали із застосуванням дескрипторного аналізу відповідно до попередньо сформованої системи дескрипторів, що охоплює показники зовнішнього вигляду, кольору, запаху, смаку та текстури. Інтенсивність кожного дескриптора визначали за п'ятибальною шкалою. Результати оцінювання, які наведені в табл. 1, представлено у вигляді середніх арифметичних значень інтенсивності дескрипторів.

Аналіз отриманих результатів свідчить про чітку залежність органолептичних характеристик продукту від вмісту борошна червоної сочевиці у рецептурі.

Зразок 1 (26 %) характеризувався нижчими значеннями більшості дескрипторів. Зокрема, відмічено знижену хрусткість (3,6 бала), недостатню однорідність структури (3,7 бала) та меншу гармонійність смаку (3,7 бала). Такі результати можна пояснити недостатнім вмістом сухих речовин і білкових компонентів сочевиці, що обмежує формування міцної структурної матриці під час термічної обробки та негативно впливає на текстурні характеристики продукту.

Таблиця 1

Результати дескрипторного аналізу снекової продукції (0–5 балів)

Група	Дескриптор	Зразок 1 (26 %)	Зразок 2 (33 %)	Зразок 3 (40 %)
Зовнішній вигляд	Рівномірність форми	3,7	4,6	4,2
	Цілісність поверхні	3,8	4,7	4,3
Колір	Інтенсивність кольору	3,9	4,5	4,7
	Однорідність кольору	3,8	4,6	4,4
Запах	Інтенсивність аромату	4,0	4,3	4,6
	Характер аромату	4,1	4,6	4,2
Смак	Інтенсивність смаку	3,8	4,2	4,7
	Гармонійність смаку	3,7	4,9	4,1
	Відсутність стороннього присмаку	4,0	4,8	4,2
Текстура	Хрусткість	3,6	4,9	4,4
	Твердість (оптимальність)	3,9	4,7	4,3
	Однорідність структури	3,7	4,8	4,3

Зразок 2 (33 %) продемонстрував найвищі значення практично за всіма дескрипторами. Особливо високі оцінки отримано за показниками хрусткості (4,9 бала), гармонійності смаку (4,9 бала), однорідності структури (4,8 бала) та оптимальної твердості (4,7 бала). Це свідчить про формування збалансованої текстурної та смакової системи, за якої досягається оптимальне поєднання хрусткості та механічної міцності продукту без надмірної жорсткості. Візуальні характеристики також були найбільш наближені до бажаних – зразок мав рівномірну форму (4,6 бала) та однорідне забарвлення (4,6 бала).

Зразок 3 (40 %) характеризувався підвищеними значеннями інтенсивності кольору (4,7 бала), інтенсивності аромату (4,6 бала) та смаку (4,7 бала), що зумовлено більшим вмістом борошна сочевиці. Водночас він поступався зразку 2 за показниками гармонійності смаку (4,1 бала), оптимальності твердості (4,3 бала) та однорідності структури (4,3 бала). Підвищений вміст білкових і сухих речовин сприяв формуванню більш щільної та сухої структури, що призводило до часткової втрати текстурної збалансованості та появи більш вираженого бобового смаку.

Для узагальнення отриманих даних було побудовано сенсорні профілі дослідних зразків (рис. 2), які наочно відображають інтенсивність кожного дескриптора. Профілограма підтверджує, що зразок із вмістом 33 % борошна червоної сочевиці має найбільш збалансовану конфігурацію сенсорного профілю, що забезпечує найвищий рівень органолептичної привабливості серед досліджуваних варіантів.

Отримані результати сенсорного профілювання (рис. 2) свідчать про залежність органолептичних характеристик снекової продукції від вмісту борошна червоної сочевиці у рецептурі. Встановлено, що збільшення частки сочевичного борошна до певного рівня сприяє покращенню окремих сенсорних показників, зокрема хрусткості, інтенсивності смаку та кольору. Водночас подальше підвищення його вмісту призводить до зниження гармонійності смаку та оптимальності текстурних характеристик, що пов'язано з формуванням більш щільної та сухої структури продукту.

Таким чином, за результатами дескрипторного аналізу встановлено, що оптимальним є зразок із вмістом 33 % борошна червоної сочевиці, який характеризується найбільш збалансованим сенсорним профілем за сукупністю досліджуваних дескрипторів.

Висновки. У результаті проведених досліджень здійснено комплексну оцінку органолептичних властивостей снекової продукції на основі борошна червоної сочевиці та овочевої сировини із застосуванням дескрипторного аналізу відповідно до вимог ДСТУ ISO 13299:2016.



Рис. 2. Сенсорні профілі снекової продукції залежно від вмісту борошна червоної сочевиці (26 %, 33 % та 40 %)

Встановлено, що зміна вмісту борошна червоної сочевиці у рецептурі суттєво впливає на формування сенсорних характеристик продукту. Зі збільшенням частки сочевичного борошна підвищуються інтенсивність кольору, аромату та смаку, а також покращується хрусткість, однак надмірний його вміст призводить до зниження гармонійності смаку та оптимальності текстури.

За результатами дескрипторного аналізу визначено, що зразок із вмістом 33 % борошна червоної сочевиці характеризується найбільш збалансованим сенсорним профілем, зокрема високими значеннями хрусткості, гармонійності смаку та однорідності структури, що забезпечує найвищий рівень органолептичної привабливості серед досліджуваних варіантів.

Отримані результати можуть бути використані при розробленні технологій снекової продукції з використанням комбінованої рослинної сировини, а також для оптимізації рецептурного складу з метою забезпечення високої споживчої прийнятності готових виробів.

Перспективою подальших досліджень є вивчення фізико-хімічних та структурно-механічних показників розробленої продукції, а також розширення асортименту за рахунок використання інших видів рослинної сировини.

Список використаних джерел

1. Serna-Saldivar S. O. *Snack Foods*. Boca Raton : CRC Press, 2022. *джерел* DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003129066>
2. Mudryj A. N., Yu N., Aukema H. M. *Nutritional and health benefits of pulses*. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*. 2014. Vol. 39, no. 11. P. 1197–1204. DOI: <https://doi.org/10.1139/apnm-2013-0557>
3. Ganesan K., Xu B. Polyphenol-Rich Lentils and Their Health Promoting Effects. *International Journal of Molecular Sciences*. 2017. Vol. 18, no. 11. P. 2390. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms18112390>

4. Galanakis C. M. *Nutraceutical and Functional Food Components: Effects of Innovative Processing Techniques*. Elsevier Science & Technology Books, 2017. 382 p. АБО Galanakis C. M. *Nutraceutical and Functional Food Components: Effects of Innovative Processing Techniques*. *Elsevier Science & Technology Books*, 2021. 558 p.
5. Tas A. A., Shah A. U. The replacement of cereals by legumes in extruded snack foods: Science, technology and challenges. *Trends in Food Science & Technology*. 2021. Vol. 116. P. 701–711. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.08.016>
6. Legume Flour or Bran: Sustainable, Fiber-Rich Ingredients for Extruded Snacks? / C. Proserpio et al. *Foods*. 2020. Vol. 9, no. 11. P. 1680. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods9111680>.
7. Texture, sensory and functionality of extruded snacks from pulses and pseudocereal proteins / A. Martin et al. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.11041>
8. Development of Gluten-Free Extruded Snack Containing Lentil Flour and Evaluation of Extrusion Process Conditions on Quality Properties / B. O. Esen et al. *Food Science & Nutrition*. 2025. Vol. 13, no. 8. DOI: <https://doi.org/10.1002/fsn3.70663>
9. Szulc K., Galus S. Structural and Rheological Characterization of Vegetable Crispbread Enriched with Legume Purée. *Molecules*. 2024. Vol. 29, no. 8. P. 1880. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules29081880>
10. Душак, О. В. Розширення асортименту снекової продукції із плодово-овочевої сировини / О. В. Душак, С. А. Бут, Є. Б. Кіях. Інноваційні технології та підвищення ефективності виробництва харчових продуктів : тези доповідей IV Всеукраїнської науково-практичної конференції в заочній формі, 20 жовтня 2023 р., м. Умань. 2023. С. 55–57.
11. Снеки. Розділ 1. Чипси з рослинної сировини : монографія / І. М. Дударев, О. В. Кузьмін. Одеса : Олді+, 2023. С. 1–16.
12. Левківська, Т. М. Використання прянощів у виробництві рибних снеків / Т. М. Левківська. Якість та безпечність продукції у внутрішній і зовнішній торгівлі: сучасні вектори розвитку і перспективи : матеріали IV Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, 15 жовтня 2024 р., м. Полтава. Полтава : ПДАУ, 2024. С. 132–133.

Дата першого надходження статті до видання: 05.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



V. Cherniakov, O. Melnyk
Sumy National Agrarian University

EVALUATION OF SNACK PRODUCTS USING RED LENTIL FLOUR

Summary

The article presents the results of a study on the organoleptic properties of snack products developed on the basis of red lentil flour and vegetable raw materials. The relevance of the research is determined by the growing demand for snack products with improved nutritional value and balanced composition, as well as the need to replace traditional products with high fat and carbohydrate content by healthier alternatives of plant origin.

The aim of the study was to determine the influence of formulation composition, in particular the content of red lentil flour, on the formation of sensory characteristics of snack products. The scientific novelty of the work lies in the application of descriptive analysis in accordance with DSTU ISO 13299:2016 for the evaluation of the sensory profile of snacks based on combined plant raw materials, as well as in identifying patterns of changes in organoleptic indicators depending on the proportion of lentil flour in the formulation.

Three experimental samples containing 26 %, 33 % and 40 % of red lentil flour were investigated. Sensory evaluation was carried out using a descriptor-based approach, which included the assessment of appearance, color, aroma, taste and texture characteristics. The intensity of each descriptor was determined using a five-point scale, and the results were presented as mean values. Radar charts were used to visualize the sensory profiles of the samples.



The results showed that increasing the proportion of lentil flour to a certain level contributes to the improvement of sensory characteristics, particularly crispness, color intensity and taste expression. However, further increase in its content leads to a decrease in taste harmony and optimal texture due to the formation of a denser and drier structure and a more pronounced legume flavor.

It was established that the sample containing 33 % of red lentil flour demonstrated the most balanced sensory profile, characterized by high values of crispness, taste harmony and structural uniformity. This formulation ensures the highest level of consumer acceptability among the studied variants.

The practical significance of the research lies in determining the optimal formulation parameters for the production of snack products based on plant raw materials, which can be used to improve existing technologies and develop new types of functional food products with enhanced sensory properties.

Keywords: descriptive analysis, sensory profile, legumes, vegetable components, formulation composition, consumer acceptability, textural characteristics.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-42>

УДК 664.68:613.2.099:005.334

С. Л. Юрченко, канд. техн. наук, доцент
М. Б. Колеснікова, канд. техн. наук, доцент
Т. В. Черемська, канд. техн. наук, доцент
Державний біотехнологічний університет
e-mail: sluyrchenko@gmail.com

ORCID: 0000-0002-6223-7105
ORCID: 0000-0003-1286-081X
ORCID: 0000-0001-6518-3889

РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ БЕЗГЛЮТЕНОВИХ МЛИНЧИКІВ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ РИЗИК-ОРІЄНТОВАНОГО ПІДХОДУ ДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЇХ БЕЗПЕЧНОСТІ

Анотація. У статті наведено результати з розроблення технології безглютенових млинчиків для закладів ресторанної індустрії з урахуванням функціонально-технологічних властивостей безглютенової сировини. Досліджено водопоглинальну здатність рисового, кукурудзяного, амарантового та соєвого борошна і нативних крохмалів, за результатами якої сформовано композиційні суміші для забезпечення оптимальної структури тіста.

Розроблено рецептури безглютенових млинчиків із введенням картопляного крохмалю з метою компенсації відсутності клейковини. Здійснено аналіз трансформації ризик-профілю продукції та обґрунтовано впровадження ризик-орієнтованого підходу до забезпечення її безпечності, профілактики перехресної контамінації глютену та обґрунтування терміну придатності продукції в умовах ЗРІ. Отримані результати можуть бути використані при розширенні асортименту продукції gluten-free.

Ключові слова: безглютенові млинчики, глютен, целиакія, безглютенове борошно, композиційна суміш, водопоглинальна здатність, ризик-орієнтований підхід, безпечність.

Постановка проблеми. На даний час все більше виробників харчової продукції зосереджуються на розробленні продукції, що відповідає потребам різних категорій споживачів, зокрема осіб, які хворіють на целиакію. Водночас заклади ресторанної індустрії також починають поступово розширювати меню за рахунок безглютенових страв, що сприяє підвищенню споживчого попиту та забезпечує потреби окремих груп відвідувачів.

Аналіз літературних джерел [1–4] дозволяє стверджувати, що суттєва частка споживачів не здатна вживати харчову продукцію, яка містить у своєму складі глютен. Це приводить до виникнення різноманітних негативних проявів, які виявляються у порушеннях функцій травної системи, погіршенні загального самопочуття тощо. Зазначені проблеми можуть бути вирішені виключно шляхом дотримання визначених дієтичних обмежень, які полягають у повній елімінації глютену.

Статистичні дані свідчать, що з кожним роком фіксується зростання кількості осіб із нецелиакійною чутливістю до глютену, що зумовлює необхідність обмеження або повного виключення з раціону харчових продуктів, які містять цей білок. У зв'язку з вищезазначеним є потреба у безглютенових стравах, що визначило доцільність проведення даних досліджень.

Аналіз останніх досліджень. Питанням розроблення безглютенових продуктів харчування переймаються багато вчених.

Інноваційна діяльність у сфері виробництва харчових продуктів охоплює всі етапи технологічного ланцюга – від обґрунтованого вибору сировинних компонентів до особливостей їх використання в конкретних технологіях, умов зберігання та реалізації готової продукції.

Запровадження сучасних інноваційних рішень забезпечує зростання конкурентних переваг продукції gluten-free і водночас сприяє становленню нових підходів до організації раціонального харчування.

Доцільно зазначити, що розвиток інноваційних технологій у сегменті виробництва безглютенових продуктів зумовлений не лише потребами ринку, а й стратегічними завданнями у сфері продовольчої безпеки та охорони здоров'я населення. Не зважаючи на складну політичну та економічну ситуацію в країні, ресторанний бізнес в Україні розвивається, тому розроблення та впровадження сучасних технологій виробництва продукції gluten-free у заклади ресторанної індустрії є важливою складовою, що потребує вирішення.

Групою науковців [5] проведено дослідження сегменту борошняних кулінарних страв, результати якого свідчать про зацікавленість споживачів до таких страв, як оладки, крепи та панкейки. Разом з тим відмічена відсутність безглютенових представників даної групи у меню ЗРІ.

З метою вирішення даного питання науковцями розроблено суху суміш безглютенову (ССБ) до складу якої входять харчові волокна та білки. ССБ являє собою композиційну суміш різних видів безглютенового борошна, яке представлено амарантовим, екструдованим соргово:кукурудзяним борошном та соргово:соєвим. Дану суміш використано в якості інгредієнта панкейків.

Боковець С. П. [6] пропонує використання борошна зеленої гречки та борошна льону в технології безглютенових вареників. Результати проведених досліджень засвідчили, що вареники, у складі яких міститься суміш борошна зеленої гречки та льону у співвідношенні 80:20, характеризуються підвищеною харчовою цінністю та покращеними органолептичними характеристиками. Одержані дані підтверджують обґрунтованість застосування альтернативних видів борошна в технології виробництва безглютенових вареників.

Групою авторів [7] проведено ряд досліджень з можливості використання різних видів безглютенового борошна (гречаного, рисового, тапіоки, амарантового) та порошку калини, як компонента, що збільшує в'язкість прісного тіста для вареників. У результаті досліджень встановлено раціональне співвідношення інгредієнтів у складі тістової основи для вареників, а саме: додавання 20 % борошна тапіоки до суміші безглютенового борошна та 2 % порошку калини.

Результати досліджень підтвердили, що використання комплексних борошняних сумішей у рецептурі прісного тіста дозволяє забезпечити покращені споживчі характеристики готової продукції та одночасно підвищити її харчову цінність.

Дослідження, які проведено в обраному напрямі свідчать, що інновації у сегменті виробництва борошняної безглютенової продукції спрямовані на використання в їх рецептурному складі сумішей безглютенового борошна, модифікованих крохмалів, що дає змогу регулювати структурно-механічні властивості тіста та отримувати страви, які за споживчими характеристиками не поступаються традиційним.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою дослідження є розроблення технології безглютенових млинчиків, що дозволить ЗРІ розширити асортимент борошняних страв сегменту gluten-free, який демонструє стрімке зростання. Наукова новизна полягає в обґрунтуванні складу композиційних безглютенових сумішей для виробництва млинчиків з урахуванням водопоглинальної здатності сировини та трансформації ризик-профілю продукції в умовах закладів ресторанної індустрії.

Основна частина. Аналіз існуючих технологій виробництва борошняних безглютенових страв свідчить [2, 3, 5, 8–10], що значна кількість науковців докладають свої зусилля у даному напрямі та постійно досліджують властивості безглютенової сировини.

Дані аналізу харчової цінності різних видів безглютенового борошна показують, що воно містить білки, клітковину та мінеральні речовини, які в сукупності можуть забезпечувати як

реологічні властивості тіста, так і його підвищену харчову цінність. Це відкриває можливості для поглибленого вивчення характеристик композиційних сумішей борошна та визначення їх оптимальних пропорцій у рецептурі тіста для млинчиків.

Було досліджено властивості рисового, кукурудзяного, амарантового та соєвого (жорного) борошна, що постачається ТзОВ «Земледар-Інфо» з метою розроблення композиційних сумішей та їх використання у складі безглютенових млинчиків.

Зазначено, що кожен вид борошна має як переваги, так і обмеження. Тому розроблення сумішей на основі обраних видів борошна дозволить досягти прогнозованих реологічних характеристик тіста та забезпечити високі показники якості та харчової цінності млинчиків. Зокрема, поєднання рисового та кукурудзяного борошна дозволяє отримати прогнозовані реологічні характеристики тіста, тоді як додавання соєвого борошна та борошна амаранту значно підвищує його харчову та біологічну цінність. Розроблені моделі сумішей безглютенових видів борошна надано на рис. 1.

<i>Композиційна суміш</i>	<i>Характеристика суміші</i>
<i>рисове + гречане борошно</i>	покрощує текстуру та еластичність
<i>рисове + кукурудзяне борошно</i>	забезпечує тонку структуру
<i>кукурудзяне + амарантове борошно</i>	покрощують текстуру тіста
<i>рисове + соєве борошно</i>	забезпечує м'яку структуру та гнучкість млинчиків

Рис. 1. Композиційні суміші безглютенових видів борошна

Результати дослідження свідчать про доцільність використання рисового борошна як основного компоненту композиційної суміші для млинчиків у поєднанні з амарантовим та соєвим борошном, що сприяє покращенню процесів структуроутворення та підвищенню харчової цінності страви. Крім того, кукурудзяне борошно може бути включене до складу борошняних сумішей для поліпшення текстури та смакових характеристик млинчиків.

Згідно з численними літературними джерелами, безглютенове борошно не містить у своєму складі клейковини, що створює певні складнощі з формуванням структури тіста. Тому у складі композиційних сумішей безглютенового борошна доцільно застосовувати крохмалі, які можуть частково компенсувати відсутність глютену. Найбільш розповсюдженими є кукурудзяний та картопляний крохмалі, які завдяки своїм функціональним властивостям широко використовуються у рецептурах безглютенової продукції. Використання даних видів крохмалів у склад сумішей для млинчиків є обґрунтованим і технологічно доцільним. Їх комбінування з різними видами безглютенового борошна дозволить компенсувати дефіцит глютену, забезпечити оптимальну консистенцію тіста, знизити ламкість млинчиків та покращити їх органолептичні характеристики.

З метою розроблення композиційних сумішей проведено дослідження з визначення водопоглинальної здатності крохмалів та обраних видів безглютенового борошна (рис. 2). Дослідження проводили у трикратній повторності. Отримані результати обробляли методами математичної статистики з визначенням середнього значення та відносної похибки.

Аналіз отриманих даних показав, що соєве борошно характеризується найвищою водопоглинальною здатністю (350 %), тоді як рисове (228 %) та кукурудзяне (238 %) демонструють нижчі показники. Низька здатність рисового борошна до водопоглинання пояснюється

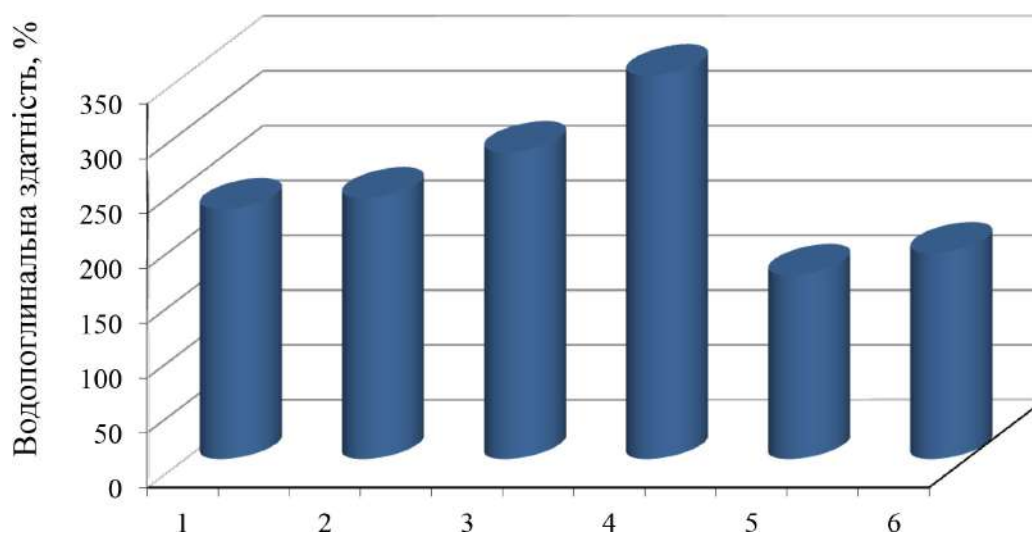


Рис. 2. Водопоглинальна здатність безглютенової сировини, %:

1 – борошно рисове, 2 – борошно кукурудзяне, 3 – борошно амаранту, 4 – борошно соєве, 5 – крохмаль кукурудзяний, 6 – крохмаль картопляний

невисоким вмістом білкових речовин: крохмаль ендосперму утворює асоціати з білками, що значно ускладнює адсорбцію води частинками борошна. Кукурудзяне борошно також має відносно невисоку водопоглинальну здатність. Високий показник соєвого борошна обумовлений значним вмістом білків, що забезпечує максимальне поглинання води серед обраних видів борошна [11].

Водопоглинальна здатність амарантового борошна перевищує показники рисового та кукурудзяного, що пояснюється підвищеним вмістом білків і клітковини. Кукурудзяний крохмаль демонструє дещо нижчі показники водопоглинальної здатності порівняно з картопляним. На основі отриманих даних розроблено кілька моделей композиційних сумішей борошна для використання в рецептурному складі млинчиків (рис. 3).

Дослідження показали, що застосування запропонованих композиційних сумішей борошна у рецептурах млинчиків забезпечує отримання готового продукту з високими органолептичними показниками. Для досягнення стабільної структури тіста та підвищення механічної міцності млинчиків доцільно включити до рецептури картопляний крохмаль із заміною 10 %

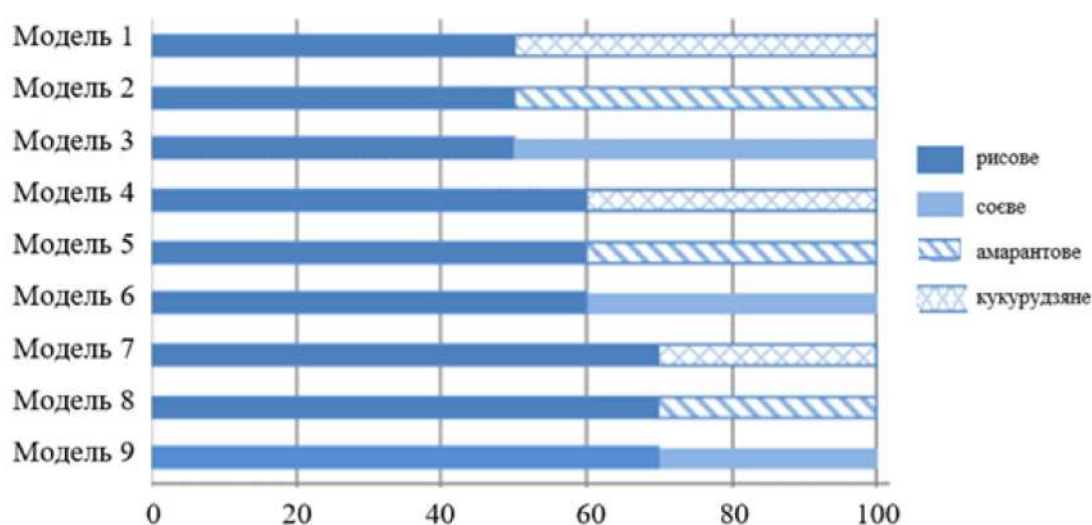


Рис. 3. Модельні зразки композиційних сумішей безглютенового борошна



рисового борошна, що дозволить компенсувати відсутність глютену. Крім того, додавання картопляного крохмалю сприяє підвищенню в'язкості тіста, його водоутримуючої здатності та формуванню більш однорідної структури [12]. Рецептурний склад модельних систем для виробництва безглютенових млинчиків надано в табл. 1.

Таблиця 1

Рецептурний склад модельних систем (МС) для безглютенових млинчиків

Найменування інгредієнтів	Вміст інгредієнтів, %		
	МС 1	МС 5	МС 9
Борошно рисове	12,16	13,00	17,04
Борошно кукурудзяне	13,52	–	–
Борошно амаранту	–	10,79	–
Борошно соєве	–	–	8,13
Крохмаль картопляний	1,37	3,25	1,89
Молоко коров'яче	67,62	67,62	67,62
Яйця курячі	5,40	5,40	5,40
Цукор білий	1,63	1,63	1,63
Сіль кухонна	0,52	0,52	0,52
Маса тіста	100,00	100,00	100,00

Примітка: втрати за теплового оброблення є стандартними та становлять 35...37 %

Технологічну схему виробництва безглютенових млинчиків представлено надано на рис. 4. Як видно, основні технологічні операції тотожні класичній технології виробництва млинчиків, а основна відмінність полягає у використанні безглютенової сировини як альтернатива пшеничному борошну. Така побудова технологічного процесу дозволяє його впровадження без додаткової доукомплектації закладу спеціалізованим устаткуванням за умов дотримання правил харчової безпеки щодо поводження з алергенами.

Дослідження показників безпечності безглютенових млинчиків є одним із головних складових оцінювання якості кулінарної продукції. Формування безпечності безглютенових млинчиків повинно розглядатися не як формальне виключення глютенівмісної сировини, а як комплексна трансформація ризик-профілю продукту. Заміна пшеничного борошна на рисове, кукурудзяне, амарантове та соєве (табл. 1) зумовлює зміну мікробіологічних, хімічних та фізичних небезпечних чинників, що потребує системного аналізу.

Елімінація пшеничного борошна усуває джерело глютену – білкового комплексу, що є тригером аутоімунної реакції у хворих на целиацію. Водночас альтернативні зернові інгредієнти характеризуються іншими специфічними ризиками, притаманними їх ботанічному походженню та технології перероблення [13, 14].

Рисове борошно може містити спори *Bacillus cereus*, які здатні зберігатися після традиційних режимів термооброблення та активізуватися за порушення температури зберігання. Кукурудзяна сировина асоціюється з ризиком контамінації мікотоксинами, що потребує суворого контролю виробника (постачальника). Амарантове борошно характеризується підвищеним вмістом ліпідів (підвищує ймовірність окиснювального псування). Соєве борошно належить до групи алергенів, що формує необхідність обов'язкового маркування готової продукції. Таким чином, заміна зернової основи не знижує загальний рівень безпеки, а змінює її структуру, що потребує адаптації підходів до контролю сировини та готового продукту.

Ключовою відмінністю безглютенових млинчиків є відсутність клейковинної сітки – просторової білкової структури, яка у традиційних виробках забезпечує зв'язування вологи та формування еластичної матриці. У безглютенових композиціях домінує крохмально-білкова

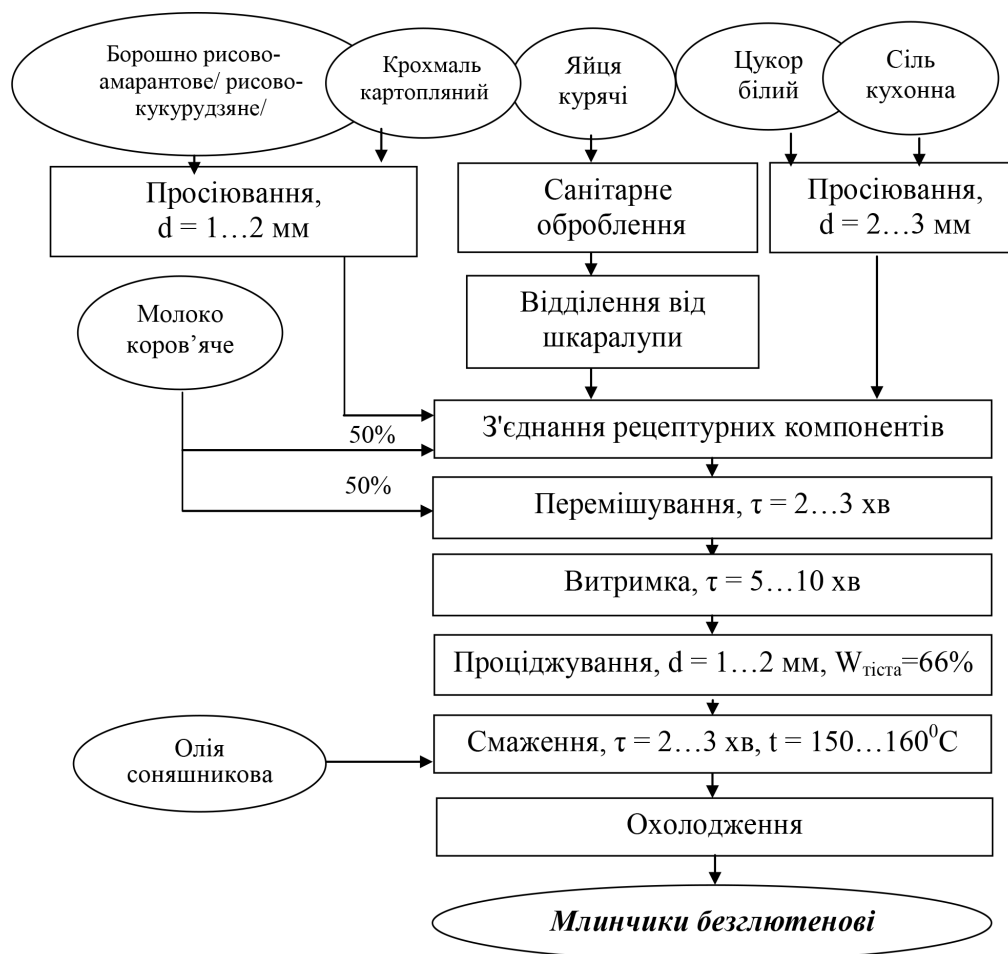


Рис. 4. Технологічна схема виробництва безглютенових млинчиків

система, де процес зв'язування води має менш стабільний характер. Вологість тіста становить 66 %, що відповідає високим значенням активності води ($a_w > 0,94$). За таких параметрів формуються сприятливі умови для розвитку мезофільної мікрофлори у разі порушення температурного режиму. Відсутність глютену зумовлює підвищену мобільність вологи до структури виробу, зменшення структурного опору дифузії, потенційне прискорення мікробіологічних процесів.

Таким чином, безглютенові млинчики можуть характеризуватися меншою мікробіологічною стабільністю порівняно з традиційними пшеничними аналогами, що обґрунтовує необхідність диференційованого підходу до встановлення терміну придатності.

Технологічна схема виробництва (рис. 4) дозволяє інтерпретувати процес у межах бар'єрної моделі (*hurdle technology*). Просіювання борошна ($d = 1...2\text{мм}$) виконує функцію механічного бар'єру щодо фізичних домішок. Санітарне оброблення яєць з використанням професійних миючих та дезінфікуючих засобів суттєво знижує ризик виникнення біологічних небезпечних чинників (*Salmonella spp.*). Тобто основний мікробіологічний бар'єр формується не тільки на стадії механічного кулінарного оброблення, а й на стадії смаження за температури $150...160^\circ\text{C}$ протягом $2...3$ хвилин (відбувається інактивація вегетативних форм мікроорганізмів). Однак подальше охолодження створює зону потенційного вторинного обсіменіння, особливо в умовах відкритого виробництва у закладах ресторанної індустрії. За відсутності контрольованого повітряного середовища та чіткого зонування виробничих потоків ризик повторної контамінації зростає.

Окремої уваги потребує профілактика перехресної контамінації глютену у змішаних виробництвах, де безглютенові млинчики можуть виготовлятися паралельно з традиційними

виробами. Контроль вмісту глютену в готовій продукції доцільно здійснювати з використанням методів, що забезпечують визначення рівня не вище 20 ppm відповідно до міжнародних вимог до маркування gluten-free продукції [15, 16].

Висока вологість продукту, нейтральні значення рН та наявність легкодоступних вуглеводів формують передумови для мікробіологічного росту. З урахуванням структурної специфіки безглютенової матриці можна припустити, що її стабільність у післятермічний період є нижчою порівняно з традиційними пшеничними виробами.

За холодильного зберігання (+2...+6 °C) безглютенові млинчики доцільно відносити до групи швидкопсувних виробів із рекомендованим терміном реалізації не більше 24 годин без начинки. Заморожування (до температури –18 °C) дозволяє пролонгувати термін зберігання за умови збереження структурних та органолептичних показників після дефростації.

Безпечність безглютенових млинчиків є результатом взаємодії рецептурного складу, структурних характеристик тіста та параметрів технологічного процесу. Елімінація глютену усуває специфічний тригерний фактор для хворих на целиацію, однак одночасно формує нову конфігурацію ризиків, пов'язаних з альтернативною сировиною та високою активністю води. Таким чином, виробництво безглютенових млинчиків у закладах ресторанної індустрії повинно супроводжуватися адаптованою системою контролю сировини, профілактикою перехресної контамінації та науково обґрунтованим встановленням терміну придатності.

Висновки. У результаті досліджень встановлено, що виробництво безглютенових борошняних страв супроводжується певними складнощами, які пов'язані з відсутністю клейковини у сировині. Вирішення даної проблеми є актуальним завданням і створює передумови для удосконалення рецептур та технологічних процесів виробництва безглютенових страв з метою забезпечення високої якості та безпечності. Досліджено водопоглинальну здатність обраних видів борошна. Встановлено, що найбільшими значеннями водопоглинальної здатності характеризується соєве борошно (350 %), найменшими – рисове (228 %) та кукурудзяне (238 %).

Розроблено композиційні суміші борошна, які використано у складі модельних систем безглютенових млинчиків. Для досягнення стабільної структури тіста та підвищення механічної міцності млинчиків доцільно включити до рецептури картопляний крохмаль із заміною 10 % рисового борошна, що дозволить компенсувати відсутність глютену.

Елімінація глютену у рецептурі млинчиків змінює структуру ризиків продукції, що потребує адаптації системи контролю сировини, профілактики перехресної контамінації та науково обґрунтованого встановлення терміну придатності. Запропонований ризик-орієнтований підхід забезпечує харчову безпечність безглютенових млинчиків у закладах ресторанної індустрії відповідно до принципів НАССР.

Список використаних джерел

1. Krueger A., Sahay R. D., Gecili E., Henize A. W., Beck A. F., Klein M., Mallon D. The prevalence and impact of gluten-free food insecurity in pediatric celiac disease. *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition*. 2026. Vol. 82 (1), pp. 108–117. DOI: 10.1002/jpn3.70235
2. Положишникова Л. О., Суткович Т. Ю., Олійник Н. В. Розширення асортименту безглютенових мучних кондитерських виробів. *Вісник Полтавського університету економіки і торгівлі*. 2022. № 3(101). С. 67–73. DOI: <https://doi.org/10.37734/2518-7171-2022-3-4>
3. Дорохович В., Гріцевич М., Ісакова Н. Розроблення борошняних кондитерських виробів для хворих на целиацію в Україні та за кордоном. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Khnit_2010_1_27
4. Serin Y., Andruskienė J., Verma A. K., Śmiełowska M., Dzingelevičius N., Vilčiauskis A., Vaičekauskaitė R., Bradauskienė V. Evaluation of quality of life in adult celiac patients living in Lithuania and their compliance with a gluten-free diet: a pilot study. *Medicina (Kaunas)*. 2025. Vol. 61 (7). 1278; DOI: <https://doi.org/10.3390/medicina61071278>



5. Чорна Н. В., Омельченко С. Б., Федак Н. В., Котляр О. В. Обґрунтування технології суміші сухої безглютенової для виготовлення панкейків. *Scientific Collection "InterConf"*, (158). 2023. С. 284–293.
6. Боковець С. П. Використання нетрадиційної сировини рослинного походження у технології безглютенового тіста для вареників. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2024. В. 14, Т. 2. С. 20–21.
7. Антоненко А. В. Технологія борошняних страв із використанням безглютенового борошна / А. В. Антоненко, Т. В. Бровенко, О. В. Василенко, Ю. В. Земліна, Г. А. Толок, М. Ю., М. Ю. Криворучко, І. М. Грищенко. Вчені 71 записки ТНУ ім. В.І. Вернадського. *Серія: Технічні науки. Технологія харчової та легкої промисловості*. Т. 32 (71). Ч. 2. № 1. 2021.
8. Горач О. О. Проблеми та перспективи розвитку виробництва безглютенових продуктів харчування в Україні. *Технічні науки: збірник наукових праць Криворізького державного педагогічного університету*. 2022. № 5. С. 103–109.
9. Petri P. Z., Silva P. D. S., Ascheri J. L. R. A. Rethinking structure: challenges in the development of gluten-free pasta and baked goods: a review. *Discoveries in Agriculture and Food Sciences*. 2026. 14(01). pp. 22–50. DOI:10.14738/tnc.1401.19861
10. Gorach O., Dzyundzha O., Novikova N., Rezvykh N. Development of Gluten-Free Products Technology Using Flax Flour. *Technology Audit and Production Reserves*. 2025. Vol. 2, № 3(82), pp. 58–63. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.326217>
11. Грищенко А. М., Дробот В. І. Технологічні властивості безглютенових видів сировини. *Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій*. 2014. Т. 1, Вип. 46. С. 162–166.
12. Костін Д. П., Юрченко С. Л. Розроблення рецептурного складу безглютенових млинчиків. Інноваційні технології розвитку харчових виробництв та ресторанної індустрії: наукові пошуки молоді : III Міжнародна науково-практична конференція здобувачів вищої освіти і молодих вчених, 6 листопада 2025 р. Харків : ДБТУ, 2025. С. 43.
13. Abdi F., Zuberi S., Blom J. J., Armstrong D., Pinto-Sanchez M. I. Nutritional considerations in celiac disease and non-celiac gluten/wheat sensitivity. *Nutrients*. 2023. Vol. 15, No. 6. Art. 1475. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu15061475>
14. Wei Y. Advances in understanding wheat-related disorders: A comprehensive review on gluten-free products with emphasis on wheat allergy, celiac and non-celiac gluten sensitivity. *Food Chemistry Advances*. 2024. Vol. 3. Art. 100627. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100627>
15. Li Y., Liu Q., Godefroy S., Li J., Chen Y. Gluten contamination of labelled gluten-free food products marketed in China. *Foods*. 2025. Vol. 14, No. 12. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods14122025>
16. Колеснікова М. Б., Гринченко О. О., Юрченко С. Л., Андрєєва С. С., Черемська Т. В. Системне забезпечення харчової безпечності продукції закладів ресторанного господарства. *Таврійський науковий вісник. Серія «Технічні науки»*, 2022. № 4. С. 64–73. DOI <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.4.8>

Дата першого надходження статті до видання: 09.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 02.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)





S. Iurchenko, M. Kolesnikova, T. Cheremskaya
State Biotechnological University

**DEVELOPMENT OF GLUTEN-FREE PANCAKE TECHNOLOGY
AND IMPLEMENTATION OF A RISK-BASED APPROACH
TO ENSURING THEIR SAFETY**

Summary

The article presents the results of scientific research aimed at developing a technology for gluten-free pancakes for food service establishments, taking into account the functional and technological properties of gluten-free raw materials and modern approaches to ensuring food safety. The relevance of the study is conditioned by the fact that a significant proportion of consumers cannot consume products containing gluten; therefore, there is a need for the complete elimination of wheat flour as the main source of gluten, which triggers autoimmune reactions in patients with celiac disease. At the same time, the use of alternative cereal and legume ingredients in the technology of gluten-free pancakes is associated with certain technological and safety-related risks.

The purpose of the study is the scientific substantiation of formulations and technological parameters for the production of gluten-free pancakes and the implementation of a risk-oriented approach to ensuring their safety in accordance with the principles of HACCP. In the course of the research, the water absorption capacity of rice, corn, amaranth, and soy flours, as well as starches acting as structure-forming agents, was determined. Based on the obtained results, composite mixtures of gluten-free raw materials were proposed that are capable of ensuring optimal rheological properties of the batter and a stable structure of the finished products.

The expediency of introducing potato starch to compensate for the absence of gluten and to improve the structural and mechanical characteristics of gluten-free dough has been substantiated. An analysis of the transformation of the product risk profile when replacing wheat flour with alternative gluten-free raw materials was carried out. Changes in the nature of potential microbiological, chemical, and physical hazards were identified, which necessitates the adaptation of raw material control systems, technological processes, and finished product control, as well as the strengthening of measures to prevent cross-contamination with gluten.

A risk-oriented approach to ensuring the safety of gluten-free pancakes in food service establishments is proposed, which provides for the adjustment of critical control points and a scientifically justified determination of the product shelf life. The obtained results have practical significance and can be used to expand the range of gluten-free flour-based dishes on the menus of food service establishments of various formats, provided that food safety management systems are implemented.

Keywords: gluten-free pancakes, gluten, celiac disease, gluten-free flour, composite mixture, water absorption capacity, risk-oriented approach, safety.

НАУКОВИЙ ВІСНИК
Таврійського державного агротехнологічного університету

Наукове фахове видання

Випуск 16, том 1

Коректура • *Н. Ігнатова*

Комп'ютерна верстка • *Т. Клименко*

Відповідальний за випуск • к.т.н., професор Скляр О. Г.

Дата розміщення онлайн: 18.05.2026. Дата друку: 25.05.2026.

Видавництво – Видавничий дім «Гельветика»
65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1
Телефон +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 7623 від 22.06.2022