

# МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ  
АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО



DMYTRO MOTORNYYI TAVRIA STATE  
AGROTECHNOLOGICAL UNIVERSITY



## ПРАЦІ

Таврійського державного  
агротехнологічного університету

*Технічні науки*

PROCEEDINGS OF TAVRIA STATE  
AGROTECHNOLOGICAL UNIVERSITY

*Technical sciences*

*Виходить 3 рази на рік  
Видається з 1998 р.*

Випуск 26, том 1  
Issue 26, volume 1

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

DOI: 10.32782/2078-0877-2026-26-1



Видавничий дім  
«Гельветика»  
2026



УДК [631.3+621.3+004+663/664]

Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання. / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. А. І. Панченко. – Запоріжжя: ТДАТУ, 2025. Вип. 26, т. 1. 320 с.

ISSN 2078-0877

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**

Панченко А. І., д-р техн. наук, проф. (Україна)

**Editor in chief**

Panchenko A., Dr of Tech. Sci., Prof. (Ukraine)

**Заступник головного редактора**

Волошина А.А., д-р техн. наук, проф. (Україна)

**Deputy editors in chief**

Voloshina A., Dr of Tech. Sci., Prof. (Ukraine)

**Відповідальний секретар**

Волошина А. А., д-р техн. наук, проф. (Україна)

**Executive secretary**

Voloshina A., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)

**Технічний секретар**

Погорельцева Д. О. (Україна)

**Technical secretary**

Pogoreltseva D. (Ukraine)

**Члени редколегії:**

1. Антощенко Р. В., д-р техн. наук, проф. (Україна)
2. Бур'ян С. О., канд. техн. наук, доц. (Україна)
3. Вершков О. О., канд. техн. наук, доц. (Україна)
4. Войтов В. А., д-р техн. наук, проф. (Україна)
5. Галько С. В., канд. техн. наук, доц. (Україна)
6. Гуцол Т. Д., д-р техн. наук, проф. (Україна)
7. Дідур В. В., д-р техн. наук, проф. (Україна)
8. Карпалюк І. Т., д-р техн. наук, проф. (Україна)
9. Кідалов В.В. д-р ф.-м. наук, проф. (Україна)
10. Кюрчев С. В., д-р техн. наук, проф. (Україна)
11. Мірошник О. О., д-р техн. наук, проф. (Україна)
12. Мороз О. М., д-р техн. наук, проф. (Україна)
13. Паламарчук І. П., д-р техн. наук, проф. (Україна)
14. Самойчук К. О., д-р техн. наук, проф. (Україна)
15. Тітова О. А., д-р пед. наук, проф. (Україна)
16. Абдуллоев Мамадамон, канд. техн. наук, доц. (Таджикистан)
17. Гловацький Шимон, д-р наук, проф. (Польща)
18. Кавакзех Мохаммед, PhD, проф. (Йорданія)
19. Ліна Хані Хуссінат, PhD, доц. (Йорданія)
20. Мудрик Кшиштоф, д-р наук, проф. (Польща)
21. Худхайфа Ахмед, PhD, доц. (Йорданія)
22. Шафранец Андржей, д-р техн. наук, проф. (Польща)

**Editorial Board members:**

1. Antoshchenkov R., Dr. of Tech. Sci., Prof. (Ukraine)
2. Burian S., Can. of Eng. Sci., Assoc. Prof. (Ukraine)
3. Vershkov O., Can. of Eng. Sci., Assoc. Prof. (Ukraine)
4. Vojtov V., Dr. of Tech. Sci. (Ukraine)
5. Halko S., Can. of Tech. Sci., Assoc. Prof. (Ukraine)
6. Hutsol T., Dr. of Tech. Sci., Prof. (Ukraine)
7. Didur V., Dr. of Tech. Sci., Prof. (Ukraine)
8. Karpaliuk I., Dr. of Tech. Sci., Full Prof. (Ukraine)
9. Kidalov V., Dr. of Phys. And Math. Sci., Dr. of Tech. Sci.,
10. Kiurchev S., Dr. of Tech. Sci., Prof. (Ukraine)
11. Miroshnyk O., Dr. of Tech. Sci., Prof. (Ukraine)
12. Moroz O., Dr. of Tech. Sci., Prof. (Ukraine)
13. Palamarchuk I., Dr. of Tech. Sci., Prof. (Ukraine)
14. Samoichuk K., Dr. of Tech. Sci., Prof. (Ukraine)
15. Titova O., Dr. of Ped. Sci., Prof. (Ukraine)
16. Abdullo Mamadamon, Can. of Eng. Sci., Assoc. Prof. (Tajikistan)
17. Głowacki, Szymon, Hab. Dr. of Sci. ScD, Prof. (Poland)
18. Qawaqzeh Mohamed, PhD, Prof. (Prof.)
19. Lina Hani Hussinat, PhD, Assoc. Prof. (Jordan)
20. Mudryk Krzysztof, Dr. of Sci., Prof. (Poland)
21. Huthaifa Ahmad Al\_Issa, PhD, Assoc. Prof. (Jordan)
22. Szafranec Andrzej, Dr. of Tech. Sci., Prof. (Poland)



**ПРАЦІ  
Таврійського державного  
агротехнологічного університету**

**Випуск 26, том 1**

**Засновник**

Таврійський державний агротехнологічний  
університет імені Дмитра Моторного

Заснований у 1998 році

Реєстрація суб'єкта у сфері друкованих медіа:  
Рішення Національної ради України з питань телебачення і  
радіомовлення № 1673 від 23.05.2024 року.

Ідентифікатор медіа: R30-04777.

Суб'єкт у сфері медіа – Таврійський державний  
агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного  
(просп. Богдана Хмельницького, буд. 18, м. Мелітополь  
Запорізької обл., 72312, office@tsatu.edu.ua,  
тел. (099) 614-83-02).

Виходить 3 рази на рік

Рекомендовано до друку вченою радою  
Таврійського державного агротехнологічного  
університету імені Дмитра Моторного  
Протокол № 8 від 31.03.2026 р.

Відповідно до наказу МОН від 17.03.2020 № 409 видання  
включено до Переліку наукових фахових видань України  
категорії Б за спеціальностями: F3 Комп'ютерні науки,  
G11 Машинобудування (за спеціалізаціями), G3 Електрична  
інженерія, G4 Енерговиробництво (за спеціалізацією),  
G13 Харчові технології

**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: 10.32782/2078-0877-2026-26-1

**PROCEEDINGS OF TAVRIA STATE  
AGROTECHNOLOGICAL UNIVERSITY**

**Issue 26, volume 1**

**Founder**

Dmytro Motorny Tavria State  
Agrotechnological University

Founded in 1998

Print media registration: Decision of the National Council  
of Ukraine on Television and Radio Broadcasting  
No. 1673 as of 23.05.2024. Media ID: R30-04777.

The media entity is Dmytro Motorny Tavria State  
Agrotechnological University (72312, Zaporizhzhia region,  
Melitopol, 18, B. Khmelnytskyi Ave,  
office@tsatu.edu.ua, tel. (099) 614-83-02).

Published 3 times a year

Recommended for publication by the Academic  
Board of Dmytro Motorny Tavria State  
Agrotechnological University  
Record No. 8, dated March 31, 2026

According to the Order of the MES of Ukraine as of 17.03.2020,  
No. 409, the journal is included in the List of professional  
scientific editions of Ukraine (category "B") in the following  
specialties: F3 Computer Sciences, G11 Mechanical Engineering  
(by specialization), G3 Electrical Engineering, G4 Energy  
Production (by specialization), G13 Food Technology

**Address of the Editorial office**

*Legal address:* 72312, Zaporizhzhia region  
Melitopol, 18, B. Khmelnytskyi Ave.  
*Actual address:* 69600, Zaporizhzhia region Zaporizhzhia,  
66, Zhukovskiy Str.  
<https://oj.tsatu.edu.ua>,  
DOI: 10.32782/2078-0877-2026-26-1

## ЗМІСТ

### ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

*С. В. Носань, А. Ф. Дяденчук*

ВПЛИВ ІНЖЕНЕРІЇ ЛЕГУВАННЯ ТА ПРОСТОРОВОЇ КОНФІГУРАЦІЇ  
СТРУКТУРИ НА ЕНЕРГЕТИЧНУ ЕФЕКТИВНІСТЬ  
ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ZnO/POROUS-Si/Si.....10

*В. Р. Румянцев, Т. А. Шарапова, Г. В. Карпенко*

ОСОБЛИВОСТІ ПЛАНУВАННЯ ЗАХОДІВ ЛІКВІДАЦІЇ НАСЛІДКІВ  
НА АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯХ.....16

*В. П. Савінов, С. В. Галько*

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОМОБІЛЬНОГО ПАЛИВА  
ШЛЯХОМ ОБРОБКИ МАГНІТНИМИ ПОЛЯМИ.....21

*О. Ю. Юрченко, Г. В. Барсукова*

ДО ПИТАНЬ АВТОНОМНИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ НА ДОРОГАХ  
ЗАГАЛЬНОГО КОРИСТУВАННЯ.....31

### КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ

*І. О. Воробйов, Д. В. Великодний*

МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ Й ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ  
СИСТЕМИ ВІДДАЛЕНОГО ДОСТУПУ ДО ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОГО  
ОБЛАДНАННЯ.....38

*С. С. Грушко, І. І. Афанасьєв, А. В. Тіменко, Н. А. Куликовська*

АРХІТЕКТУРА ІНТЕГРОВАНОЇ КЛІЄНТ-СЕРВЕРНОЇ СИСТЕМИ  
МОНІТОРИНГУ З ВИКОРИСТАННЯМ WEBSOCKET ДЛЯ ОБМІНУ  
ДАНИМИ В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ.....47

*У. О. Zhyvylo, А. S. Yanko, Е. Y. Rubin, V. V. Magaletska*

ADAPTIVE TRUST ASSESSMENT MODEL FOR CROSS-DOMAIN SECURITY  
SYSTEMS BASED ON ZERO TRUST ARCHITECTURE.....52

*І. С. Узун, М. В. Лобачев*

БЮДЖЕТОВАНА ДРЕЙФ-ІНІЦІЙОВАНА МІКРОАДАПТАЦІЯ  
ДЛЯ ПОТОКОВОГО ПРОГНОЗУВАННЯ ЧАСОВИХ РЯДІВ  
ЗА УМОВАМИ ЗМІН РЕЛЕВАНТНОСТІ МОДАЛЬНОСТЕЙ.....67

### МАШИНОБУДУВАННЯ (ЗА СПЕЦІАЛІЗАЦІЯМИ)

*С. С. Антоненко, Е. В. Колісниченко, В. Ю. Кондусь, О. В. Ратушний, О. С. Ковязін*

ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ НАСОСА З ВІДЦЕНТРОВО-ВИХРОВИМ  
СТУПЕНЕМ ПОРІВНЯНО З НАСОСОМ ТИПУ ЕВН.....75

*В. В. Дідур, Д. П. Журавель, Я. В. Білоконь*

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРЕСУВАННЯ НАСІННЯ РИЦИНИ  
В ШНЕКОВИХ ПРЕСАХ.....83

<i>Д. В. Дмитревський, О. Є. Загорулько</i> АВТОМАТИЗАЦІЯ ПОТОКОВИХ ЛІНІЙ І РОБОТИЗОВАНИХ КОМПЛЕКСІВ У ВИРОБНИЦТВІ КОНДИТЕРСЬКИХ ВИРОБІВ.....	91
<i>О. О. Ковальов, І. С. Панов</i> ПРОЦЕСИ УТИЛІЗАЦІЇ РІЗНИХ ВИДІВ ПАКУВАЛЬНОЇ ТАРИ Й УПАКОВКИ, ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ ТА РІШЕННЯ.....	98
<i>В. П. Кувачов, О. О. Червоткіна</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ШВИДКОСТІ ПРЕСУВАННЯ НА ФІЗИЧНУ ЩІЛЬНІСТЬ БРИКЕТІВ ІЗ РІЗНОТИПНОЇ БІОМАСИ.....	105
<i>О. Є. Мацулевич, І. Р. Тетервак</i> ВЕРСТАТНЕ ПРИСТОСУВАННЯ ДЛЯ ОБРОБКИ ЧЕРВ'ЯЧНИХ ВАЛІВ ДЛЯ ВУЗЛІВ ТА АГРЕГАТІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ.....	111
<i>В. Т. Надикто, І. О. Жокін</i> ЕКСПЛУАТАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНА ОЦІНКА ТРИМАШИННОГО ПОСІВНОГО МТА.....	117
<i>О. А. Новохат, В. В. Філіпов</i> КІНЕТИЧНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ДЕГІДРАТАЦІЇ БІШОФІТУ ЗА ТЕРМОРАДІАЦІЙНОГО ПІДВЕДЕННЯ ТЕПЛОТИ.....	126
<i>Н. О. Паляничка, В. Ф. Ялчак, О. П. Прокопенко</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІННОВАЦІЙНОГО СПОСОБУ ЗАМОРОЖЕННЯ ТА ДЕФРОСТАЦІЇ ПЛОДООВОЧЕВОЇ СИРОВИНИ.....	135
<i>А. І. Панченко, А. А. Волошина, І. А. Панченко, С. О. Хованський, А. А. Волошин</i> ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ЗМІНИ ВИХІДНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАНЕТАРНОГО ГІДРОМОТОРА ПРИ ЗНОСІ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ РОТОРІВ.....	142
<i>А. В. Рябовол</i> МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ПРОЄКТУВАННЯ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ АКТИВАТОРІВ ДВОРЕЖИМНИХ СТРУМИННИХ АПАРАТІВ.....	155
<i>К. О. Самойчук, Є. Р. Прісс</i> АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОТОРНОГО ДИСПЕРГАТОРА ДЛЯ СТВОРЕННЯ ГОМОГЕННИХ БІЛКОВИХ СТРУКТУР.....	168
<i>В. А. Самохвал, І. М. Білоус</i> РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРЕСУВАННЯ БРИКЕТІВ І ВІДЖИМУ ОЛІЇ У ШНЕКОВОМУ ПРЕСІ.....	175
<i>О. Г. Скляр, Р. В. Скляр, С. В. Сиротюк, С. В. Коробка, О. С. Пушка</i> АНАЛІЗ НАЙПОШИРЕНІШИХ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ У РОБОТІ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК.....	188
<i>О. О. Шокарев, М. М. Данченко, І. В. Колокольчикова, О. М. Шокарев</i> ФУНКЦІОНАЛЬНО-ВАРТІСНИЙ АНАЛІЗ ОБЧІСУВАЛЬНО-РІЗАЛЬНОГО МОДУЛЯ ЗЕРНОЗБИРАЛЬНОГО КОМБАЙНА.....	195
<i>Ю. Б. Юніс</i> ФІНАНСОВА ДОЦІЛЬНІСТЬ, ЕКОЛОГІЧНИЙ ВПЛИВ ТА ВИБІР ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ВОЛОКНИСТО- АРМОВАНИХ АЕРОКОСМІЧНИХ КОНСТРУКЦІЙ.....	204

## ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Л. В. Баль-Прилипка, М. С. Ніколаєнко, М. Є. Сердюк, В. М. Бандура, І. Є. Іванова</i> БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНА ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПРИДАТНОСТІ ФЕРМЕНТОВАНИХ РОСЛИННИХ СУБСТРАТІВ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ В М'ЯСНИХ СИСТЕМАХ.....	212
<i>І. М. Белова, В. М. Гіджєлицький, І. Я. Стадник</i> ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ЕКСТРАГУВАННЯ ЧОРНОБРИВЦІВ У РОТОРНО-ПУЛЬСАЦІЙНОМУ АПАРАТІ.....	220
<i>A. O. Helikh, Pang Yongfeng</i> INNOVATIVE TECHNOLOGY FOR DOUGH SHELLS IN MINCED SEMI-FINISHED PRODUCTS BASED ON THE SYNERGY OF GLUTEN-FREE RAW MATERIALS AND MICROALGAE PROTEIN ISOLATE FOR MILITARY AND HEALTHY DIET.....	228
<i>В. А. Гніцевич, К. А. Доронін</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ФЕРМЕНТАЦІЇ ХУМУСУ СТАРТОВИМИ КУЛЬТУРАМИ.....	234
<i>В. С. Калина, В. О. Троєкурова, М. В. Луценко, І. І. Волосенков</i> ПЕРСПЕКТИВИ ВИРОБНИЦТВА ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ОЛІЙНОЇ ТА КРУП'ЯНОЇ СИРОВИНИ СПОСОБОМ ЕКСТРУДУВАННЯ.....	241
<i>Н. V. Kaplan, T. A. Manoli, O. M. Myroshnichenko, Y. O. Barysheva, T. M. Afanasieva</i> PROBLEMS, PROSPECTS OF PET-NAT PRODUCTION TECHNOLOGY IN UKRAINE.....	248
<i>Л. С. Ковальова, Н. А. Сова, Е. Б. Алієв, В. С. Кошулько</i> ВПЛИВ ЦІЛЬНОЗЕРНОВОГО БОРОШНА НА ЯКІСТЬ І ПРОФІЛЬ ТЕКСТУРИ ЗАТЯЖНОГО ПЕЧИВА.....	257
<i>I. L. Koretska, V. V. Polyovuk, R. V. Matyushenko</i> ANTIOXIDANT FOOD AND DRINKS AS AN INNOVATIVE DIRECTION OF RESTAURANT BUSINESS DEVELOPMENT AND THE ROLE OF PR IN THEIR POPULARIZATION.....	269
<i>Н. В. Новікова, Г. Ю. Проценко</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ОРГАНОЛЕПТИЧНИХ І ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ СУПЕРФУД-ГРАНОЛИ.....	279
<i>О. П. Прісс, Л. М. Кюрчева, Д. І. Сердюк, М. М. Гудзенко</i> ВПЛИВ ОБРОБКИ БІОЛОГІЧНО АКТИВНИМИ РЕЧОВИНАМИ НА СТРУКТУРУ ВТРАТ І ВИХІД СТАНДАРТНИХ ПЛОДІВ ОБЛІПИХИ ПІД ЧАС ХОЛОДИЛЬНОГО ЗБЕРІГАННЯ.....	285
<i>М. Є. Рацук, Т. А. Юрова, К. С. Рацук</i> ОДЕРЖАННЯ ЗАТЯЖНОГО ПЕЧИВА З ФУНКЦІОНАЛЬНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ.....	292
<i>О. Б. Ткаченко, В. В. Алексович</i> УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ БЛИХ ВИН ЗА ВИКОРИСТАННЯ ЕНОЛОГІЧНОЇ ДУБОВОЇ ДЕРЕВИНИ У ПРОЦЕСІ АЛКОГОЛЬНОЇ ФЕРМЕНТАЦІЇ.....	299

## CONTENTS

### ELECTRICAL POWER ENGINEERING, ELECTRICAL ENGINEERING AND ELECTROMECHANICS

*S. Nosan, A. Dyadenchuk*

INFLUENCE OF DOPING ENGINEERING AND SPATIAL STRUCTURE  
CONFIGURATION ON THE ENERGY EFFICIENCY OF ZnO/POROUS-Si/Si  
PHOTOCONVERTERS.....10

*V. Rumyantsev, T. Sharapova, G. Karpenko*

FEATURES OF PLANNING MEASURES FOR THE ELIMINATION  
OF CONSEQUENCES AT NUCLEAR POWER PLANTS.....16

*V. Savinov, S. Halko*

INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF AUTOMOTIVE FUEL  
THROUGH MAGNETIC FIELD TREATMENT.....21

*O. Yurchenko, H. Barsukova*

ON THE ISSUES OF AUTONOMOUS SOLAR POWER PLANTS  
ON PUBLIC ROADS.....31

### COMPUTER SCIENCES

*I. Vorobiov, D. Velykodnyi*

METHODS FOR IMPROVING RELIABILITY AND INFORMATION SECURITY  
OF A REMOTE ACCESS SYSTEM TO TELECOMMUNICATION EQUIPMENT.....38

*S. Hrushko, I. Afanasiev, A. Timenko, N. Kulykovska*

ARCHITECTURE OF AN INTEGRATED CLIENT-SERVER MONITORING SYSTEM  
USING WEBSOCKET FOR REAL-TIME DATA EXCHANGE.....47

*Y. Zhyvylo, A. Yanko, E. Rubin, V. Magaletska*

ADAPTIVE TRUST ASSESSMENT MODEL FOR CROSS-DOMAIN SECURITY  
SYSTEMS BASED ON ZERO TRUST ARCHITECTURE.....52

*I. Uzun, M. Lobachev*

BUDGETED DRIFT-INITIATED MICRO-ADAPTATION FOR STREAMING  
TIME-SERIES FORECASTING UNDER MODALITY-RELEVANCE CHANGES.....67

### MACHINE BUILDING (BY SPECIALIZATIONS)

*S. Antonenko, E. Kolisnichenko, V. Kondus, O. Ratushnyi, O. Koviazin*

PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF A PUMP  
WITH A CENTRIFUGAL-VORTEX STAGE IN COMPARISON  
WITH AN ELECTRIC CENTRIFUGAL PUMP.....75

*V. Didur, D. Zhuravel, Ya. Bilokin*

MODELING OF THE PROCESS OF PRESSING CASTOR SEEDS  
IN SCREW PRESSES.....83

*D. Dmytrevskiy, A. Zagorulko*

AUTOMATION OF PRODUCTION LINES AND ROBOTIC SYSTEMS  
IN CONFECTIONERY MANUFACTURING.....91

<i>A. Kovalyov, I. Panov</i> PROCESSES OF DISPOSAL OF VARIOUS TYPES OF PACKAGING CONTAINERS AND MATERIALS: ENVIRONMENTAL PROBLEMS AND SOLUTIONS.....	98
<i>V. Kuvachov, O. Chervotkina</i> STUDY OF THE EFFECT OF PRESSING SPEED ON THE PHYSICAL DENSITY OF BRIQUETTES MADE FROM DIFFERENT TYPES OF BIOMASS.....	105
<i>O. Matsulevych, I. Tetervak</i> MACHINE TOOL FOR PROCESSING WORM SHAFTS FOR ASSEMBLIES AND UNITS OF AGRICULTURAL MACHINERY.....	111
<i>V. Nadykto, I. Zhokin</i> OPERATIONAL AND TECHNOLOGICAL ASSESSMENT OF THREE-MACHINE SEEDING UNIT.....	117
<i>O. Novokhat, V. Filipov</i> KINETIC REGULARITIES OF BISCHOFITE DEHYDRATION UNDER THERMORADIATIVE HEAT SUPPLY.....	126
<i>N. Palianychka, V. Yalpachyk, O. Prokopenko</i> EFFICIENCY OF AN INNOVATIVE FREEZING AND DEFROSTING METHOD FOR FRUITS AND VEGETABLES.....	135
<i>A. Panchenko, A. Voloshina, I. Panchenko, S. Khovanskyi, A. Voloshin</i> EXPERIMENTAL STUDIES OF THE DYNAMICS OF CHANGES IN THE OUTPUT CHARACTERISTICS OF A PLANETARY HYDRAULIC MOTOR DURING WEAR OF THE ROTOR WORKING SURFACES.....	142
<i>A. Riabovol</i> METHODOLOGICAL FOUNDATIONS FOR DESIGNING PIEZOELECTRIC ACTUATORS OF DUAL-MODE JET DEVICES.....	155
<i>K. Samoichuk, Ye. Priss</i> ANALYTICAL STUDIES OF ROTARY DISPERSER PARAMETERS FOR THE FORMATION OF HOMOGENEOUS PROTEIN STRUCTURES.....	168
<i>V. Samokhval, I. Bilous</i> RESULTS OF NUMERICAL SIMULATION OF THE BRIQUETTING PRESSING PROCESS AND OIL EXTRACTION IN A SCREW PRESS.....	175
<i>O. Skliar, R. Skliar, S. Syrotyuk, S. Korobka, O. Pushka</i> ANALYSIS OF THE MOST COMMON ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES IN THE OPERATION OF BIOGAS PLANTS.....	188
<i>O. Shokarev, M. Danchenko, I. Kolokolchykova, O. Shokarev</i> FUNCTIONAL-COST ANALYSIS OF THE STRIPPER-CUTTING MODULE OF A GRAIN COMBINE HARVESTER.....	195
<i>Yu. Yunis</i> FINANCIAL VIABILITY, ENVIRONMENTAL IMPACT AND MANUFACTURING PROCESS SELECTION FOR FIBRE-REINFORCED AEROSPACE STRUCTURES.....	204

## FOOD TECHNOLOGIES

<i>L. Bal-Prylypko, M. Nikolaienko, M. Serdiuk, V. Bandura, I. Ivanova</i> MULTI-CRITERION ASSESSMENT OF THE TECHNOLOGICAL SUITABILITY OF FERMENTED PLANT SUBSTRATES FOR USE IN MEAT SYSTEMS.....	212
<i>I. Belova, V. Hidzhelitskyi, I. Stadnyk</i> INTENSIFICATION OF MARIGOLD EXTRACTION VIA DISCRETE ENERGY INPUT IN A ROTARY-PULSATION APPARATUS.....	220
<i>A. Helikh, Pang Yongfeng</i> INNOVATIVE TECHNOLOGY FOR DOUGH SHELLS IN MINCED SEMI-FINISHED PRODUCTS BASED ON THE SYNERGY OF GLUTEN-FREE RAW MATERIALS AND MICROALGAE PROTEIN ISOLATE FOR MILITARY AND HEALTHY DIET.....	228
<i>V. Gnitsevych, K. Doronin</i> STUDY OF THE PARAMETERS OF THE HUMUS FERMENTATION PROCESS WITH STARTER CULTURES.....	234
<i>V. Kalyna, V. Troiekurova, M. Lutsenko, I. Volosenkov</i> PROSPECTS FOR THE PRODUCTION OF FOOD PRODUCTS USING OILSEED AND CEREAL RAW MATERIALS BY EXTRUSION TECHNOLOGY.....	241
<i>H. Kaplan, T. Manoli, O. Myroshnichenko, Y. Barysheva, T. Afanasieva</i> PROBLEMS, PROSPECTS OF PET-NAT PRODUCTION TECHNOLOGY IN UKRAINE.....	248
<i>L. Kovaliova, N. Sova, E. Aliiev, V. Koshulko</i> EFFECT OF WHOLE GRAIN FLOUR ON THE QUALITY AND TEXTURE PROFILE OF HARD BISCUITS.....	257
<i>I. Koretska, V. Polyovyk, R. Matyushenko</i> ANTIOXIDANT FOOD AND DRINKS AS AN INNOVATIVE DIRECTION OF RESTAURANT BUSINESS DEVELOPMENT AND THE ROLE OF PR IN THEIR POPULARIZATION.....	269
<i>N. Novikova, H. Protsenko</i> INVESTIGATION OF ORGANOLEPTIC AND PHYSICOCHEMICAL QUALITY INDICATORS OF SUPERFOOD GRANOLA.....	279
<i>O. Priss, L. Kiurcheva, D. Serdiuk, M. Hudzenko</i> INFLUENCE OF TREATMENT WITH BIOLOGICALLY ACTIVE SUBSTANCES ON THE STRUCTURE OF LOSSES AND YIELD OF STANDARD SEA BUCKTHORN FRUITS DURING REFRIGERATED STORAGE.....	285
<i>M. Ratsuk, T. Yurova, K. Ratsuk</i> OBTAINING LONG-LASTING COOKIES WITH FUNCTIONAL PROPERTIES.....	292
<i>O. Tkachenko, V. Aleksovykh</i> IMPROVEMENT OF WHITE WINE TECHNOLOGY USING ENOLOGICAL OAK WOOD DURING ALCOHOLIC FERMENTATION.....	299



---

## ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

---

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-1>

УДК 621.383.51:621.315.592

С. В. Носань, асистент

ORCID: 0009-0001-2303-8621

А. Ф. Дяденчук, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-6625-9985

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*

e-mail: [alena.dyadenchuk@tsatu.edu.ua](mailto:alena.dyadenchuk@tsatu.edu.ua)

### ВПЛИВ ІНЖЕНЕРІЇ ЛЕГУВАННЯ ТА ПРОСТОРОВОЇ КОНФІГУРАЦІЇ СТРУКТУРИ НА ЕНЕРГЕТИЧНУ ЕФЕКТИВНІСТЬ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ZnO/POROUS-Si/Si

*Анотація.* У роботі досліджено вплив концентрації легування й товщини шарів на енергетичну ефективність фотоперетворювачів на основі гетероструктури ZnO/porous-Si/Si. За допомогою моделювання в середовищі PC1D проаналізовано зміну фотогенерації, рекомбінаційних процесів і параметрів ВАХ залежно від варіації товщини шарів ZnO й поруватого кремнію, а також рівня легування ZnO. Установлено, що оптимальні значення товщини ZnO (10 мкм) і porous-Si (1 мкм), а також концентрація легування ZnO на рівні  $10^{19}$  см<sup>-3</sup> забезпечують максимальну ефективність перетворення 22,6 %. Показано, що надмірне легування призводить до зростання рекомбінаційних втрат і зниження продуктивності. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації конструкції високоефективних фотоперетворювачів на основі кремнієвих гетероструктур.

*Ключові слова:* гетероструктура, легування, товщина шарів, PC1D, фотоперетворювач.

*Постановка проблеми.* Одним із ключових напрямів розвитку сучасної відновлюваної енергетики є підвищення ефективності сонячних елементів (СЕ) [1, 2]. Ефективним методом покращення фотоперетворювачів (далі – ФП) є оптимізація їхньої структури. Оскільки зміна будь-якого етапу виробничого процесу є складним і дорогим завданням, дедалі більше уваги приділяється моделюванню. Моделювання дає змогу швидко протестувати різні варіанти дизайну без необхідності створювати фізичні прототипи. Інструментом, який останнім часом широко використовується для моделювання сонячних елементів, є програмне забезпечення PC1D [3; 4], яке дає можливість аналізувати роботу напівпровідникових пристроїв на основі фізичних моделей.

Важливим аспектом моделювання є здатність досліджувати вплив параметрів, таких як легування й товщина активних шарів фотоперетворювачів. Легування активних шарів ФП дає змогу змінювати концентрацію носіїв заряду, що безпосередньо впливає на провідність та інші електричні властивості матеріалу. Товщина шарів визначає ефективність поглинання сонячної радіації, а також впливає на генерацію та рекомбінацію носіїв заряду. Можливість контролювати легування й товщину шарів дає змогу досягти кращого балансу між мінімізацією втрат енергії та збільшенням кількості носіїв заряду, які перетворюються на електричний струм. Це особливо важливо на тлі все більшого попиту на більш економічні й високопродуктивні технології перетворення сонячної енергії, де кожне підвищення ефективності має значний вплив на загальну продуктивність системи. Таким чином, моделювання допомагає тонко налаштувати



конструкцію сонячних елементів для максимізації використання доступної енергії та зниження виробничих витрат [5–7].

*Аналіз останніх досліджень.* Сучасні дослідження, спрямовані на підвищення ефективності сонячних елементів, зокрема через оптимізацію товщини активного шару та використання різних легуючих домішок [8–9], зосереджені на вивченні впливу легування на продуктивність сонячних елементів, оптимізації товщини активного шару, моделюванні та виборі оптимальних методів моделювання. Дослідження впливу товщини та концентрації легування n-шару кремнієвих сонячних елементів із використанням моделювання PC1D [10] показало, що оптимізація цих параметрів дає змогу досягти високої ефективності – більше ніж 20 %, що може бути використано для розробки високопродуктивних монокристалічних сонячних елементів.

Контрольоване легування зменшує втрати при рекомбінації та підвищує концентрацію носіїв заряду, що підвищує ефективність перетворення сонячної енергії. Легування значно підвищує стабільність і продуктивність фотогальванічних елементів. Наприклад, дослідження [11] аналізує вплив технологій легування на підвищення теоретичної ефективності кристалічного кремнію.

Зменшення товщини знижує витрати на матеріал і втрати на поглинання світла, але надмірне зменшення товщини може призвести до втрат через рекомбінацію носіїв заряду на поверхні. Автори [12] розглядають роль тонкого кремнієвого шару в захопленні світла та зменшенні втрат рекомбінації, а в праці [13] аналізують вплив товщини шару на характеристики гетеропереходів у сонячних елементах.

Нещодавно значне підвищення ефективності перетворення світла завдяки покращенню поглинання та зменшенню втрат рекомбінації було досягнуто завдяки використанню наноструктурованих матеріалів, зокрема поруватого кремнію-Si. Раніше ми досліджували гетероструктури на основі поруватого кремнію [14–16].

Поєднання кремнію з оксидом цинку є досить перспективним [17–18]. У дослідженні [19] та інших обговорюється використання оксиду цинку ZnO як прозорого електрода з високою провідністю й низьким поглинанням, що робить його ефективним для гетеропереходів із кремнієм. ZnO, нанесений на поруватий кремній, забезпечує кращий збір електронів і кращу взаємодію між різними шарами елемента [20].

Поруватий кремній як буферний шар виконує кілька важливих функцій, зокрема покращує пасивацію поверхні, зменшує ефекти рекомбінації носіїв заряду та підвищує поглинання світла завдяки своїй наноструктурі [21], що дає змогу суттєво покращити властивості гетеропереходу.

Хоча гетероструктура ZnO/porous-Si/Si та її застосування в сонячній енергетиці не є новою, питання оптимізації структури поруватого кремнію, моделювання фотогальванічних властивостей гетероструктури за допомогою програмного забезпечення тощо досі недостатньо досліджені.

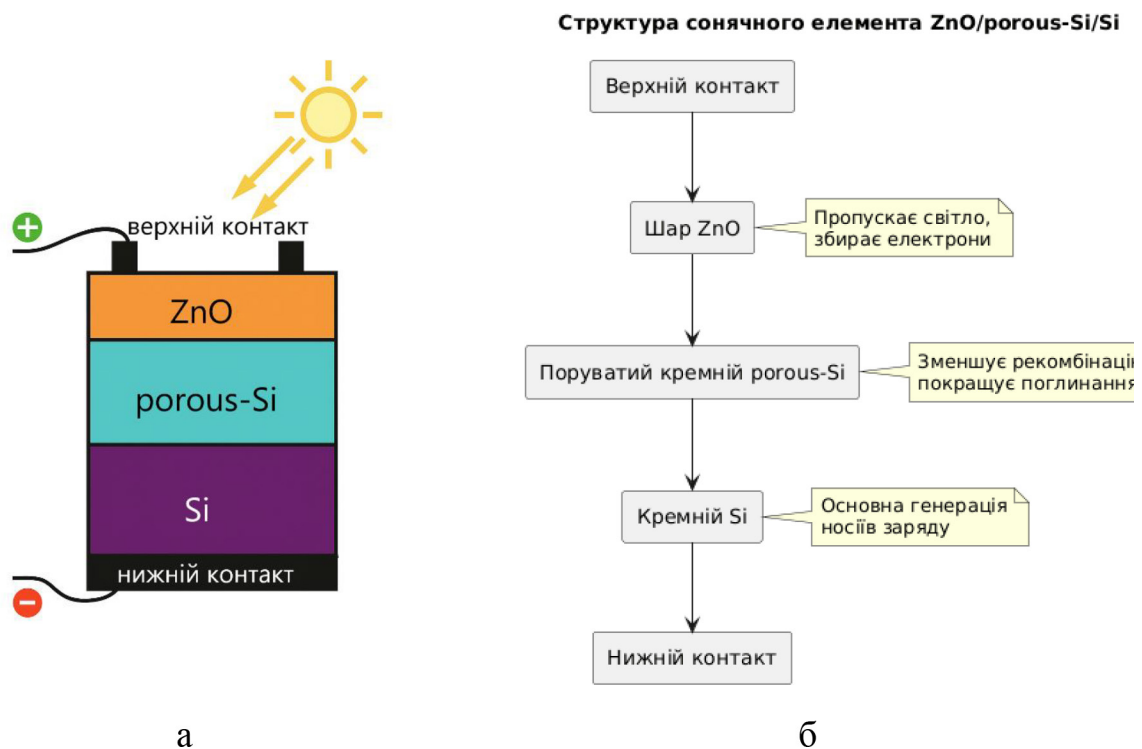
*Формулювання мети статті (постановка завдання).* Метою роботи є дослідження впливу легування й товщини на ефективність сонячних елементів за допомогою моделювання PC1D. Результати дослідження допоможуть краще зрозуміти, як зміни цих параметрів можуть підвищити ефективність фотогальванічних пристроїв, а також сприятимуть розробці більш ефективних сонячних елементів у майбутньому.

*Основна частина.* Дослідження зосереджувалося на таких факторах, як товщина й концентрація легування, щоб вивчити їх вплив на вольт-амперну характеристику фотоперетворювача ZnO/porous-Si/Si, інші основні параметри були фіксовані. Для чисельного моделювання використовувалися початкові фізичні параметри ZnO, поруватого Si та Si, наведені в роботі [22]. Хоча виробництво та продуктивність електричної енергії вимагають урахування всіх параметрів, для спрощення та розуміння впливу параметрів деякі фактори будуть фіксовані.

Схематичне представлення сонячного елемента ZnO/porous-Si/Si, де шар ZnO відіграє роль антивідбивного покриття й віконного шару, подано на рис. 1. У представленому фотоперетворювачі кожен шар виконує специфічну функцію, що впливає на ефективність перетворення енергії (рис. 1, б).

Як видно з рис. 1, поєднання прозорого електрода ZnO, буферного шару porous-Si й базового шару Si забезпечує ефективне поглинання світла, зменшення рекомбінації та генерацію носіїв заряду, що підтверджено результатами моделювання.

Фотовольтаїчні характеристики отримані з товщиною шарів ZnO та поруватого Si в діапазоні 1–10 мкм, максимальна сила струму досягалася при товщинах 10 та 1 мкм та мінімальна при 1 і 10 мкм, для шарів ZnO й поруватого Si відповідно (рис. 2). Вплив товщини шару на ВАХ припиняється при товщинах близько 15 мкм, оскільки матеріал стає об'ємним і носій рекомбінації зменшується.



**Рис. 1. Схема фотоперетворювача з гетероструктурою ZnO/porous-Si/Si:**  
а) поперечний переріз сонячного елемента ZnO/porous-Si/Si;  
б) функціональна схема шарів

Більша частина світла поглинається саме поблизу поверхні. Роблячи передній шар дуже тонким, значна частка носіїв, що походять від вхідного світла, утворюється в межах дифузійної довжини р-n-переходу. Напруга розриву показувала приблизно 711,7 мВ, ефективність – 22,6 %.

Для визначення оптимальної концентрації легування та її впливу на ефективність концентрацію допування шарів ZnO змінювали, тоді як концентрацію Si й поруватого Si підтримували на рівні  $10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Залежність ефективності від значення легуючої домішки показана на рис. 4.

Концентрація домішок постійно зростає з  $10^{13}$  до  $10^{19}$  см<sup>-3</sup>, струм і напруга також поступово збільшуються. Найвищі значення досягнуті при легуванні  $10^{19}$  см<sup>-3</sup>, а саме: 41,0 мА, 710,8 мВ і 22,6 %. З рис. 5 видно, що надмірне легування погіршує якість матеріалу до такої міри, що носії рекомбінуються ще до досягнення гетеропереходу. Тобто вищі концентрації легування призводять до збільшення рекомбінації носіїв або скорочення терміну життя носіїв меншості [10].

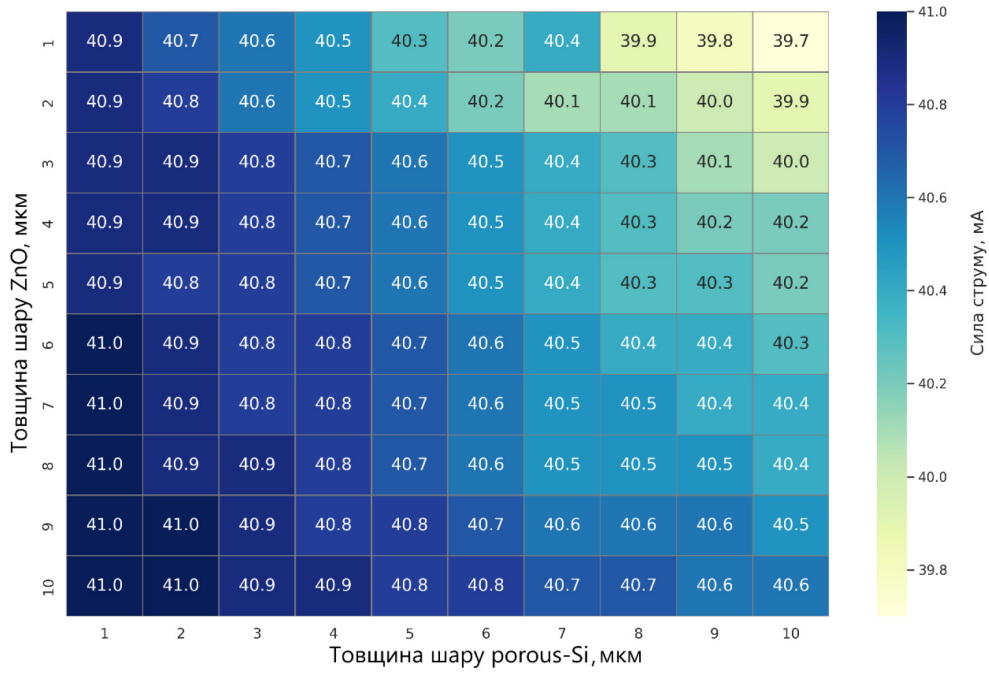


Рис. 2. Залежність сили струму від товщини шарів ZnO та porous-Si

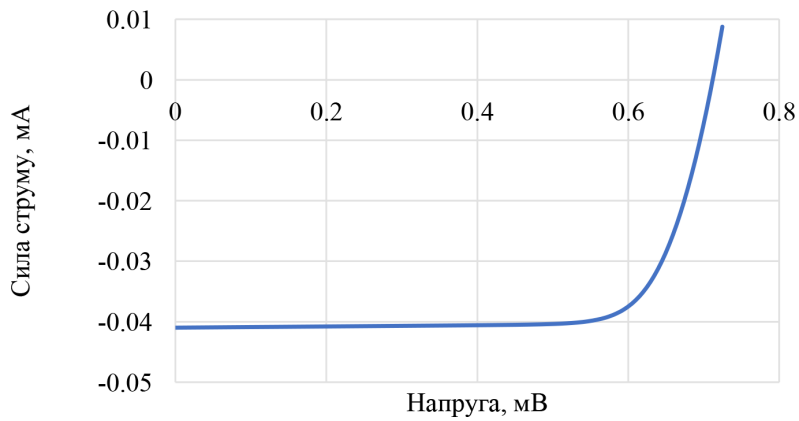


Рис. 3. ВАХ фотоперетворювача ZnO/porous-Si/Si

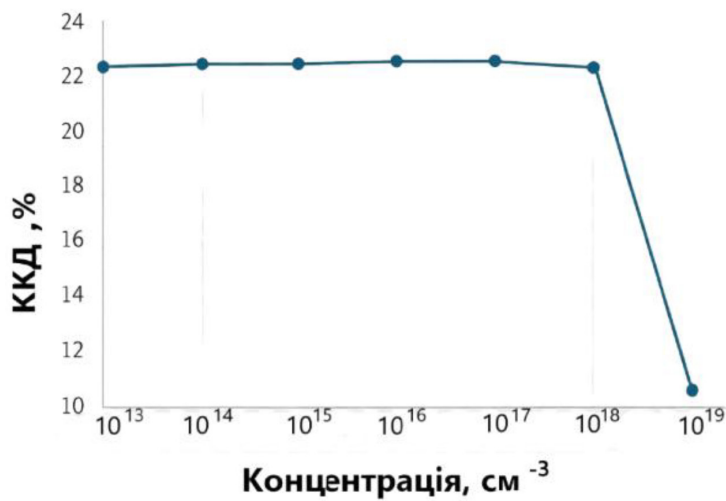


Рис. 4. Залежність ефективності фотоперетворювача ZnO/porous-Si/Si від рівня легування шару ZnO



**Висновки.** Дослідження впливу товщини шару та концентрації легування на ефективність сонячних елементів на основі гетеропереходу ZnO/porous-Si/Si показало, що оптимізація цих параметрів дає змогу досягти високої ефективності. Максимальна ефективність становила 22,6 % при оптимальних значеннях товщини та легування. Однак варто розуміти, що надмірне легування може негативно вплинути на якість матеріалу, підкреслюючи важливість вибору правильних параметрів для досягнення максимальної продуктивності. Отримані результати можна використати для розробки більш ефективних сонячних елементів у майбутньому.

#### Список використаних джерел

1. Ranabhat K., Patrikeev L., Revina A.A.E., Andrianov K., Lapshinsky V., Sofronova E. An introduction to solar cell technology. *Journal of Applied Engineering Science*. 2016. Vol. 14, № 4. P. 481–491.
2. Asim N., Sopian K., Ahmadi S., Saeedfar K., Alghoul M.A., Saadatian O., Zaidi S.H. A Review on the Role of Materials Science in Solar Cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. Vol. 16, № 8. P. 5834–5847.
3. Thirunavukkarasu G. S., Seyedmahmoudian M., Chandran J., Stojcevski A., Subramanian M., Marnadu R. et al. Optimization of Mono-Crystalline Silicon Solar Cell Devices Using PC1D Simulation. *Energies*. 2021. Vol. 14, № 16. Art. 4986.
4. Belarbi M., Benyoucef A., Benyoucef B. Study Of The Equivalent Circuit Of A Dye-Sensitized Solar Cells. *Advances in Energy International Journal (AEIJ)*. 2014. Vol. 1, № 2.
5. Premkumar M., Chandrasekaran K., Sowmya R. Mathematical modelling of solar photovoltaic cell/panel/array based on the physical parameters from the manufacturer's datasheet. *International Journal of Renewable energy development*. 2020. Vol. 9(1). P. 7.
6. Kowsar A., Debnath S. C., Shafayet-Ul-Islam M., Hossain M. J., Hossain M., Chowdhury A. K.,... Farhad S. F. U. An overview of solar cell simulation tools. *Solar Energy Advances*. 2025. Vol. 5. P. 100077.
7. Dyadenchuk A. F., Oleksenko R. I. Modeling of photoconverter parameters based on CdS/porous-CdTe/CdTe heterostructure. *Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. 2025. Vol. 15(2). P. 65–69.
8. Bag A., Radhakrishnan R., Nekovei R., & Jeyakumar R. Effect of absorber layer, hole transport layer thicknesses, and its doping density on the performance of perovskite solar cells by device simulation. *Solar Energy*. 2020. Vol. 196. P. 177–182.
9. Jan S. T., Noman M. Influence of layer thickness, defect density, doping concentration, interface defects, work function, working temperature and reflecting coating on lead-free perovskite solar cell. *Solar Energy*. 2022. Vol. 237. P. 29–43.
10. Hashmi G., Akand A.R., Hoq M., & Rahman H. Study of the enhancement of the efficiency of the monocrystalline silicon solar cell by optimizing effective parameters using PC1D simulation. *Silicon*. 2018. Vol. 10(4). P. 1653–1660.
11. Richter A., Hermle M., & Glunz S. W. Reassessment of the limiting efficiency for crystalline silicon solar cells. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2013. Vol. 3(4). P. 1184–1191.
12. Branz H. M., Yost V. E., Ward S., Jones K. M., To B., Stradins P. Nanostructured black silicon and the optical absorption enhancement in thin-film solar cells. *Applied Physics Letters*. 2009. Vol. 94(23). P. 231121.
13. Holman Z. C., Descoeurdes A., Barraud L., Fernandez F. Z., Seif J. P., De Wolf S., Ballif C. Current losses at the front of silicon heterojunction solar cells. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2012. Vol. 2(1). P. 7–15.
14. Dyadenchuk A. Modeling of photovoltaic characteristics of a TiO<sub>2</sub>/porous-Si/Si-based heterojunction solar cell. *Nano Hybrids and Composites*. 2024. Vol. 43. P. 13–22.
15. Dyadenchuk A., Domina N., Oleksenko R. Simulation of solar element characteristics based on porous silicon. *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. IEEE, October 2022. P. 1–4.
16. Kidalov V. V., Dyadenchuk A. F., Bacherikov Yu. Yu., Rogozin I. V., Kidalov V. V. ZnO growth on macroporous Si substrates by HF magnetron sputtering. *J. Nano-Electron. Phys.* 2020. Vol. 12, № 3. P. 03016.
17. Chala S., Sengouga N., Yakuphanoglu F., Rahmane S., Bdirina M., Karteri I. Extraction of ZnO thin film parameters for modeling a ZnO/Si solar cell. *Energy*. 2018. Vol. 164. P. 871–880.
18. Kidalov V., Dyadenchuk A., Bacherikov Y., Zhuk A., Gorbaniuk T., Rogozin I., Kidalov V. Structural and optical properties of ZnO films obtained on mesoporous Si substrates by the method of HF magnetron sputtering. *Turkish Journal of Physics*. 2020. Vol. 44(1). P. 57–66.



19. Hussain B., Ebong A., Ferguson I. Zinc oxide as an active n-layer and antireflection coating for silicon based heterojunction solar cell. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2015. Vol. 139. P. 95–100.
20. Morales-Morales F., Benítez-Lara A., Hernández-Sebastián N., Ambriz-Vargas F., Jiménez-Vivanco M. R., López R., Morales-Sánchez A. Study of zinc oxide/porous silicon interface for optoelectronic devices. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2022. Vol. 148. P. 106810.
21. Sundarapura P., Zhang X.-M., Yogai R., Murakami K., Fave A., Ihara M. Nanostructure of Porous Si and Anodic SiO<sub>2</sub> Surface Passivation for Improved Efficiency Porous Si Solar Cells. *Nanomaterials*, 2021. Vol. 11(2). P. 459.
22. Dyadenchuk A. F., Oleksenko R. I. Simulation photoconverters of porous-Si/Si with different anti-reflective coatings. *International Journal of Mathematics and Physics*. 2023. Vol. 14(2). P. 89–94.

*Дата першого надходження статті до видання: 03.02.2026*

*Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.02.2026*

*Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026*

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



**S. Nosan, A. Dyadenchuk**

*Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University*

## **INFLUENCE OF DOPING ENGINEERING AND SPATIAL STRUCTURE CONFIGURATION ON THE ENERGY EFFICIENCY OF ZnO/POROUS-Si/Si PHOTOCONVERTERS**

### *Summary*

This paper presents a comprehensive study of the influence of doping engineering and layer-thickness optimization on the energy conversion efficiency of ZnO/porous-Si/Si heterostructure-based photovoltaic devices. Using the PC1D simulation environment, the research examines how variations in the thickness of ZnO and porous silicon layers, as well as changes in the doping concentration of the ZnO film, affect photogeneration, recombination dynamics, and the resulting current–voltage characteristics. The modeling results demonstrate that the interplay between optical absorption, carrier transport, and recombination processes is highly sensitive to both geometric and doping parameters of the structure.

It was established that the optimal configuration – ZnO thickness of 10 μm, porous-Si thickness of 1 μm, and ZnO doping concentration of 10<sup>19</sup> cm<sup>-3</sup> – provides the highest simulated conversion efficiency of 22.6 %. Increasing the ZnO thickness beyond this range leads to reduced performance due to enhanced bulk recombination, while excessive doping results in a significant decrease in minority-carrier lifetime and overall device efficiency. The study highlights the importance of balancing optical and electrical properties when designing heterostructure-based solar cells, particularly those incorporating porous silicon as a functional buffer layer.

The obtained results contribute to a deeper understanding of the mechanisms governing the operation of ZnO/porous-Si/Si photoconverters and demonstrate the potential of structural and doping optimization for improving the performance of silicon-based photovoltaic technologies.

**Keywords:** heterostructure, doping, layer thickness, PC1D, photoconverter.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-2>

УДК 621.039.58

В. Р. Румянцев, канд. техн. наук

Т. А. Шарапова, канд. фарм. наук

Г. В. Карпенко, канд. техн. наук

*Запорізький національний університет*

e-mail: abkarpenko2017@gmail.com

ORCID: 0000-0002-4404-3454

ORCID: 0000-0002-9868-5428

ORCID: 0000-0003-3504-0283

## ОСОБЛИВОСТІ ПЛАНУВАННЯ ЗАХОДІВ ЛІКВІДАЦІЇ НАСЛІДКІВ НА АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯХ

*Анотація.* У статті розглядаються специфікації стратегічного планування операцій з подолання наслідків інцидентів на ядерних об'єктах. Наявність численних джерел іонізуючого випромінювання на території держави створює суттєві ризики під час кризових подій, таких як промислові катастрофи, акти ядерного чи радіологічного тероризму, що потенційно призводять до поширення радіоактивних речовин і масового ураження людей. Такі обставини зобов'язують до превентивних дій, зокрема до підготовки до можливих викидів ізотопів йоду ( $^{131}\text{I}$ ,  $^{125}\text{I}$ ,  $^{123}\text{I}$ ) з формуванням резервів захисних препаратів. Аналіз практики реагування на медичні та гігієнічні наслідки катастроф на атомних електростанціях демонструє, що під час масштабної події на одному ядерному комплексі в зоні ризику може виявитися 100–3000 працівників об'єкта, 1000–1 000 000 цивільних осіб та 1000–50 000 осіб із загонів реагування. Згідно з висновками національних і міжнародних фахівців, поза 30-кілометровою буферною зоною не прогноуються детерміновані радіаційні впливи, тому там не вимагається детальне планування медичної евакуації. Водночас зберігається загроза хронічного опромінення, яке провокує стохастичні радіобіологічні наслідки в довгостроковій перспективі. Дослідження акцентує увагу на пріоритетних захисних стратегіях для початкової стадії радіаційної аварії (РА). Ефективність укриття в закритих приміщеннях підвищується за рахунок герметизації стиків вікон і дверей доступними матеріалами. Сукупність профілактичних дій здатна знизити рівень внутрішнього забруднення від вдихання радіоактивних аерозолів у 3–10 разів. По завершенні проходження забрудненої хмари слід активізувати вентиляцію, аби запобігти концентрації аерозолів усередині, що перевищує зовнішні показники.

*Ключові слова:* радіаційні ризики, епідеміологічні ефекти, захисні протоколи.

*Постановка проблеми.* У сучасних умовах в Україні функціонують чотири атомні електростанції поряд з чималою кількістю промислових і наукових установ, які задіяні в роботі з джерелами іонізуючого випромінювання. Ці елементи інфраструктури становлять потенційну загрозу для забруднення прилеглих регіонів, де проживає значна частина населення. Відповідно до висновків вітчизняних і зарубіжних експертів у сфері ядерної безпеки факторами масштабних радіаційних катастроф можуть слугувати як технічні збої чи людські помилки в експлуатації реакторів, так і навмисні диверсії терористичного характеру. Глобальна спільнота не відкидає ймовірність подібних загроз на українській території. Зростання міжнародних контактів у політичній, економічній та соціокультурній сферах сприяє проникненню агентів радикальних угруповань серед мігрантів, що накопичує внутрішній потенціал для ескалації кризи до рівня нестабільності. Світовий досвід протидії таким викликам підкреслює критичну актуальність завдань з превенції та нейтралізації ядерного тероризму (ЯТ) і радіаційних аварій (РА), які потребують систематичного моніторингу з боку державних органів і недержавних інституцій. Ключовим елементом цієї політики є попереднє моделювання ризиків для широко-масштабних РА чи ЯТ з метою оперативного реагування.



*Аналіз останніх досліджень.* Отриманий національний досвід подолання [1] медично-гігієнічних наслідків катастроф на АЕС, доповнений рекомендаціями глобальних організацій та результатами симуляційних тренувань для охорони реагувальників і цивільних від інцидентів на об'єктах з підвищеною радіаційною небезпекою, свідчить про таке:

- У разі несправності реактора можлива ескалація до масштабної радіаційної катастрофи (РА).

- Радіус зони РА потенційно сягає 1000 км від епіцентру.

- Райони в межах 1000 км від АЕС у разі великої аварії класифікуються як зони підвищеного ризику, що передбачає активні заходи з мінімізації радіаційного впливу на людей.

Зону потенційної загрози в радіусі 1000 км від активної АЕС поділяють на підкатегорії:

- Зону критичної радіаційної небезпеки – безпосередньо АЕС та прилеглу 30-кілометрову спостережну зону.

- Зону помірно підвищеної радіаційної небезпеки – прилеглі території до зони критичної.

До критичної зони ризику належать шість регіонів України (Рівненська, Волинська, Хмельницька, Миколаївська, Дніпропетровська, Запорізька області). Зона помірно підвищеного ризику охоплює дванадцять областей, з деякими, що підпадають під вплив двох АЕС одночасно.

Практика подолання медично-гігієнічних наслідків аварій на АЕС ілюструє, що у разі великої катастрофи на ядерному об'єкті в зоні небезпеки опиняються 100–3000 співробітників, 1000–1 000 000 жителів та 1000–50 000 реагувальників (УЛНА).

За умов психоемоційного напруження серед населення, накопиченої втоми, хаосу та дефіциту засобів індивідуального захисту, а також через помилки в координації медичного супроводу фатальні втрати від детермінованих радіаційних ефектів (гостра променева хвороба, тяжкі травми) можуть сягнути 200 осіб, а від стохастичних наслідків (онкологія, генетичні порушення) – близько 500. Кількість осіб, які потребуватимуть тривалого медичного нагляду та терапії, може перевищити 1 млн.

У радіусі 30 км від пошкодженого реактора можливі детерміновані прояви опромінення, тому планування має включати медичну евакуацію (у співпраці з регіональними установами МОЗ України та санітарно-епідеміологічними службами), а також комплекс захисних гігієнічних протоколів (укриття, блокування йоду, обмеження вживання контамінованих ресурсів, термінова евакуація тощо) [2].

Варто зауважити, що, за оцінками національних і міжнародних досліджень, поза 30-кілометровою зоною детерміновані ефекти малоймовірні, отже, не потребують розгорнутого плану евакуаційно-лікувальних дій. Однак ризик хронічного опромінення зберігається, з потенціалом для стохастичних радіобіологічних уражень (онкологія, генетичні аномалії).

У межах 100-кілометрової зони навколо пошкодженого реактора можуть виникнути сценарії, коли відповідно до норм НРБУ-97 доведеться впроваджувати комплекс протирадіаційних дій (герметизація укриттів, блокування йодом, заборона на вживання контамінованих ресурсів харчування та води, термінова релокація тощо). Ці протоколи мають бути детально задокументовані у спеціальних розділах Плану медичного та гігієнічного супроводу населення.

Поза межами 100-кілометрової зони для жителів зберігається ризик зовнішнього та внутрішнього опромінення в обсягах, що провокують відстрочені радіобіологічні ускладнення. З метою блокування проникнення радіоізотопів йоду та інших нуклідів акцент робиться на превентивних гігієнічних процедурах, включаючи сповіщення, ізоляцію в приміщеннях, застосування стабільного йоду, моніторинг радіаційного фону, перевірку ресурсів та інші аналогічні кроки.

Стратегія медичного та гігієнічного супроводу на випадок ядерного терористичного інциденту (ЯРТ) має охоплювати повний спектр операцій для всебічного усунення наслідків такого акту [3] з чітким визначенням відповідальних сторін, послідовності, часових рамок та трива-



лості дій. Обов'язковим аспектом планування є встановлення механізмів оцінки ефективності робіт з нейтралізації наслідків ЯРТ та графіків їх реалізації. Підготовка такого плану передбачає узгодження з ключовими державними інстанціями, залученими до процесу, роблячи його базовим інструментом для координації та виконання.

У плані виділяються такі ключові сегменти організаційних дій:

- Повний набір медичної евакуації та гігієнічних протирадіаційних процедур для мешканців регіону в 30-кілометровій зоні від АЕС, де можливі детерміновані радіаційні ураження.
- Гігієнічні протирадіаційні процедури, у тому числі швидка релокація, на ділянках від 30 до 100 км від АЕС.
- Гігієнічні протирадіаційні процедури для запобігання інкорпорації радіоізотопів йоду ( $^{131}\text{I}$ ,  $^{125}\text{I}$ ,  $^{123}\text{I}$ ) та інших нуклідів для всіх жителів регіону за межами 100-кілометрової зони (ізоляція, блокування йодом, радіаційний сканінг та контроль, заборона на контаміновані продукти та воду тощо).

Протирадіаційні, медично-евакуаційні та гігієнічні дії для охорони населення оптимально інтегрувати в єдиний консолідований план, адаптований до специфіки та розмаху ЯРТ, з урахуванням етапів розвитку інциденту, оскільки вони взаємозалежні.

Серед усього арсеналу дій за пріоритетом для надійного захисту населення виділяються: ізоляція в закритих приміщеннях, превентивне введення радіозахисних засобів, респіраторний бар'єр, покриття тіла, релокація, гігієнічна дезінфекція, тимчасове переселення, обмеження доступу до зони, перевірка харчових запасів, очищення поверхонь, екіпірування, засобів індивідуального захисту (ЗІЗ), обладнання та об'єктів, а також загальна деконтамінація території тощо [4].

Залежно від етапів інциденту, шляхів забруднення та типів радіаційного навантаження застосовуються адаптовані протирадіаційні дії:

- На початковому етапі – ізоляція з базовим респіраторним захистом, введення стабільного йоду (КІ), релокація, обмеження входу до зони, гігієнічна обробка осіб, деконтамінація поверхонь, одягу, ЗІЗ тощо, а також первинна медична підтримка.
- На проміжному етапі – введення стабільного йоду (КІ), релокація, обмеження входу до зони, тимчасове переселення, гігієнічна обробка осіб, деконтамінація поверхонь, одягу, ЗІЗ тощо, моніторинг харчових ресурсів та води, медична підтримка.
- На фінальному етапі – обмеження входу до зони, моніторинг харчових ресурсів та води, деконтамінація території.

У цьому аналізі фокус на оптимальних протидіях для початкового етапу РА. Рівень захисту приміщень підвищується шляхом заповнення щілин вікон і дверей імпровізованими матеріалами. Інтегрований підхід дозволяє зменшити внутрішнє опромінення від аерозольного вдихання в 3–10 разів. Після розсіювання радіоактивної хмари слід забезпечити провітрювання для запобігання надмірній концентрації аерозолів усередині порівняно із зовнішнім середовищем.

Під час ЯРТ у викидах радіоактивних матеріалів можуть фігурувати ізотопи йоду, зокрема  $^{131}\text{I}$ ,  $^{125}\text{I}$ ,  $^{123}\text{I}$ . Ці елементи також входять до продуктів розпаду, які можуть слугувати основою для захисних стратегій. Слід підкреслити мінімальну кількість побічних реакцій від КІ [5].

Для блокування акумуляції радіоактивного йоду ( $^{131}\text{I}$ ) у щитоподібній залозі рекомендується використовувати стабільні йодні препарати, особливо у разі інгаляційного чи перорального надходження. Досвід підтверджує максимальну ефективність такої профілактики у разі аерозольного забруднення  $^{131}\text{I}$ . Параметри для активації цього заходу визначені в НРБУ-97.

Оптимальним інструментом для раннього збереження щитоподібної залози є КІ, який мінімізує детерміновані та стохастичні наслідки для будь-яких вікових груп. Важливо наголосити, що КІ не є універсальним радіозахистом, а діє виключно проти інкорпорації  $^{131}\text{I}$  [6]. У сцена-



ріях радіологічного нападу чи ЯРТ КІ ефективний лише за наявності  $^{131}\text{I}$  у викиді; за значних обсягів такого ізотопу від диверсії на ядерному об'єкті його застосування обґрунтоване.

У рекомендованих дозах стабільний йод перешкоджає фіксації радіоактивного аналога в щитоподібній залозі, забезпечуючи бар'єр від надмірного опромінення. Після разового надходження радіоїоду пік акумуляції досягається за 1–2 доби, з половиною максимуму за приблизно 6 годин. Абсорбція залежить від віку: у немовлят і дітей до року доза на залозу в 8 разів вища, у 10-річних – у 3 рази, у 15-річних – у 1,5 раза порівняно з дорослими.

Протоколи йодної профілактики інтегруються в планування заздалегідь, з аналізом ресурсів для виробництва та дистрибуції. Загалом, така міра виправдана у разі середньої еквівалентної дози на щитоподібну залозу близько 500 мЗв [7]. Залежно від контексту поріг може знижуватися, але не нижче 50 мЗв.

За висновками національних спеціалістів та рекомендаціями МКРЗ ідеальним порогом для йодної профілактики є 100 мЗв еквівалентної дози на щитоподібну залозу. Такий критерій забезпечує основу для швидкого рішення та впровадження в умовах ЯРТ.

Медичні установи, розташовані в районах потенційного впливу АЕС [8], зобов'язані реалізувати організаційні та підготовчі процедури в період до виникнення інциденту. Слід виконати оцінку загального обсягу стабільних йодних препаратів на базі формування реєстрів осіб, які підпадають під програму блокування, а також створити систему сповіщення спеціалістів для здійснення профілактики йодом та координації їхніх зусиль. Інструктивний матеріал щодо раціональності застосування стабільних йодних засобів та потенційних небажаних реакцій має бути підготовлений наперед і поширюватися серед населення разом із препаратами.

Експерти медичних центрів (стаціонарів, поліклінік, амбулаторій тощо) забезпечують йодну профілактику для співробітників, пацієнтів та сприяють її впровадженню в громаді. Попередньо необхідно ідентифікувати індивідів з обмеженнями до йодних засобів (псоріаз, гіпертиреоз, вузловий зоб, шкірні запалення тощо). Високопріоритетними групами для захисних інтервенцій є малюки віком до трьох років, жінки в періоді вагітності та годуючі матері, оскільки вони належать до категорії з підвищеною вразливістю до радіаційного навантаження на щитоподібну залозу від радіоїоду.

Під час надзвичайних подій з радіаційною контамінацією територій попит на радіозахисні агенти з'являється вже в початкові години нейтралізації наслідків. Отже, у стратегії реагування на ядерний тероризм чи радіаційні інциденти необхідно інтегрувати прогнози щодо радіопротекторів для учасників усунення кризи [10].

На підставі викладеного можна сформулювати такі ключові висновки:

1. Аспекти превенції радіаційного ураження для реагувальників і цивільних є невід'ємними елементами плану відповіді на ядерний тероризм, з детальним опрацюванням у сегменті гігієнічних протирадіаційних дій для блокування інкорпорації радіоізоотопів йоду ( $^{131}\text{I}$ ,  $^{125}\text{I}$ ,  $^{123}\text{I}$ ) та інших нуклідів для всіх жителів регіону поза 100-кілометровою зоною від АЕС.

2. З огляду на стислий час напіврозпаду йодних радіонуклідів ( $^{131}\text{I}$ ,  $^{125}\text{I}$ ,  $^{123}\text{I}$ ) для оперативної реакції на загрози ядерного тероризму чи радіаційних подій потрібні попередні калькуляції вимог до превентивних ресурсів.

3. Для забезпечення передумов до всебічної організації превентивних інтервенцій проти проникнення радіоізоотопів йоду ( $^{131}\text{I}$ ,  $^{125}\text{I}$ ,  $^{123}\text{I}$ ) виникає необхідність у формуванні адекватних резервів КІ, розрахованих на чисельність реагувальників і населення з урахуванням географічного розподілу.

4. У стратегії відповіді на ядерний тероризм чи радіаційні інциденти слід передбачити прогнози щодо радіопротекторів проти інших нуклідів для учасників нейтралізації надзвичайних ситуацій.

**Список використаних джерел**

1. Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 09.03.2021 № 408 «Про затвердження Регламенту щодо проведення йодної профілактики у разі виникнення радіаційної аварії». *Офіційний вісник України*. 2021. № 25.
2. План реагування на надзвичайні ситуації державного рівня : Постанова Кабінету Міністрів України від 14.03.2018 № 223. *Урядовий кур'єр*, 2018. № 55.
3. Довідник рятувальника при радіаційних аваріях. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. Київ, 2021.
4. Bazyka D. A., Sushko V. O., Chumak A. A., Fedirko P. A., Talko V. V., Yanovych L. A. State Institution "National Research Center for Radiation Medicine of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine" – research activities and scientific advance in 2020. *Problems of Radiation Medicine and Radiobiology*, 2021. Vol. 26. P. 10–17.
5. Наказ Державного комітету ядерного регулювання України від 16.02.2017 № 51/151 «Про затвердження Загальних правил радіаційної безпеки використання джерел іонізуючого випромінювання в медицині». *Офіційний вісник України*, 2017. № 20.
6. *Проблеми радіаційної медицини та радіобіології* : науковий журнал. ДУ «Національний науковий центр радіаційної медицини НАМН України». Київ, 2021.
7. Звіт про діяльність Державного агентства України з управління зоною відчуження за 2022 рік. Київ : ДАЗВ, 2023.
8. Стратегія розвитку територій зони відчуження і зони безумовного (обов'язкового) відселення, що зазнали радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи на 2021–2030 роки. Державне агентство України з управління зоною відчуження. Київ, 2020.
9. План реагування на радіаційні аварії, затверджений наказом Держатомрегулювання України та МНС України від 17.05.2004 № 87/211. *Офіційний вісник України*, 2004. № 24.

*Дата першого надходження статті до видання: 16.01.2026*

*Дата прийняття статті до друку після рецензування: 10.02.2026*

*Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026*

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



**V. Rumyantsev, T. Sharapova, G. Karpenko**

*Zaporizhzhia National University*

**FEATURES OF PLANNING MEASURES FOR THE ELIMINATION OF CONSEQUENCES AT NUCLEAR POWER PLANTS****Summary**

This paper presents an analysis of the specific aspects of planning response measures for the elimination of consequences at nuclear power plants. The presence of a large number of sources of radioactive emissions in the country poses a significant risk in the event of emergencies – technogenic accidents, nuclear or radiological terrorism – which may lead to radionuclide contamination and exposure of large populations. This necessitates proactive preparedness for potential releases of iodine radionuclides  $^{131}\text{I}$ ,  $^{123}\text{I}$ , and  $^{125}\text{I}$  and the establishment of reserves of prophylactic agents. Experience from the mitigation of medical and sanitary consequences of nuclear power plant accidents has shown that, in the case of a large-scale incident at a single nuclear facility, the affected zone may include between 100 and 3.000 personnel, 1.000 to 1 million residents, and 1.000 to 50.000 emergency response participants. According to domestic and international expert studies, deterministic effects are not expected beyond the 30-kilometer zone, which in turn does not require planning for medical evacuation measures. However, there remains a risk of population exposure to doses that may lead to adverse long-term radiobiological effects. The study examines the most effective countermeasures applicable during the early phase of a radiation accident. The protective capacity of indoor spaces can be increased by sealing window and door gaps with available materials. A comprehensive set of measures can reduce internal exposure from inhalation of radioactive aerosol particles by a factor of 3 to 10. After the passage of the radioactive cloud, it is necessary to ventilate indoor spaces to prevent the accumulation of aerosols at concentrations exceeding those in the ambient air.

**Keywords:** medical consequences, morbidity, prophylaxis.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-3>

УДК 657.6:657.44

В. П. Савінов<sup>1</sup>, аспірант

ORCID: 0009-0007-3582-7306

С. В. Галько<sup>2</sup>, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-7991-0311

<sup>1</sup> Запорізький національний університет<sup>2</sup> Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: galkosv@gmail.com

## ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОМОБІЛЬНОГО ПАЛИВА ШЛЯХОМ ОБРОБКИ МАГНІТНИМИ ПОЛЯМИ

*Анотація.* У роботі наведені результати досліджень впливу електричного і магнітного полів та молекулярних струмів на зміну енергетичних і фізико-хімічних властивостей автомобільного палива. Джерелом магнітного поля є електричні заряди, що рухаються, які виникають у просторі, що оточує паливо. Магнітне поле постійних магнітів, які використовуються у розробленому пристрої, також створюється електричними мікрострумами, що циркулюють у середині молекул палива.

Результати експериментальних досліджень показали, що використання цих методів у сполученні з магнітно-динамічними процесами сприяє значному покращенню характеристик палива, а саме зниження витрат на 20–40 % і навантаження на мотор на 10–15 %, збільшення потужності мотора на 15–20 %, зменшення часу упорскування палива в камеру згорання і зменшення зольного залишку на 45 %.

Впровадження цих технологій дозволить підвищити економічність обслуговування автомобілів і екологічність двигунів внутрішнього згорання.

*Ключові слова:* електричне поле, молекулярні струми, магнітне поле, енергетична ефективність, якість палива, витрати палива.

*Постановка проблеми.* Основною характеристикою двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ) автомобіля зазвичай вважають його потужність. Найбільшу потужність можна реалізувати тільки при оборотах, що встановилися, близьких до максимальних, а в такому режимі автомобіль майже не їздить. Насправді основний вплив на характер автомобіля робить крутний момент. Якщо крутний момент досить великий і відносно стабільний на низьких та середніх обертах, він забезпечує надійну роботу автомобіля під час рушання з місця та прискорення [1; 2]. Як відомо, потужність ДВЗ значною мірою залежить від якості пального. Останніми роками увага дослідників зосереджена на використанні магнітних і електричних полів для покращення фізико-хімічних і енергетичних характеристик палива.

*Аналіз останніх досліджень.* Загальним недоліком проведених досліджень у світовій практиці є глибока відсутність спрямованості на вивчення механізму процесів, що відбуваються в рідині під час впливу електромагнітними полями. За досить великої кількості досліджень впливу магнітної обробки на рідину відсутня повною мірою розроблена теорія, що дозволяє на основі даних про рідину проектувати промислові апарати та технології. Молекулярні струми, що виникають під впливом зовнішніх електричних і магнітних полів, здатні змінювати молекулярну структуру вуглеводнів, що може вплинути на їх процес горіння. Є безліч різноманітних електроімпульсних пристроїв електричного типу із застосуванням накладного способу кріплення на паливну магістраль або спосіб врізання конструкцій у магістраль з використанням електромагнітного поля на рідкі вуглеводні. Більшість технічних рішень мають зовнішню циліндричну форму, вони складні за своїм внутрішнім складом. Були проведені численні дослідження з пошуку оптимальних режимів, конструкцій, комбінацій впливу електро-



магнітним та постійним магнітним полем на палива, що використовуються на транспорті. Так, вплив постійним магнітним полем на дизельне паливо призвело до зменшення його витрат на 10...12,5 % [3] за великої щільності магнітного потоку від 1000 до 4000 Гаус. Автори роботи відзначають, що ефект від магнітної обробки збільшується зі зростанням магнітної індукції від 0,8 до 1,5 Тл, причому найбільший ефект досягається у разі невисоких навантажень ДВЗ. Щільність газів, що відпрацювали, зменшується на 15 %. У джерелах зазначається, що у складі відпрацьованих газів вміст монооксиду вуглецю зменшується від 4 до 30 %, вуглеводнів, що не згоріли, на 27–30 % [3–5].

Але поряд з проведеними великою кількістю експериментів, основним недоліком більшості досліджень є те, що вони звертають свою увагу на структурування доменної групи молекул, на це йде дуже невелика кількість часу і велика кількість енергії, це перше. Друге, не враховується закон Кулона, який свідчить, що сила взаємодії зменшується обернено пропорційно квадрату відстані між зарядами. Третє, всі дослідники прагнуть молекулярні кластери привести до дрібніших станів без урахування того, що паливо є по суті багатокомпонентною складною рідкою сумішшю, в якій знаходяться як дрібні молекули за масою та обсягом, так і великі сполуки. Отримані дрібніші форми молекул після сильного електромагнітного впливу не дають повного горіння палива та значного збільшення енергії горіння. Оскільки потік палива йде безперервно і має різну швидкість руху у паливній магістралі залежно від потреби автомобіля під час руху, часу впливу магнітними полями не вистачає для структурування палива і насичення його в потрібній мірі додатковою енергією. Використання в конструкціях наявного потоку руху рідини – ламінарного, а також без використання законів молекулярної фізики неможливо змінювати молекулярну структуру палива за енергетичним зарядом. У разі застосування магнітно-імпульсної та електричної активації палива не враховується співвідношення часу знаходження палива під впливом електромагнітних полів, не враховується вплив міжмолекулярних сил Ван-дер-Ваальса, немає виробленого загального алгоритму дій у роботі конструкцій та зміни структури палива залежно від часу знаходження палива під впливом магнітних полів [6; 7].

Застосування розробленого нами методу зміни енергетичного стану молекул та атомів допоможе вирішити основне завдання під час експлуатації транспорту – безпеку експлуатації, комфортність експлуатації, зниження витрат палива та покращення екологічних норм у разі зменшення викидів продуктів згорання під час експлуатації.

*Формулювання цілей статті.* Метою статті є розробка методу зміни енергетичного стану молекул і атомів в автомобільному паливі шляхом обробки магнітними полями.

*Основна частина.* Електрорушійна сила (ЕРС) у будь-якому ланцюзі виникає у тому разі, якщо у ній на заряди діють будь-які сторонні сили – сили вихрового електричного поля. Електричне поле, що виникає під час електромагнітної індукції, має безперервні силові лінії, тобто являє собою вихрове поле. Таке поле викликає рух електронів замкнутими траєкторіями і призводить до виникнення ЕРС. Будь-яка зміна магнітного поля викликає появу вихрового електричного поля. Взаємодія вихрових струмів із магнітним полем підпорядковується третьому закону Ньютона. Поєднання електричних сил та квантовомеханічних ефектів визначає структуру великих кількостей речовин і, отже, їхні властивості. Якщо розглянути досить малу кількість речовини так, щоб у ній налічувалося лише трохи атомів, то там необов'язково буде рівна кількість позитивних та негативних зарядів, і можуть виявитися великі залишкові електричні сили. Навіть якщо число тих та інших зарядів однакове, все одно між сусідніми областями може діяти значна електрична сила, тому що сили, що діють між окремими зарядами, змінюються обернено пропорційно квадрату відстаней між ними і може виявитися, що негативні заряди однієї частини речовини ближче до позитивних зарядів іншої частини, ніж негативних. Сили тяжіння тоді перевершать сили відштовхування і в результаті виникає тяжіння між двома



частинами речовини, у яких немає надлишкового заряду. Сила, що утримує атоми, і хімічні сили, що скріплюють між собою молекули, – все це електричні сили, що діють там, де число зарядів неоднаково або де проміжки між ними малі.

Відомо, що електричні сили, як і сили тяжіння, зменшуються обернено пропорційно квадрату відстані між зарядами. Це співвідношення перестав виконуватися точно, якщо рухаються заряди. Електричні сили також залежать складним чином і від руху зарядів. Одну з частин сили, що діє між зарядами, що рухаються, називають магнітною силою. Насправді це лише один із проявів електричної дії. Ми виявляємо експериментально, що сила діє на окремий заряд (незалежно від того, скільки там ще є зарядів або як вони рухаються) залежить тільки від положення цього окремого заряду, від його швидкості та величини.

Сила Лоренца  $\dot{F}$ , з якою електромагнітне поле діє на заряджену частинку, визначається виразом [10]

$$\dot{F} = q(\dot{E} + \dot{v} \times \dot{B}), \quad (1)$$

де  $\dot{F}$  – сила, що діє на частку;  
 $q$  – електричний заряд частки;  
 $\dot{E}$  – напруженість електричного поля;  
 $\dot{v}$  – швидкість руху частки;  
 $\dot{B}$  – магнітна індукція;  
 $\dot{v} \times \dot{B}$  – векторний твір.

Істотно, що електричні сили, що діють з боку всіх інших зарядів, складаються і дають саме ці два вектори. Значення їх залежить від того, де знаходиться заряд, і можуть змінюватися з часом. Якщо ми замінимо цей заряд іншим, то сила, що діє на новий заряд, зміниться прямо пропорційно величині заряду, якщо всі інші заряди не змінюють свого руху або положення. У реальних умовах, звичайно, кожен заряд діє на інші розташовані по сусідству заряди і може змусити їх рухатися, отже, іноді у разі заміни одного даного заряду іншим поля можуть змінюватися. Відомо, що електромагнітне поле змінює релятивістський імпульс частки, електричне поле може змінювати її енергію та швидкість, а магнітне поле змінює її напрямок руху, але не енергію [8; 9]. Для визначення руху зарядженої частинки в електромагнітному полі наведемо рівняння релятивістського руху зарядженої частинки в електромагнітному полі:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{mv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right) = q(E + v \times B). \quad (2)$$

Ліва частина рівняння (2) – це похідна за часом релятивістського імпульсу:

$$p = \gamma mv, \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (3)$$

де  $m$  – маса спокою частки;  
 $c$  – швидкість світла;  
 $\gamma$  – релятивістський фактор Лоренца.

Якщо відомі  $\dot{E}$  і  $\dot{B}$ , можна визначити рух зарядів. Якщо прив'язати вектори  $\dot{E}$  та  $\dot{B}$  до точки  $(x, y, z, t)$ , то вектори  $\dot{E}(x, y, z, t)$  і  $\dot{B}(x, y, z, t)$  створюють сили, дію яких відчує в момент  $t$  заряд, розташований у  $(x, y, z)$ , за умови, що переміщення заряду в цій точці не турбує ні розташування, ні рухи всіх інших зарядів, відповідальних за поля. Поля в такому випадку розглядатимемо як математичні функції координат і часу [10].



Зміна кінетичної енергії у часі є робота, зроблена полем над часткою в одиницю часу. Рівняння механіки інваріантні стосовно зміни знаку в часі, тобто стосовно заміни майбутнього минулим обидва напрями часу еквівалентні. Це означає, що якщо відповідно до рівнянь механіки можливий якийсь рух, то можливий і зворотний рух, у разі якого система проходить ті ж стани у зворотному порядку [11].

Взаємодію полюсів довгих і тонких магнітів було досліджено Кулоном, який дійшов висновку, що магнітні заряди взаємодіють за тим самим законом, що й електричні заряди: сила взаємодії двох точкових магнітних зарядів спрямована вздовж лінії, що з'єднує заряди, і пропорційна назад квадрату відстані між зарядами:

$$\vec{F} = k \frac{q_{m1}q_{m2}}{r^3} \vec{r}, \quad (4)$$

де  $\vec{F}$  – сила, що діє на заряд  $q_{m2}$  з боку  $q_{m1}$

$\vec{r}$  – радіус-вектор від одного заряду до іншого;

$r = |\vec{r}|$  – відстань між зарядами;

$k = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0}$  – кулонівська постійна;

$\epsilon_0$  – електрична постійна (діелектрична проникність вакууму);

$\epsilon$  – електрична проникність середовища.

Намагнічування речовини пояснюється тим, що атоми і молекули за своїми магнітними властивостями подібні елементарним магнітним диполям – двом однаковим за величиною, але різним за знаком магнітним зарядам, зміщеним один щодо одного на малий відрізок  $l$ . Магнітні властивості таких диполів характеризуються їх магнітним моментом  $p_m$ , що визначається аналогічно моменту електричних диполів:

$$p_m = q_m l. \quad (5)$$

Таким чином, взаємодію намагнічених тіл можна описувати, користуючись уявленням про магнітні заряди, що підкоряються закону зворотних квадратів відстані. Однак для отримання правильних результатів множник потрібно вибрати з урахуванням того, що насправді в тілах існують не магнітні заряди, а замкнуті струми. Тому для магнітних зарядів вираз (4) потрібно записати у вигляді:

$$\vec{F} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{q_{m1}q_{m2}}{r^3} \vec{r}, \quad (6)$$

де  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Г/м – магнітна постійна (магнітна проникність вакууму);

$\mu$  – відносна магнітна проникність середовища.

Порівнюючи вирази (4) і (6) для магнітних зарядів та електричних зарядів, знаходимо між ними важливу відмінність: магнітна проникність  $\mu\mu_0$  ходить у чисельник виразу для сили взаємодії, тоді як діелектрична проникність  $\epsilon\epsilon_0$  фігурує у знаменнику. У цьому проявляється та обставина, що насправді магнітних зарядів і магнітних диполів немає. У діелектриках, де є молекули-диполі, в електричному полі виникають поляризаційні заряди, які послаблюють взаємодію між зарядами. У магнетиках у результаті орієнтації молекулярних струмів у магнітному полі сумарна щільність магнітного потоку (магнітна індукція) збільшується, і тому механічні сили, що діють на струми та еквівалентні їм диполі, теж збільшуються.

Взаємодія струмів і магнітів залежить від властивостей навколишнього середовища. Це тому, що довкілля намагнічується полем, створюваним молекулярними струмами і магнітами, і стає джерелом магнітного потоку, що викликає додаткові сили. Позаяк всякий постійний магніт є система струмів (елементарних струмів), то може здатися, що і сили, що діють між магнітами, так само про-

никливі. Однак насправді ця залежність складніша, оскільки між струмами та магнітами наявна важлива відмінність: довкілля проникає всередину контурів зі струмом, але не проникає всередину магнітів. Тому внесення будь-якого магніту всередину магнетика неминуче порушує суцільність магнетика, робить його неоднорідним. Магніт усередині магнетика – це порожнина, заповнена речовиною, що має іншу магнітну проникність  $\mu'$ , ніж у навколишнього середовища [12].

Для експериментального дослідження зміни магнітних властивостей молекул може бути розглянута взаємодія рідких вуглеводнів та магнітних полів. Під час розгляду діамagnetизму кисневих сполук слід обов'язково враховувати як специфіку електронної будови молекул, так і те, що порівняно з багатьма іншими компонентами нафти у більшості їх реалізуються міжмолекулярні водневі зв'язки. Магнітні властивості газів, парів та молекулярних рідин залежать від магнітних властивостей ізольованої частки (атома чи молекули). Користуючись теоретичними формулами та уявленнями, ми можемо судити про властивості молекул на підставі дослідних даних про магнітну сприйнятливості такого роду частинок [13].

З'єднання з полярним зв'язком у рідких станах дозволяють судити про магнітні властивості іонів, про їхній енергетичний стан. Питання про властивості іонів невіддільне від питання про їхню взаємодію один з одним.

Для підтвердження вищевикладеного попередньо авторами статті було зібрано кілька магнітних конструкцій для вивчення впливу магнітних полів під час проходження через них рідкого палива для автотранспорту з ДВЗ.

У внутрішній частині конструкції (рис. 1) встановлено кілька постійних магнітів різної геометричної форми ( $\varnothing 12 \times 10$ ;  $\varnothing 16 \times 5$ ;  $\varnothing 20 \times 5$ ;  $\varnothing 20 \times 8$ ;  $\varnothing 22 \times 8-40$ ). Вони встановлені на поперечних ребрах та у гвинтовій втулці. Внутрішній діаметр циліндра системи – 34 мм, внутрішня довжина циліндра – 70 мм, довжина дифузора – 26 мм, довжина конфузора – 27 мм. Кількість поперечних вставок – 3 шт., гвинтова втулка – 1 шт. Постійні магніти із щільністю магнітного потоку 0,31 мТл – 0,68 мТл [14].

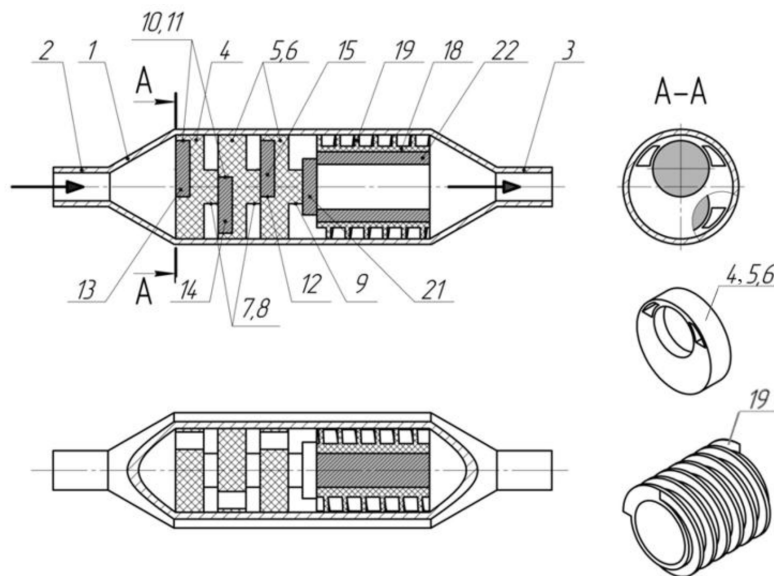


Рис. 1. Конструктивна схема пристрою для магнітної обробки палива:

1 – дифузор; 2, 3 – вхідний і вихідний штуцер; 4, 5, 6 – поперечні ребра; 7, 8, 9 – упори поперечних ребер; 10, 11, 12 – місця для встановлення постійних магнітів; 13, 14, 15 – постійні магніти; 16, 17 – прохідні отвори у поперечних ребрах; 18 – посадкові отвори для постійного циліндричного магніту; 19 – втулка гвинтова; 20 – накопичувальна камера між поперечним ребром і гвинтовою втулкою; 21 – постійний магніт ( $\varnothing 16 \times 5$ ); 22 – циліндричний постійний магніт



Принцип дії пристрою ґрунтується на збудженні вихрових енергетичних потоків. При цьому використовуючи магнітне поле як транспорт для переміщення матеріальних частинок у поєднанні з гідромеханічними властивостями рідини (палива), для отримання позитивного стану досить слабких магнітних полів 0,31 мТл – 0,68 мТл, ніж використовували попередні дослідники в цьому питанні. При цьому ми отримуємо не подрібнення молекулярних кластерів рідких вуглеводнів, а збільшення їхньої довжини.

Принцип дії запропонованої магнітної конструкції такий: рух палива в паливній магістралі – ламінарний, але надходячи у вхідний штуцер корпусу конструкції, паливо набуває вихровий рух, далі надходячи в дифузор, знижується швидкість потоку палива, при цьому тиск у дифузорі зростає (відповідно до закону Бернуллі) від номінального у паливній магістралі, пари цьому паливо підсилює вплив міжмолекулярних сил Ван-дер-Ваальса та вплив магнітними полями на власні структурні складники. Тиск впливає на кінетичну енергію частинок, посилюючи їх рух, що спричиняє вібрації та порушує впорядкованість магнітних моментів. Тиск так само впливає на щільність станів, у такому випадку щільність палива знижується за рахунок зміни спінових та орбітальних рухів електронів в атомах. У зовнішньому полі диполі магнітних моментів переорієнтуються, змінюючи загальну індукцію. Маючи поступально-обертальний рух рідких вуглеводнів виникають відцентрові сили, а також впливи, зазначені вище, в результаті отримуємо лінійне розтягування молекул і збільшення їх енергетичного стану, що призводить до більш повної реакції окислення в камері згоряння.

Нами досліджено дизельне паливо на зміну кількості іонів залежно від відношення маси до заряду. Для цього були використані два зразки одного об'єму, один із них був після електромагнітного впливу. Лабораторні випробування проведені на газовому хроматографі Agilent 7890В з мас-спектрометричним детектором 5977В. Складено таблицю сполук, у яких зазначено хімічний склад елементів. Для ідентифікації компонентів було використано бібліотеку мас-спектрів NIST14. Зразки проаналізовані методом GASOLINE.M; ін'єкційний обсяг – 0,2  $\mu\text{L}$ , тюн ATUNE.U. Протокол позначений як Qualitative Compound Report (за бібліотечною ідентифікацією) [15].

Внаслідок досліджень двох зразків на хроматограмах у зразку після проходження через магнітні поля постійних магнітів кількість іонів залежно від відношення маси до заряду збільшилася від 15 до 20 % порівняно зі стандартним зразком. Це підтверджує ідею зміни енергетичного стану молекул палива.

Найбільш діамагнітними є алкани, менш діамагнітними – ароматичні вуглеводні. Циклани займають проміжне положення. У гомологічних рядах величини магнітних сприйнятливостей змінюються так само, як і інші фізико-хімічні властивості вуглеводнів. Незважаючи на невелику кількість експериментальних даних, можна відзначити і низку закономірностей. Наприклад, для алканів з розгалуженим ланцюгом спостерігається менш виразно виражена, порівняно з *n*-алканами, систематичність у вимірі  $\Delta\chi_p$ , що впливає на зміну інших фізичних властивостей (зниження щільності палива, зниження температури спалаху, збільшення часу реакції горіння).

Паливо має діамагнітні властивості, вони спостерігається в тих випадках, коли атоми, іони або молекули не мають результуючого магнітного моменту, тобто знаходяться в  $S_0$ - або  $\Sigma_0$ -станах. Речовини, побудовані з таких частинок, переміщені у зовнішнє магнітне поле, втрачають свою магнітну нейтральність. Магнітне поле викликає індукційну дію, і електронна оболонка набуває додаткової кутової швидкості ларморівської процесії. При цьому дослід, проведений на ходових експлуатаційних випробуваннях у різних кліматичних умовах автомобілів, показує, що змінене та намагнічене паливо несе енергетичний заряд до камери згоряння та процесу горіння. ДВЗ, в який надходить енергетично і гідро-динамічно змінене паливо,

починає працювати більш м'яко, знижується навантаження на нього від 10 до 20 %, при цьому збільшується потужність його роботи, знижується зольний залишок і зменшується витрата палива від 20 до 40 %.

Для прикладу наведемо результати досліджень для автомобіля Мерседес Віто 116СДІ, 2017, обсяг мотора – 2,2 л, вид палива – дизель. Спосіб встановлення пристрою для магнітної обробки палива на автомобіль показаний на рисунку 2, а результати досліджень роботи ДВЗ у режимі холостого ходу – на рисунках 3 і 4. При оригінальному паливі витрата в теплу пору року в міському режимі становила 10,0...10,5 л/100 км, після встановлення магнітної конструкції витрата стала у теплу пору року 6,2...6,3 л/100 км. У холодну пору зі встановленою магнітною конструкцією витрата палива за грудень 2024 р., січень, лютий 2025 р. становила 6,8...7,0 л/100 км.



*Пристрій для  
магнітної  
обробки палива*

**Рис. 2.** Спосіб встановлення пристрою для магнітної обробки палива на автомобіль Мерседес Віто 116СДІ, 2017 р., об'єм мотора – 2,2 л, вид палива – дизель

У результаті установки пристрою відбулися зміни в роботі двигуна автомобіля, а саме: зниження параметра навантаження на двигун на 13,3 %, час упорскування знизився на 51,9 %, витрата на холостих оборотах знизилася на 209 %. Вимірювання було проведено автосканером Creader Professional на робочому ДВЗ у режимі холостого ходу. Результати досліджень до магнітної обробки палива та після наведені в таблицях 1, 2 та рисунках 5, 6.



**Рис. 3.** Витрата палива на автомобілі Мерседес Віто 116СДІ, осінь 2025 р., режим експлуатації – місто



**Рис. 4.** Витрата палива на автомобілі Мерседес Віто 116СДІ, грудень 2025 р. – січень 2026 р., режим експлуатації – місто

Таблиця 1

Результати дослідження витрат палива та тривалості упорскування до обробки магнітним полем

Тривалість упорскування, мсек	7,17	7,13	7,17	7,29	7,11	6,97	6,11	7,11
Витрата, л/год	1,88	1,86	1,88	1,9	1,88	1,86	1,62	2,49

Таблиця 2

Результати дослідження витрат палива та тривалості упорскування після обробки магнітним полем

Тривалість упорскування, мсек	4,71	4,71	4,72	4,79	4,73	4,79	4,81	4,81
Витрата, л/год	1,21	1,21	1,2	1,21	1,6	1,24	1,2	1,2

З отриманих результатів досліджень можна дійти висновку, що у ДВЗ без обробки палива магнітними полями більш тривалий час упорскування, коливання якого становили від 6,11 до 7,29 мсек, витрата оригінального палива – 1,62...2,49 л/год. Після обробки палива магнітними полями коливання упорскування більш рівні від 4,71 до 4,81 мсек, витрата оригінального палива знизилася до 1,2...1,6 л/год. У результаті експериментів було встановлено, що застосування магнітного поля у поєднанні з електричним значно покращує характеристики згоряння дизельного палива. Середнє зниження витрат палива на автомобілях становило 20...25 %, а максимальне – 40 %.

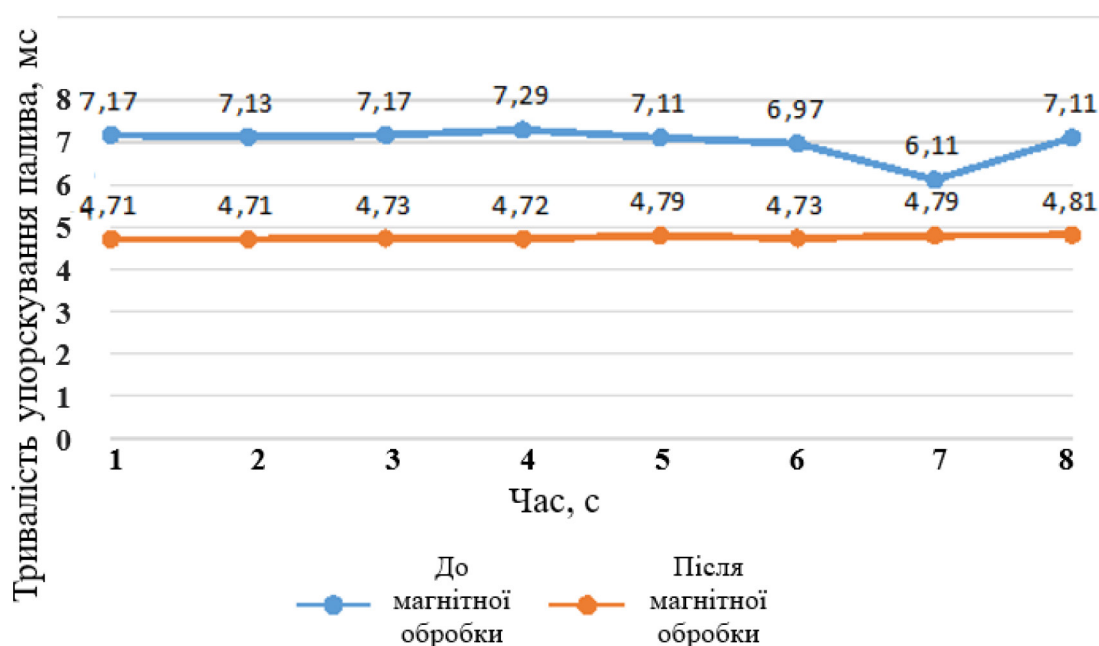


Рис. 5. Порівняльні показники тривалості упорскування палива

*Висновки.* 1. Отримані нами результати досліджень підтверджують гіпотезу, що електричне поле та молекулярні струми можуть значно покращити характеристику згоряння палива.

2. Під впливом слабких магнітних полів відбувається зміна структури молекул рідких вуглеводнів, що сприяє їх більш повному згорянню, що своєю чергою призводить до зниження витрати палива та зменшення утворення сажі та зольних залишків.

3. Молекулярні струми, що утворюються під впливом електричного поля, покращують взаємодію молекул палива з киснем у процесі горіння, що пояснює зниження зольності. Ці зміни

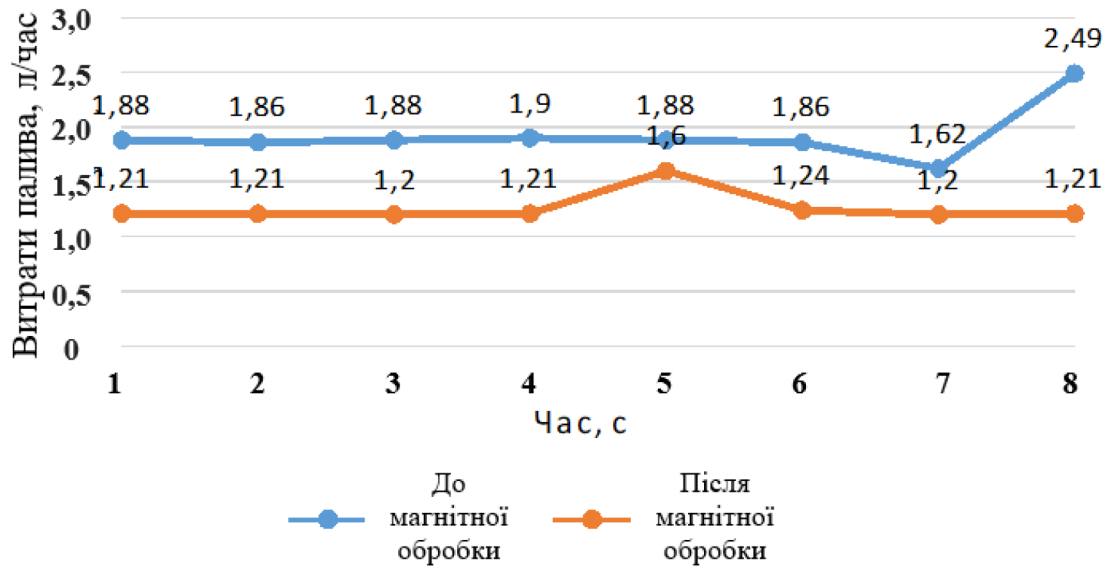


Рис. 6. Порівняльні показники витрат палива

пов'язані зі зміною фізико-хімічних властивостей вуглеводнів, таких як в'язкість, щільність, температура спалахів, які впливають на процес згоряння палива.

4. Отримані результати показують великий потенціал цієї технології для підвищення економічності та екологічності роботи ДВЗ.

Подальші дослідження будуть спрямовані на оптимізацію параметрів роботи конструкції пристрою для більш ефективного застосування його в реальних умовах експлуатації.

#### Список використаних джерел

1. Alrefo I. F., Rawashdeh M. O., Matsulevych O., Vershkov O., Halko S., Suprun O. Designing the functional surfaces of camshaft cams of internal combustion engines. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*. 2024. No. 3. P. 72–78. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-3/072>
2. Alrefo I. F., Rawashdeh M. O., Matsulevych O., Vershkov O., Halko S., Suprun O. Designing passenger vehicle diesel engine cams with enhanced dynamic characteristics. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*. 2025. No. 6. P. 61–68. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-6/061>
3. Bhurat, Swapnil Sureshchandra, Himanshu Sharma, Amrit Kumar Jha, Krishna Kant Dixit, Prashant Shukla, Ram Kunwer. Magnetization of Diesel fuel for Compression Ignition Engine to Enhance Efficiency and Emissions. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2018. Vol. 13, No. 6. P. 341–347. URL: [https://www.academia.edu/20102923/Effect\\_of\\_Fuel\\_Magnetism\\_by\\_Varying\\_Intensity\\_on\\_Performance\\_of\\_Single\\_Cylinder\\_Four\\_Stroke\\_Diesel\\_Engine](https://www.academia.edu/20102923/Effect_of_Fuel_Magnetism_by_Varying_Intensity_on_Performance_of_Single_Cylinder_Four_Stroke_Diesel_Engine)
4. Kurji, Hayder J., Murtdha S. Imran. Magnetic eld effect on compression ignition engine performance. *ARPJN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. Vol. 13. No. 12. P. 3943–3949.
5. Gad M.S. Influence of magnetized waste cooking oil biodiesel on performance and exhaust emissions of a diesel engine. *International Journal of ChemTech Research*. 2018. Vol. 11. No. 11. P. 255–267.
6. Морозова І. В. Поліпшення експлуатаційних показників теплових двигунів за допомогою електрофізичного впливу на паливо. *Наукоємні технології*. 2016. № 1. С. 102–106. URL: [https://scholar.google.com/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=en&user=TIIfsFUAAA AJ&citation\\_for\\_view=TIIfsFUAAA AJ:u-x6o8ySG0sC](https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=TIIfsFUAAA AJ&citation_for_view=TIIfsFUAAA AJ:u-x6o8ySG0sC)
7. Погорлецький Д. С. Поліпшення паливної економічності та екологічних показників переобладнаних для роботи на газовому паливі транспортних засобів : дис. ... канд. техн. наук (доктора філософії) : 05.22.20. Житомир, 2021. URL: <https://eztuir.ztu.edu.ua/jspui/handle/123456789/7895>
8. Галько С. В., Галько Т. І., Зеленков Д. М. Математична обробка параметрів магнітного поля індукційних вітроелектромеханічних нагрівачів. *Праці Таврійського державного агротехнологічного уні-*



верситету. *Технічні науки*. Запоріжжя : ТДАТУ. 2025. Вип. 25. № 3. С. 10–18. DOI: <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-3-1>

9. Галько С.В., Вершков О.О., Леженкін О.М. Експериментальне дослідження магнітної системи проточного вітроелектромеханічного нагрівача. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Технічні науки*. Мелітополь : ТДАТУ. 2020. Вип. 20. № 3. С. 88–98. DOI: <https://doi.org/10.31388/2078-0877-2020-20-3-88-98>

10. Richard P. Feynman, Robert D. Leighton, Matthew Sands. The Feynman lectures on physics. 1964. No. 2. P. 9–19.

11. Landau L. D. and Lifshiz E. M. The Classical Theory of Fields. Course of Theoretical Physics, V2, Butterworth Heinemann, 1987. P. 63–74.

12. Калашников С. Г. Електрика. Загальний курс фізики, 1970. Київ. С. 227–236.

13. Irodov I. E. Basic Laws of Electromagnetism, Publisher, Repro India Limited, 2025. P. 139–141.

14. Пристрій для магнітної обробки рідкого вуглеводородного палива двигуна внутрішнього згорання: пат. 146615 Україна: МПК(2021) F02M27/04, F02B51/04U, номер заявки u202007127, заявл. 06.11.2020, опубл. 03.03.2021, бюл. №9/2021.

15. Протокол випробувань: Випробувальна лабораторія ЗДМФУ, Запоріжжя, Протокол випробувань № 243/31 від 11.09.2025 р.

*Дата першого надходження статті до видання: 19.01.2026*

*Дата прийняття статті до друку після рецензування: 29.02.2026*

*Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026*

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



**V. Savinov<sup>1</sup>, S. Halko<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Engineering Primary and Scientific Institute named after Yu. M. Potebni*

<sup>2</sup> *Dmytro Motornyi Tavria State Agrrotechnological University*

## **INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF AUTOMOTIVE FUEL THROUGH MAGNETIC FIELD TREATMENT**

### ***Summary***

The paper presents the results of research into the influence of electric and magnetic fields and molecular currents on the change in the energy and physicochemical properties of automotive fuel. The source of the magnetic field is moving electric charges that arise in the space surrounding the fuel. The magnetic field of permanent magnets used in the developed device is also created by electric microcurrents circulating inside the fuel molecules. Our research results support the hypothesis that electric fields and molecular currents, which form magnetic fields, can significantly improve fuel combustion. Weak magnetic fields alter the structure of liquid hydrocarbon molecules, which alters the ignition timing and promotes more complete combustion of the air-fuel mixture, which in turn reduces engine load, lowers fuel consumption, and reduces soot and ash formation.

Molecular currents generated by the electric field also improve the diffusion of fuel molecules with oxygen during injection into the combustion chamber, which explains the reduction in ash content. These changes are associated with changes in the physicochemical properties of hydrocarbons, such as viscosity, density, and flash point, which affect the fuel combustion process.

The implementation of these technologies will reduce technical and economic costs of vehicle maintenance and improve the environmental performance of internal combustion engines without requiring design changes. The results demonstrate the significant potential of this technology for improving the fuel efficiency and environmental performance of internal combustion engines.

Further research will be aimed at optimizing the operating parameters of the device design for more effective use on various types of land, sea and air transport under real-world operating conditions.

**Keywords:** electric field, molecular currents, magnetic field, energy efficiency, fuel quality, fuel consumption.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-4>

УДК 621.3

О. Ю. Юрченко, PhD, доц.

ORCID: 0000-0002-3047-6654

Г. В. Барсукова, канд. техн. наук, доц.

ORCID: 0000-0002-4261-2182

Сумський національний аграрний університет

e-mail: aleksyurchenko110917@gmail.com

## ДО ПИТАНЬ АВТОНОМНИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ НА ДОРОГАХ ЗАГАЛЬНОГО КОРИСТУВАННЯ

*Анотація.* Сонячні електростанції на сьогодні є найбільш поширеними джерелами електричної енергії серед відновлюваної енергетики. Використання таких установок для здійснення автоматизованого освітлення на проїжджій частині є одним із прикладів використання систем альтернативної енергетики керівництвом держави з метою покращення рівня життя громадян, безпеки та умов користування дорогами загального призначення. У цій роботі здійснено аналіз функціонування систем сонячної енергетики на проїжджій частині Роменського району, що є класичним прикладом реалізації програми щодо переходу на відновлювані джерела енергії. Проаналізовано структуру системи альтернативної енергетики та указано періоди функціонування її окремих елементів протягом однієї доби. Підкреслено функціонування світлофора у вигляді жовтого мигаючого сигналу виключно в цілях привертання уваги всіх учасників дорожнього руху з метою покращення їхнього рівня безпеки. Спрогнозовано напрям подальших досліджень у цій галузі.

*Ключові слова:* сонячні електростанції, альтернативна енергетика, опори, світильники, світлофор, електрична енергія, безпека.

*Постановка проблеми.* Покращення умов користування громадян дорогами загального користування має власне продовження в різних аспектах. Внаслідок програми «Велике будівництво» 2020 року, ініційованої Президентом України, велика частина територій України піддалася реконструкції. Стосується це як адміністративних будівель, а також пам'яток архітектури та культурних місць, так і доріг загального користування. Електрифікація місць для відпочинку, зупинок, розворотів за класичним для себе способом до цього або не здійснювалася, особливо у віддалених місцях від районних або селищних центрів, або здійснювалася за рахунок ліній електропередачі від живлячих трансформаторних підстанцій.

Сучасний підхід до виконання електромонтажних робіт та електрифікації під час реалізації указаної програми показав ефективні рішення щодо електропостачання освітлювальних установок у місцях зупинок, пішохідних переходів, місць для розворотів, на границі між кількома населеними пунктами тощо. Такі рішення стосуються використання сонячних панелей як автономного джерела живлення для споживачів.

Серед багатьох переваг використання такого способу електрифікації освітлювальних установок виділимо:

- автономність;
- безпечність;
- надійність;
- економію в матеріалах та роботах, порівнюючи з класичним способом електрифікації;
- енергетичну незалежність;
- довговічність служби;
- автоматизовану систему роботи освітлювальної установки;
- сучасний рівень комфорту для громадян;
- естетичність конструкції та системи загалом.



Це дослідження спрямоване на продовження дослідження [1], виконуваного групою авторів та спрямованого на визначення концентрації таких сонячних електростанцій на проміжку одного районного центру, що є сполучним між двома областями. Доцільним є аналіз конструкції таких систем електропостачання та загальний вид функціонування їх у світлу та темну пори доби.

*Аналіз останніх досліджень.* Повне використання ресурсів сонячної енергії по всьому проміжку доріг є ефективним методом для вирішення проблем, пов'язаних з нестачею енергії у транспорті. Ключем до цього є точна оцінка ресурсів сонячної енергії, що забезпечує обґрунтування оптимального розташування дорожніх фотоелектричних проєктів. Проте визначення доступності ресурсів сонячної енергії у дорожніх зонах до планування коридору маршруту залишається складним. Для вирішення цієї проблеми у цій статті було розроблено стандартизований метод [2]. Результати, отримані в роботі [2], мають продовження як матеріал проєктів дорожніх фотоелектричних систем та вибору місця для коридорів маршрутів по всьому світу. Це сприятиме інтеграції транспорту та енергетики у майбутньому.

Цитуючи фрагменти з роботи [2], можна вказати, що такі дослідження є корисними для визначення оптимальних місць для сонячних установок у районах, що не використовуються поблизу автомагістралей. Однак розташування наявної автомагістралі визначено, а доступність ресурсів сонячної енергії в зоні дороги може бути обмежена. Тому в нових проєктах встановлення фотоелектричних установок на дорогах, якщо на етапі планування оцінюються ресурси сонячної енергії регіону і вибирається коридор маршруту з найкращою доступністю ресурсів сонячної енергії, це допоможе максимально використовувати сонячну енергію в зоні дороги. Групою авторів роботи [2] підкреслено, що, як і раніше, спостерігається нестача досліджень з оцінки ресурсів сонячної енергії до планування коридору маршруту.

Електрифікація мобільності вважається перспективним рішенням для ефективного скорочення викидів CO<sub>2</sub> у міських районах. Широко визнано, що зміну клімату можна ефективно пом'якшити за рахунок використання способу переходу від викопного палива до відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) [3]. Тому в роботі [4] представлено модель для оптимального проєктування вуличного сонячного освітлення з урахуванням таких факторів, як ширина вулиці, необхідна середня освітленість, сонячна радіація, характеристики світильників тощо.

Ціль дослідження [4] полягала в тому, аби досягти стійкої установки, яка забезпечуватиме адекватні рівні освітленості. Модель оптимізації розподілу опор, висоти світильників, смності акумулятора та потужності сонячних панелей звела дослідження до віддачі пріоритету комплексному підходу над індивідуальним. Хоча вона застосована у всьому світі, дослідження [4] підтвердило її ефективність, показавши, що зниження потужності світильників не завжди призводить до зниження загального споживання енергії чи витрат. Її ключове нововведення полягає в інтеграції освітлення та відновлюваної енергії в єдиний процес розрахунку, на відміну від традиційних методів, які спочатку проєктують встановлення освітлення, а потім окремо розраховують вимоги до акумулятора та фотоелектричного модуля.

Використання гібридної системи відновлюваної енергії має великі перспективи для сталої електрифікації та підтримки країн у досягненні їхньої мети доступу до енергії [5]. Сонячна фотоелектрична система відома як одна з найвидатніших нових систем відновлюваної енергії для досягнення будівлі з майже нульовим споживанням енергії [6]. Клімат виявляється найважливішим критерієм, оскільки визначає потенційне виробництво електроенергії певним фотоелектричним полем [7]. У дослідженні [8] проведено оцінку можливості використання сонячних тротуарів як стійкого виробника енергії для подачі електроенергії. Натепер використання відновлюваних джерел енергії відіграє важливу роль у майбутньому декарбонізованому енергопостачанні для різних застосувань, таких як тепло, електрика, транспорт та безпека. Тому робота [8] була проведена з метою оцінки можливості впровадження сонячного покриття



для подачі електроенергії від сонця на поверхню дороги для полегшення транспортування та підвищення безпеки на дорогах.

*Формулювання мети статті.* Метою цієї роботи є аналіз конструкції та принципу функціонування систем альтернативної енергетики на дорогах загального користування Роменського району Сумської області. Це дослідження є продовженням дослідження [1], де було здійснено аналіз поширеності таких систем в указаному районі.

Серед основних завдань, які виконано впродовж здійснення дослідження, наявні:

- аналіз конструкції систем сонячної енергетики;
- переваги застосування багатогранних опор;
- аналіз функціонування окремих елементів установок за періодами протяжністю в 1 добу;
- спрогнозовано напрям подальших досліджень указаних систем альтернативної енергетики та освітлювальних установок, що працюють з живленням від них.

*Основна частина.* Ще з початку 2010-х років уздовж деяких ділянок закордонних швидкісних автомагістралей для вироблення електроенергії були побудовані фотоелектричні електростанції за рахунок державних або приватних коштів, але оскільки національним автомагістралям не дозволялося аналізувати потенціали генерації сонячної енергії на основі закону або національних стандартів, авторами [9] було виявлено бажання встановити нові критерії щодо створення сонячної енергії на національних автомагістралях. Вибір відповідних місць є найважливішим кроком для розгортання фотоелектричних панелей для максимізації вихідної потужності, що генерується, у разі мінімізації витрат на проєкт [10].

Функціонування сонячних панелей на дорогах загального користування здійснюється у відповідності до представленої програми, згаданої в постановці проблеми до цього дослідження. Використання сонячних електростанцій здійснюється, головним чином, на пішохідних переходах, місцях стоянки, розвороту транспортних засобів. Аналізуючи місця пішохідних переходів, обладнаних такими установками, виокремлюється підхід у встановленні двох сонячних електростанцій по кожному сторону проїжджої частини окремо. Від них здійснюється живлення світильників з метою освітлення території поруч, а також функціонування світлофорів, що працюють у мигаючому режимі з метою покращення рівня безпеки для учасників дорожнього руху шляхом привертання їхньої уваги.

Монтаж сонячних панелей указаних систем електрифікації окремих місць на проїжджій частині виконано на металевих багатогранних опорах. Закріплення таких опор відбувається болтовими з'єднаннями до встановлених на поверхні землі основ. Серед основних переваг використання таких опор слід виокремити стійкість до корозії і атмосферних впливів. За рахунок цього забезпечується тривалий термін служби опор. Це є досить актуальним особливо для умов сільської місцевості з точки зору досить довгого періоду служби опор без їх заміни, а також сучасного енергоефективного підходу в будівництві за європейськими стандартами. Сучасний дизайн виконання опор також властивий підходу вимог інженерії цього часу.

Конструкцію представлених у цьому дослідженні опор із сонячними електростанціями є можливість показати нижче, на рис. 2.

Представлена на рис. 2 конструкція опори із сонячними панелями є класичною для більшості встановлених систем у досліджуваному районі. Автономність її роботи забезпечується використанням сучасних технологічних рішень, що базуються на автоматизації процесів керування освітленням.

Виконання систем із забезпечення електричною енергією автономного споживача в досліджуваному районі реалізовано використанням двох сонячних панелей та є класичним для всіх установок на проміжку руху.



**Рис. 1.** Сонячні електростанції на дорогах загального користування с. Бобрик, Сумська область

Функціонування представлених систем відбувається повний період доби. Особливо важливим є виокремлення графіка роботи таких елементів, як сонячні панелі та світлофор і світильники. Якщо розглядати такі структурні елементи цілісної установки, то функціонування сонячних панелей відбувається у світлу пору доби за досить високого ступеня освітленості. В хмарну погоду виробіток електричної енергії панелями є досить низьким, що властиво всім електростанціям такого типу. Світильники на таких установках здатні працювати в повному автономному режимі. Засоби автоматизації з настанням сутінок забезпечують вмикання світильників, чим здійснюється освітлення проїжджої частини та прилеглої території. Світлофор працює в штатному режимі як у період світлового дня, так і у разі настання сутінок. Необхідно виокремити, що такий структурний елемент установки працює виключно в режимі мигання жовтого кольору, привертаючи до себе увагу водіїв транспортних засобів та пішоходів, покращуючи рівень безпеки для кожного з них. Нижче, на рис. 3, представлено приклади функціонування сонячних електростанцій, що працюють, віддаючи електричну енергію споживачеві шляхом роботи світильників та світлофора у мигаючому стані.

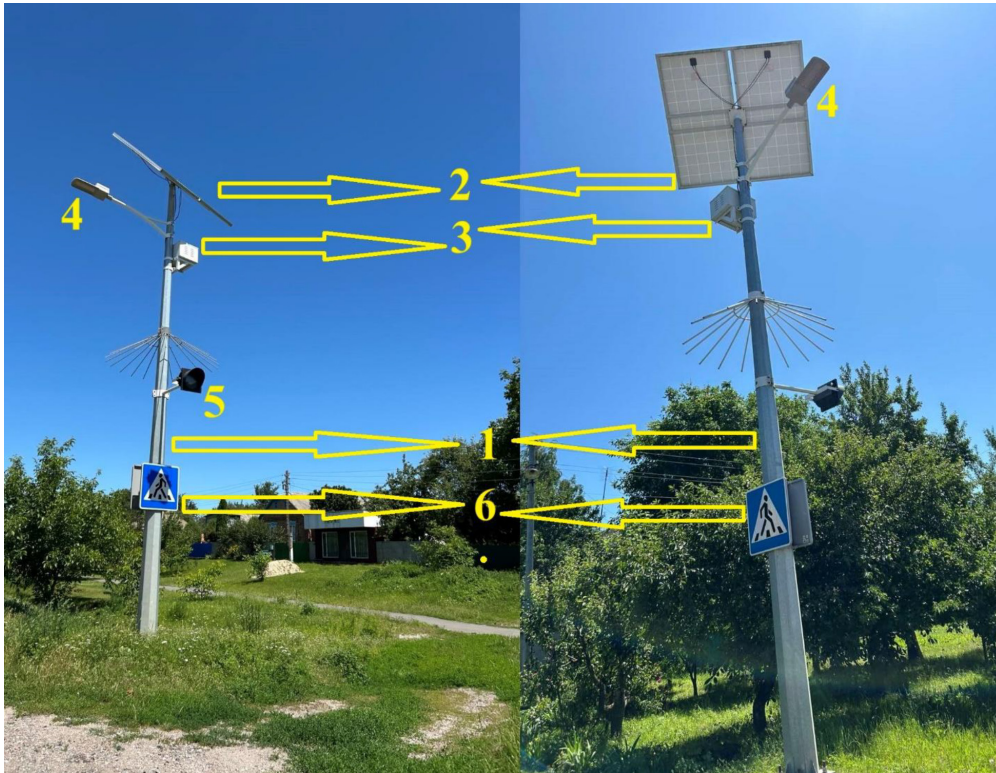


Рис. 2. Структура сонячних електростанцій на металевих багатограних опорах:  
1 – опора, 2 – сонячні панелі, 3 – щит з електроустаткуванням, 4 – світильники, 5 – світлофор,  
6 – знак пішохідного переходу



Рис. 3. Функціонування сонячних електростанцій у темну пору доби

Таким чином, сучасний підхід до забезпечення потреб споживачів у якісних умовах життя реалізується різними способами. В цьому випадку сучасне технологічне рішення дає можливість автономного функціонування освітлювальних установок, працюючих в автоматичному режимі керування на відновлюваних джерелах енергії.



**Висновки.** Використання представлених у роботі сонячних електростанцій дає можливість автономного та енергонезалежного здійснення необхідних заходів щодо покращення умов для громадян шляхом забезпечення необхідного рівня безпеки на проїжджій частині. Крім того, покращення умов праці та користування дорогами загального користування має своє продовження у виконанні стратегії з розвитку міст та сіл. Окремо від цього необхідним є виокремлення енергетичної незалежності та простоти конструкції з попередньо необхідними монтажними роботами для таких установок на дорогах загального користування. Особливо важливим це є в місцях, віддалених від живлячих трансформаторних підстанцій, а також з метою безпеки для громадян.

Наостанок необхідно підкреслити, що майбутні дослідження в цій галузі необхідно спрямувати на визначення ступеня освітленості, що забезпечується такими системами у відповідності до діючих нормативів для місць на проїжджій частині, таких як місця для розворотів, стоянок, зупинок та пішохідних переходів.

### Список використаних джерел

1. Юрченко О. Ю., Барсукова Г. В., Чепіжний А. В., Івченко О. В. Сонячні електростанції на дорогах загального користування як шлях до покращення екологічної безпеки. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія : Механізація та автоматизація виробничих процесів*, 2025 (2), 75–80. DOI: <https://doi.org/10.32782/msnau.2025.2.12>
2. Jiang W., Zhang S., Wang T., Zhang Y., Sha A., Xiao J., Yuan D. Evaluation method for the availability of solar energy resources in road areas before route corridor planning. *Applied Energy*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122260>
3. Javanmardi K., Hernández P., Oregi X. From rooftops to roads: Bilbao's geospatial solar and EV fusion. *Sustainable Cities and Society*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105290>
4. Rabaza O., Pérez-Ocón F., Aznar-Dols F., Gómez-Lorente D. Development of a comprehensive model for the design of photovoltaic solar public lighting systems in rural and urban areas. *Cleaner Engineering and Technology*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2025.101012>
5. Elkadeem M. R., Younes A., Sharshir S. W., Campana P. E., Wang S. Sustainable siting and design optimization of hybrid renewable energy system: A geospatial multi-criteria analysis. *Applied Energy*, 2021, 295, 117071. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117071>
6. Hong T., Lee M., Koo C., Jeong K., Kim J. Development of a method for estimating the rooftop solar photovoltaic (PV) potential by analyzing the available rooftop area using Hillshade analysis. *Applied Energy*, 2017, 194, 320–332. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.001>
7. Tahri M., Hakdaoui M., Maanan M. The evaluation of solar farm locations applying Geographic Information System and Multi-Criteria Decision-Making methods: Case study in southern Morocco. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 51, 2015, 1354–1362. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.054>
8. Dezfooli A. S., Nejad F. M., Zakeri H., Kazemifard S. Solar pavement: A new emerging technology. *Solar Energy*, 149, 2017, 272–284. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.04.016>
9. Kim S., Lee Y., Moon H. Siting criteria and feasibility analysis for PV power generation projects using road facilities. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 81, 2018, 3061–3069. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.067>
10. Jung J., Han S., Kim B. Digital numerical map-oriented estimation of solar energy potential for site selection of photovoltaic solar panels on national highway slopes. *Applied Energy*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.101>

Дата першого надходження статті до видання: 08.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 06.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026

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





**O. Yurchenko, H. Barsukova**  
*Sumy National Agrarian University*

## ON THE ISSUES OF AUTONOMOUS SOLAR POWER PLANTS ON PUBLIC ROADS

### *Summary*

Improving the standard of living for a person is an important element in his development. Modern technologies make it possible to use various methods to achieve these goals. The state and its leadership implement various programs. An example of this is the installation of alternative energy systems, which are described in this work. Solar power plants are currently the most common sources of electricity among renewable energy sources. The use of such installations for automated lighting on the roadway is one of the examples of the use of alternative energy systems by the state leadership in order to improve the standard of living of citizens, safety and conditions for using public roads. This work analyzes the functioning of solar energy systems on the roadway of the Romny district, which is a classic example of the implementation of the program for the transition to renewable energy sources. The structure of the alternative energy system is analyzed and the periods of operation of its individual elements during one day are indicated. The functioning of a traffic light in the form of a yellow flashing signal is emphasized solely for the purpose of attracting the attention of all road users in order to improve their level of safety. The direction of further research in this field is predicted for a broader study of such systems on public roads. The use of solar power plants presented in the work allows for autonomous and energy-independent implementation of the necessary measures to improve conditions for citizens by ensuring the necessary level of safety on the roadway. In addition, improving working conditions and using public roads has its continuation in the implementation of the strategy for the development of cities and villages. In addition, it is necessary to highlight energy independence and simplicity of design with preliminary installation work for such installations on public roads. This is especially important in places remote from power transformer substations, as well as for the purpose of safety for citizens.

**Keywords:** solar power plants, alternative energy, supports, lamps, traffic light, electric energy, safety.



---

**КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ**

---

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-5>

УДК 004.7:004.056

І. О. Воробйов, аспірант

ORCID: 0009-0008-4097-5386

Д. В. Великодний, ст. викл.

ORCID: 0000-0003-0044-5619

Сумський державний університет

e-mail: ivabyov@gmail.com

**МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ Й ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ  
СИСТЕМИ ВІДДАЛЕНОГО ДОСТУПУ  
ДО ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ**

*Анотація.* У статті розглянуто комплекс методів підвищення надійності й інформаційної безпеки (ІБ) системи віддаленого доступу до телекомунікаційного обладнання для навчальних лабораторій. Сформовано модель загроз багатокористувацького середовища та визначено критичні вразливості доступності, ізоляції й керування доступом. Запропоновано резервування ключових сервісів і мережевих шляхів, балансування навантаження та self-healing контейнерних компонентів із централізованим моніторингом і журналюванням. Для зниження ризиків несанкціонованого доступу обґрунтовано використання TLS-шифрування, RBAC/MFA й сегментації мережі. Ефективність підходу підтверджено порівняльною оцінкою базової й удосконаленої системи за показниками часу відновлення, ізоляції користувачів і керованості інфраструктури.

*Ключові слова:* віддалений доступ, телекомунікаційне обладнання, надійність, інформаційна безпека, контейнеризація, RBAC, MFA, TLS, сегментація мережі, журналювання.

*Постановка проблеми.* Системи віддаленого доступу до телекомунікаційного лабораторного обладнання активно впроваджується в закладах вищої освіти, оскільки дає змогу забезпечити гнучкий, масштабований та індивідуально орієнтований доступ студентів до реальних мережевих стендів. Проте разом із перевагами віддалений доступ супроводжується низкою технічних та організаційних обмежень, що впливають на надійність і безпеку роботи таких систем.

Попри широке застосування віртуалізації, контейнеризації та хмарних технологій, значна частина чинних рішень орієнтована переважно на функціональність і зручність використання, тоді як питання відмовостійкості й інформаційної безпеки розглядаються фрагментарно. У більшості віддалених лабораторій відсутні цілісні механізми резервування критичних компонентів, автоматизованого відновлення працездатності й контролю цілісності конфігурацій обладнання. У разі збою окремого сервісу або серверного вузла функціонування системи може бути повністю або частково зупинене, що унеможливорює проведення лабораторних занять і доступ до інфраструктури.

Також значною проблемою залишається ідентифікація та автентифікація користувачів. Часто використовуються застарілі або недостатньо безпечні механізми авторизації, що створює ризики несанкціонованого доступу до лабораторних ресурсів. Крім того, недостатня ізоляція користувацьких сесій може призводити до конфліктів конфігурацій, порушення роботи стендів і небажаного впливу одних користувачів на інших. Окремі дослідження відзначають, що системи управління віддаленими лабораторіями вразливі до атак типу «людина посередині», підбору облікових даних, перевантаження сервісів і спроб втручання в мережеву топо-



логію. Брак інтегрованого моніторингу, журналювання дій користувачів та оперативного аналізу подій безпеки значно ускладнює виявлення інцидентів і реагування на них.

*Аналіз останніх досліджень.* Питання розроблення інфраструктур для віддаленого доступу до лабораторних ресурсів активно досліджуються у світовій науковій спільноті, особливо в контексті дистанційного навчання, хмарних технологій і віртуалізації. У роботах, присвячених управлінню віддаленими лабораторіями, акцент робиться на архітектурі систем, продуктивності сервісів, а також на безпечній взаємодії користувачів із реальним обладнанням. У публікації *Safety and Security Considerations for Online Laboratory Management Systems* автори підкреслюють, що більшість наявних платформ віддаленого доступу потребують удосконалення механізмів контролю доступу, шифрування трафіку й ізоляції робочих середовищ. Зазначається, що безпека таких систем має розглядатися комплексно – від моделювання загроз і захисту каналів передачі даних до аудиту дій користувачів і моніторингу аномалій [1].

Дослідники в роботі *Remote Labs in Cybersecurity Education: Analyzing Requirements and Challenges* звертають увагу на те, що віддалені лабораторії, особливо у сфері інформаційної безпеки, стикаються з проблемою масштабування та підтримання стабільної роботи при збільшенні кількості одночасних користувачів. Також визначено, що суттєвими є питання відмовостійкості, оскільки збої в роботі сервісів прямо порушують навчальний процес [2].

У ґрунтовному огляді *Survey of Remotely Controlled Laboratories for Research and Education* аналізується широкий спектр рішень, що використовуються в навчальних і дослідницьких лабораторіях. Автори виділяють тенденцію переходу від монолітних систем до гнучких модульних архітектур, які включають віртуалізацію, контейнеризацію та хмарні сервіси. При цьому звертається увага на значні відмінності між платформами щодо рівня безпеки, способів керування доступом і підтримки інцидент-менеджменту [3].

У роботі *Remote Laboratory for Computer Networks* розглядається практична реалізація лабораторії мережевого обладнання з використанням консольного доступу (SSH, telnet) і базових механізмів авторизації. Автори підкреслюють, що такі рішення мають низку обмежень, зокрема недостатню гнучкість і відсутність механізмів ізоляції користувацьких конфігурацій, що впливає на надійність роботи стенду [4].

Аналіз корпоративних рішень у сфері безпечного віддаленого доступу, представлений у роботі. Дослідження безпечних методів і засобів віддаленого доступу в корпоративному сегменті демонструє, що використання багатофакторної автентифікації, тунелювання трафіку та централізованого журналювання є базовими вимогами до сучасних систем. Водночас автори зазначають, що навіть у комерційному секторі недостатньо уваги приділяється аспектам відмовостійкості й автоматизованому відновленню роботи сервісів після збоїв [5].

Узагальнюючи результати наведених досліджень, можна зробити висновок, що більшість робіт детально розглядають питання організації віддаленого доступу, але приділяють обмежену увагу комплексному поєднанню надійності й інформаційної безпеки; існує значний розрив між академічними рекомендаціями та реальними інструментами, що застосовуються в навчальних лабораторіях; практично відсутні системи, що інтегрують контейнеризацію, автоматизоване резервування, моніторинг інцидентів і багаторівневий захист у єдину платформу.

Це підкреслює актуальність розроблення методів, спрямованих на створення комплексної відмовостійкої та захищеної інфраструктури для віддаленого доступу до телекомунікаційного обладнання, саме на цьому й зосереджено дослідження.

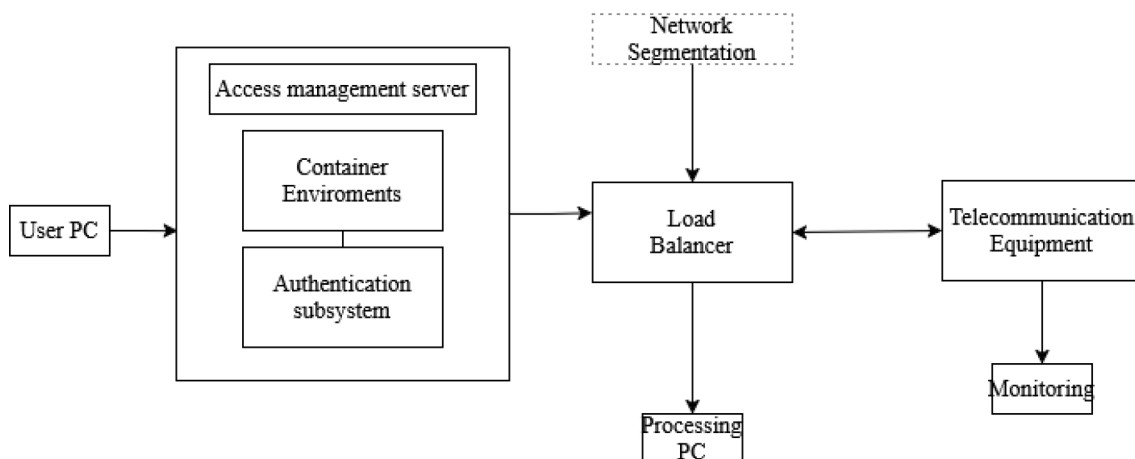
*Формулювання мети статті (постановка завдання).* Метою роботи є обґрунтування комплексу методів підвищення надійності й інформаційної безпеки системи віддаленого доступу до телекомунікаційного обладнання з урахуванням контейнеризації та хмарної інфраструктури. Для досягнення мети поставлено такі завдання:

- визначити основні загрози та вразливості систем віддаленого доступу;
- сформулювати вимоги до відмовостійкої архітектури (резервування, балансування, self-healing, моніторинг);
- запропонувати методи інформаційної безпеки (далі – ІБ) (RBAC/MFA, TLS, сегментація, аудит);
- розробити інтегровану модель поєднання відмовостійкості й інформаційної безпеки;
- оцінити ефективність підходу за ключовими показниками (доступність, час відновлення, керованість, стійкість до атак).

*Основна частина.* Основний матеріал зосереджений на формуванні узгодженого набору методів підвищення надійності й інформаційної безпеки системи віддаленого доступу до телекомунікаційного обладнання. Методи згруповано за напрямками: відмовостійкість (резервування, балансування, self-healing, моніторинг) і кіберзахист (шифрування, контроль доступу, сегментація, аудит).

Інформаційна безпека системи базується на застосуванні контролю доступу, шифруванні каналів зв'язку, сегментації мережі й аудиту дій користувачів відповідно до рекомендацій сучасних стандартів інформаційної безпеки [10].

Архітектура системи віддаленого доступу до телекомунікаційного обладнання має забезпечувати поєднання трьох ключових властивостей: стабільності роботи, захищеності каналів взаємодії та можливості масштабування. Сучасні підходи базуються на використанні мікро-сервісної моделі, контейнеризації та сегментації мережі, що дає змогу розподілити окремі функціональні модулі та мінімізувати вплив збоїв на загальну роботу платформи (рис. 1).



**Рис. 1.** Узагальнена архітектура системи віддаленого доступу до телекомунікаційного обладнання

Типова архітектура включає такі компоненти:

1. Сервер керування доступом. Відповідає за маршрутизацію підключень, управління сесіями та взаємодію з лабораторним обладнанням; доцільним є поділ на окремі сервіси (API, маршрутизація, керування сесіями).

2. Підсистема автентифікації та авторизації. Забезпечує перевірку облікових даних і розмежування прав доступу з використанням RBAC/ABAC; рекомендовано застосовувати MFA й сучасні протоколи (OAuth 2.0 тощо).

3. Система контейнеризації. Надає ізольовані робочі середовища для користувачів (Docker/аналог), що зменшує взаємний вплив сесій і підвищує відтворюваність експериментів.

4. Мережева інфраструктура лабораторії. Охоплює маршрутизатори, комутатори, міжмережеві екрани й інше телекомунікаційне обладнання; доступ організовується через захищені канали.

5. Моніторинг і журналювання. Відстежує стан сервісів і ресурсів, фіксує події доступу та дії користувачів; дані використовуються для реагування на інциденти й підтримки стабільності.

Ключовим елементом такої архітектури є ізоляція компонентів, що зменшує площу можливих вразливостей і полегшує оновлення програмних модулів [8]. Завдяки контейнеризації система може працювати в розподіленому середовищі, а збільшення кількості користувачів компенсується горизонтальним масштабуванням окремих вузлів.

Важливим аспектом архітектури є наявність захищених каналів зв'язку між серверами й обладнанням. Застосування шифрування, сегментації мережі та політик доступу дає змогу зменшити ризики несанкціонованого втручання й перехоплення даних [7]. Архітектура має включати також резервні компоненти, що забезпечують безперервність роботи платформи навіть у разі часткової відмови обладнання.

Модель загроз для системи віддаленого доступу до телекомунікаційного обладнання формується на основі аналізу типових ризиків, притаманних розподіленим сервісам, мережевим інфраструктурам і платформам із багатокористувацьким режимом роботи. Особливість таких систем полягає в тому, що вони поєднують програмні компоненти, канали передачі даних і реальне мережеве обладнання, яке безпосередньо реагує на некоректні команди або несанкціоноване втручання [6] (рис. 2).



Рис. 2. Узагальнена модель загроз для системи віддаленого доступу

Основні групи загроз включають таке:

1. Загрози, пов'язані з автентифікацією та авторизацією. Атаки на облікові дані, повторне використання сесій і несанкціоноване підвищення привілеїв; знижується шляхом MFA та коректної політики прав доступу [9].

2. Мережеві загрози. Перехоплення трафіку, модифікація команд, атаки типу «людина посередині», сканування інфраструктури; критичною є наявність шифрування й сегментації мережі.

3. Загрози, пов'язані з ізоляцією середовища. Недостатня ізоляція контейнерів/сесій або помилки конфігурації можуть вплинути на інших користувачів чи змінити стан реального обладнання.



4. Загрози доступності (відмовостійкість). Перевантаження, відмови вузлів, збої сервісів і мережевого обладнання; потребує резервування й автоматичного відновлення.

5. Внутрішні загрози. Дії авторизованих користувачів (навмисні або помилкові), що порушують роботу стендів; важливі аудит і журналювання.

Ключові вразливості системи включають: використання застарілих протоколів доступу (telnet, небезпечний SSH-конфіг); недостатньо захищені API або відкриті порти; некоректно налаштовані політики доступу до обладнання й контейнерів; відсутність моніторингу стану сервісів і журналювання дій користувачів; залежність від одного вузла або сервера без резервування.

Сформована модель загроз є підґрунтям для вибору механізмів захисту й відмовостійкості, які зменшують вплив кожної з визначених груп ризиків і підтримують стабільну роботу платформи.

Забезпечення надійності системи віддаленого доступу є ключовою умовою її ефективного функціонування, оскільки відмова будь-якого критичного компонента може призвести до зупинки навчального процесу або втрати доступу до лабораторного обладнання. Методи підвищення надійності мають охоплювати апаратний, мережевий і програмний рівні, а також механізми оперативного реагування на збої.

Резервування серверів автентифікації, вузлів керування доступом і контейнерних середовищ дає змогу підтримувати роботу платформи навіть у разі відмови одного з елементів. Для цього застосовують такі підходи: Active-Active – одночасна робота двох або більше серверів з балансуванням навантаження між ними; Active-Standby – дублювальний сервер переходить у робочий стан у разі відмови основного; Резервування мережевих шляхів – використання альтернативних каналів зв'язку між вузлами.

Системи, що обслуговують одночасно багато користувачів, потребують рівномірного розподілу запитів між серверними вузлами. Для цього застосовується: балансування на мережевому рівні (L4), балансування HTTP/SSH-трафіку на рівні застосунків (L7), автоматичне додавання нових контейнерів при зростанні навантаження.

Балансування навантаження запобігає перевантаженню окремих компонентів і підвищує стабільність роботи сервісів.

Технології контейнеризації дають можливість автоматично перезапускати сервіси в разі помилки або зависання. До таких механізмів належать періодичні health-check перевірки стану контейнерів; автоматичний перезапуск сервісів при виявленні некоректної роботи; моніторинг стану обладнання лабораторії, що дає змогу вчасно реагувати на перебої.

Для задоволення потреб різних груп користувачів система має підтримувати горизонтальне та вертикальне масштабування: горизонтальне – додавання нових інстансів сервісів при зростанні кількості студентів; вертикальне – збільшення обчислювальних ресурсів для окремих вузлів; ізоляція навантаження – поділ користувачів між різними робочими середовищами для запобігання конфліктам.

Надійність системи неможлива без механізмів спостереження за її роботою. Система моніторингу має фіксувати час відгуку сервісів; оцінювати навантаження на сервери й обладнання; виявляти збої або підозрілу активність; зберігати журнали подій для аналізу й оптимізації.

Оскільки студенти працюють із реальним мережевим обладнанням, важливо регулярно зберігати його конфігурації: автоматичне створення резервних копій; можливість швидкого відновлення після некоректних команд; захищене зберігання історії змін.

Інформаційна безпека є одним із ключових аспектів системи віддаленого доступу до телекомунікаційного обладнання, оскільки користувачі працюють із реальними мережевими пристроями, що можуть впливати на загальну інфраструктуру лабораторії. Забезпечення конфі-



денційності, цілісності й доступності інформації потребує застосування комплексного підходу, який охоплює захист каналів зв'язку, контроль доступу, ізоляцію середовища та аудит дій користувачів.

Для запобігання перехопленню або модифікації даних між користувачем і лабораторним обладнанням необхідно застосовувати шифрування каналів зв'язку. Основними методами є використання захищених протоколів (SSH, HTTPS, TLS 1.3); заборона застарілих протоколів (telnet, HTTP, weak SSH-ciphers); застосування сучасних криптографічних алгоритмів шифрування.

Система повинна гарантувати, що доступ до обладнання отримують лише авторизовані користувачі, а їхні права відповідають навчальним завданням. Для цього використовують такі методи: багатофакторну автентифікацію (MFA); використання ролей доступу (RBAC) для розмежування дозволів; обмеження доступу до конкретних пристроїв або інтерфейсів; встановлення політик часу доступу або дозволених типів операцій.

У багатокористувацьких системах важливо, щоб робота одного студента не впливала на результати інших. Ізоляція досягається через запуск окремих контейнерів або віртуальних середовищ для кожного користувача; сегментацію мережевої інфраструктури на окремі логічні домени; блокування небажаних міжсегментних взаємодій між стендами.

Для запобігання порушенню конфігураційної цілісності обладнання необхідно впроваджувати механізми журналювання команд, уведених користувачами; фіксації часу, джерела доступу й дій адміністратора; збереження архівів конфігурацій і їх автоматичної перевірки; виявлення аномальної активності (наприклад, масової зміни параметрів).

Сервери, що обслуговують систему віддаленого доступу, також є критичними об'єктами. Основні методи їх захисту: регулярне оновлення програмного забезпечення; застосування принципу мінімальних привілеїв для службових процесів; використання міжмережевих екранів і фільтрація портів; обмеження доступу до серверів на рівні мережесих ACL; контроль ресурсів контейнерів (CPU, пам'ять, мережеві ліміти).

Забезпечення інформаційної безпеки системи віддаленого доступу ґрунтується на комплексному підході: захищені канали, надійна автентифікація, ізольоване середовище, активний аудит і захист серверної інфраструктури. Поєднання цих методів створює безпечні умови роботи з телекомунікаційним обладнанням і запобігає більшості типових кіберзагроз.

Інтеграція методів підвищення надійності й інформаційної безпеки потребує узгодження архітектурних рішень, механізмів захисту й процедур адміністрування. Для системи віддаленого доступу до телекомунікаційного обладнання важливо, щоб усі технологічні компоненти працювали як єдиний комплекс, де кожен елемент доповнює інші та забезпечує безперервність і захищеність роботи.

Запропонована схема реалізації передбачає поєднання таких ключових елементів:

1. Багаторівнева архітектура з контейнеризацією. У центрі системи знаходиться сервер керування доступом, функціональні модулі якого виконуються у вигляді контейнерів. Це дає змогу ізолювати сервіси один від одного; швидко оновлювати окремі компоненти без зупинки всієї системи; застосовувати механізми самовідновлення та контроль працездатності.

2. Резервована серверна інфраструктура й балансування навантаження. Основні сервери продубльовано в режимах Active-Active або Active-Standby. Над ними працює балансувальник навантаження, який рівномірно розподіляє запити; виключає з пулу вузли, що некоректно відповідають; забезпечує автоматичне переключення в разі збою.

3. Захищені канали між користувачами, сервером та обладнанням. Передача даних між усіма компонентами здійснюється шифрованими каналами. Сегментація мережі дає змогу відокремити користувацький доступ; серверну інфраструктуру; мережеве лабораторне обладнання.



4. Ізоляція користувацьких сесій і середовищ. Кожен користувач або група отримують окремий робочий простір: контейнер або віртуальне середовище з відповідним набором інструментів; ізоляцію команд, щоб запобігти конфліктам; можливість відновлення середовища до початкового стану.

5. Централізований аудит і моніторинг. Усі дії користувачів і сервісів реєструються в централізованому журналі: команди, введені на обладнанні; зміни конфігурацій; події автентифікації; збої та аномалії сервісів.

6. Автоматизоване відновлення конфігурацій обладнання. Система регулярно створює резервні копії стану лабораторних пристроїв, що дає змогу оперативно повернути зміни до попереднього стану; відновити лабораторію після некоректного експерименту; зберігати історію конфігурацій для викладацького контролю.

У результаті формується комплексна система, здатна забезпечувати стабільний і безпечний доступ до телекомунікаційного обладнання навіть у випадках збоїв чи високого навантаження. Така інтеграція відповідає вимогам сучасних освітніх платформ і дає можливість підтримувати безперервність навчального процесу.

Представлено результати впровадження методів підвищення надійності й інформаційної безпеки в систему віддаленого доступу до телекомунікаційного обладнання. Результати отримані на основі моделювання роботи системи в умовах багатокористувацького доступу, змінного навантаження та відмов окремих компонентів. Окрему увагу приділено реальним сценаріям використання, які дають змогу оцінити ефективність запропонованих рішень у практичному освітньому середовищі.

Після впровадження резервування та балансування навантаження система продемонструвала значно вищу стійкість до збоїв порівняно з базовою архітектурою. Моделювання відмови одного з вузлів показало, що перемикання між серверними компонентами відбувається автоматично, без переривання активних сесій; час недоступності сервісу скоротився до мінімуму й не вплинув на роботу користувачів; балансувальник навантаження коректно перенаправляє запити на доступні вузли. Окрім цього, упроваджені механізми self-healing забезпечили автоматичний перезапуск контейнерних сервісів при виявленні помилок, що суттєво підвищило стабільність платформи.

Горизонтальне масштабування дало змогу збільшити кількість одночасних користувачів без зниження продуктивності. Тестування в умовах пікового навантаження показало, що система стабільно обслуговує значно більшу кількість паралельних підключень; ізоляція робочих середовищ запобігає взаємному впливу команд різних користувачів; продуктивність серверів залишається на прийнятному рівні навіть при значному навантаженні на мережеву інфраструктуру.

Застосування багатофакторної автентифікації, сегментації мережі та контролю доступу забезпечило значне зменшення ризику несанкціонованого доступу до обладнання. За результатами тестування, усі канали передачі даних працюють через зашифровані протоколи; ризик перехоплення трафіку або модифікації команд практично зведений до нуля; спроби доступу з неавторизованих джерел блокуються на рівні мережевих політик; окремі середовища користувачів унеможливають небажаний вплив на роботу інших.

Контейнеризація дала змогу досягти високого рівня передбачуваності й повторюваності лабораторних завдань. Кожен студент отримує власне оточення з початковими конфігураціями, а будь-які зміни не впливають на роботу інших користувачів; можуть бути швидко скинуті до стандартного стану; автоматично фіксуються в журналах для подальшого аналізу.

Централізоване логування, моніторинг стану сервісів та автоматичне резервне копіювання конфігурацій обладнання покращили керованість системи. Адміністратори отримали можливість відстежувати виконувані команди в реальному часі; аналізувати навантаження на обладнання й сер-



вери; оперативно відновлювати конфігурації після некоректних дій користувачів; прогнозувати потенційні проблеми й оптимізувати інфраструктуру. Завдяки цьому зменшилося навантаження на обслуговуючий персонал, а час відновлення після інцидентів скоротився. Для кількісної оцінки ефективності запропонованих рішень виконано порівняльний аналіз ключових показників системи до та після впровадження методів підвищення надійності та інформаційної безпеки (таблиця 1).

Таблиця 1

## Оцінка ефективності запропонованих методів

Показник	Базова система (без оптимізації)	Запропонована система
Час відновлення після збою, с	120–180	20–30
Кількість точок відмови	Висока	Знижена
Підтримка резервування	Відсутня	Реалізована
Рівень ізоляції користувачів	Низький	Високий
Захищені канали зв'язку	Частково	Повністю
Контроль доступу	Базовий	Розширений (RBAC, MFA)
Можливість журналювання дій	Обмежена	Централізована
Стійкість до мережевих атак	Середня	Підвищена
Масштабованість	Обмежена	Горизонтальна

Аналіз наведених даних підтверджує, що впровадження запропонованого підходу дає змогу суттєво покращити показники доступності, безпеки та керованості системи.

**Висновки.** У роботі досліджено методи підвищення надійності й інформаційної безпеки системи віддаленого доступу до телекомунікаційного обладнання. На основі аналізу наявних підходів, виявлених загроз та особливостей архітектури віддалених лабораторій сформовано комплексний підхід, який поєднує сучасні засоби контейнеризації, механізми резервування, захищені канали зв'язку, ізоляцію середовищ і централізований аудит. Розроблена модель дає змогу забезпечити високу доступність системи за рахунок резервування сервісів, балансування навантаження й автоматизованого відновлення працездатності; захищеність даних і керованість доступу, що реалізуються завдяки багатофакторній автентифікації, ізоляції користувацьких середовищ, захищеним протоколам і сегментації мережі; стабільність роботи лабораторних стендів, яка досягається контролем цілісності конфігурацій, регулярним резервним копіюванням і відокремленням робочих середовищ; покращення адміністрування системи, забезпечене завдяки впровадженню моніторингу, журналювання та централізованого управління сервісами.

Результати тестування показали, що запропонований підхід підвищує стійкість системи до збоїв, зменшує кількість інцидентів, пов'язаних із помилками користувачів, і суттєво покращує інформаційну безпеку. Інтеграція розглянутих методів дає змогу створити надійну, масштабовану та безпечну платформу для проведення лабораторних занять у сфері телекомунікацій, здатну підтримувати навчальний процес навіть у умовах зростаючих навантажень.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробленням методів автоматичного аналізу стану мережевого обладнання, інтеграцією системи з навчальними платформами, а також упровадженням інтелектуальних механізмів прогнозування навантажень і виявлення аномальної активності.

## Список використаних джерел

1. Tan H., Peterson A. Safety and Security Considerations for Online Laboratory Management Systems. *Journal of Remote Engineering and Virtual Instrumentation*. 2023. Vol. 5, № 2. P. 45–59.
2. Lopez R., Murray J. Remote Labs in Cybersecurity Education: Analyzing Requirements and Challenges. *Computers & Security*. 2024. Vol. 136. Art. 103081.



3. Aziz M., Rahman S. Survey of Remotely Controlled Laboratories for Research and Education. *International Journal of Online Engineering*. 2022. Vol. 18, № 7. P. 4–22.
4. Silva P., Duarte M. Remote Laboratory for Computer Networks. *Proceedings of the 11th International Conference on e-Learning (ICEL)*. SCITEPRESS, 2014. P. 295–302.
5. Соловійов О. В., Бойко Д. І. Дослідження безпечних методів і засобів віддаленого доступу у корпоративному сегменті. *Наукові праці НТУ «ХПІ»*. 2021. № 2(1288). С. 112–118.
6. Security and Privacy Controls for Information Systems and Organizations : NIST Special Publication 800-53, Rev. 5. Gaithersburg, MD : NIST, 2020. 492 p.
7. Rescorla E. The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.3 : RFC 8446. IETF, 2018. URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc8446>
8. Docker Documentation. Container isolation principles. Docker Inc., 2023. URL: <https://docs.docker.com/>
9. OWASP Top 10–2021: The Ten Most Critical Web Application Security Risks. OWASP Foundation, 2021. URL: <https://owasp.org/Top10/>
10. ISO/IEC 27001:2022. Information security, cybersecurity and privacy protection – Information security management systems – Requirements. ISO, 2022. URL: <https://www.iso.org/standard/27001>

*Дата першого надходження статті до видання: 10.01.2026*

*Дата прийняття статті до друку після рецензування: 12.02.2026*

*Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026*

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



**I. Vorobiov, D. Velykodnyi**

*Sumy State University*

## **METHODS FOR IMPROVING RELIABILITY AND INFORMATION SECURITY OF A REMOTE ACCESS SYSTEM TO TELECOMMUNICATION EQUIPMENT**

### *Summary*

The paper substantiates a set of methods aimed at improving the reliability and information security of a remote access system to telecommunication equipment used in educational laboratories. Such platforms combine server components, network infrastructure and real devices, therefore failures of critical services or incorrect user actions may disrupt laboratory sessions, while insufficient isolation and weak access control create risks of unauthorized interference. A threat model for a multi-user environment is outlined and the most significant vulnerability groups are identified, including authentication and authorization weaknesses, network-level attacks, insufficient isolation of user sessions, availability threats, and insider misuse. To ensure fault tolerance, the approach integrates redundancy of key services and network paths, load balancing (L4/L7) and automated recovery of containerized components through health checks and self-healing policies. Centralized monitoring and logging are used to detect failures and anomalies, while configuration backup and rapid rollback mechanisms support the continuity of laboratory operation. To strengthen security, encrypted communication channels (TLS/SSH), role-based access control with multi-factor authentication, network segmentation and auditing of user actions are applied. The proposed integration aligns architectural decisions, protection mechanisms and administration procedures into a single workflow that supports stable operation under peak loads and improves manageability. A comparative evaluation of the baseline and improved systems indicates a reduction of recovery time after failures, higher user isolation level, and improved resistance to common network attacks, confirming the practical applicability of the proposed methods in remote telecommunication laboratories.

**Keywords:** remote access, telecommunication equipment, reliability, information security, containerization, load balancing, redundancy, RBAC, MFA, network segmentation.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-6>

УДК 004.75:004.771

С. С. Грушко, канд. техн. наук<sup>1,2</sup>І. І. Афанасьєв<sup>1</sup>, студентА. В. Тіменко<sup>1,2</sup>, стар. викл.Н. А. Куликовська<sup>1</sup>, стар. викл.

ORCID: 0000-0002-0064-408X

ORCID: 0009-0008-5712-9047

ORCID: 0000-0002-7871-4543

ORCID: 0000-0003-4691-5102

<sup>1</sup> Національний університет «Запорізька політехніка»<sup>2</sup> Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: grushko@zpu.edu.ua

## АРХІТЕКТУРА ІНТЕГРОВАНОЇ КЛІЄНТ-СЕРВЕРНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ З ВИКОРИСТАННЯМ WEBSOCKET ДЛЯ ОБМІНУ ДАНИМИ В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

*Анотація.* У статті розглянуто архітектуру інтегрованої клієнт-серверної системи моніторингу системних параметрів комп'ютерів для сервісного центру. Досліджено особливості застосування протоколу WebSocket у поєднанні з STOMP для реалізації двонаправленого обміну повідомленнями в реальному часі між клієнтами та спеціалістами. Проаналізовано переваги WebSocket порівняно з традиційним HTTP-опитуванням. Описано архітектурні рішення щодо інтеграції компонентів системи на базі Spring Boot, JavaFX та PostgreSQL. Представлено механізми забезпечення безпеки комунікації через JWT-авторизацію на рівні WebSocket-з'єднань.

*Ключові слова:* WebSocket, STOMP, клієнт-серверна архітектура, інтегрована система, моніторинг, Spring Boot, JavaFX, реальний час.

*Постановка проблеми.* Сучасні інформаційні системи для технічної підтримки та сервісного обслуговування комп'ютерної техніки стикаються з дедалі більшими вимогами до ефективності обробки звернень користувачів та швидкої діагностики проблем. В умовах зростання кількості звернень до сервісних центрів, а також ускладнення апаратного й програмного забезпечення комп'ютерів виникає потреба в автоматизованих інструментах, що забезпечують збирання, аналіз і передачу технічної інформації про стан систем користувачів.

Традиційний підхід на основі HTTP-запитів із періодичним опитуванням сервера створює надмірне навантаження на інфраструктуру й не забезпечує миттєвої доставки повідомлень. Актуальною є розробка інтегрованих систем, що поєднують збір діагностичних даних, формування звітів та інтерактивну комунікацію в реальному часі.

*Аналіз останніх досліджень.* Питання побудови розподілених систем реального часу активно досліджували вітчизняні та зарубіжні науковці. Протокол WebSocket, стандартизований у RFC 6455 у 2011 році, визнано ефективним рішенням для двонаправленої комунікації через єдине TCP-з'єднання [1]. Spring Framework забезпечує зручну інтеграцію WebSocket із підтримкою STOMP-протоколу, що спрощує реалізацію обміну повідомленнями в застосунках [2].

Дослідження Pimentel і Nickerson показують, що WebSocket зменшує затримку передачі даних на 50–70 % порівняно з HTTP-опитуванням, а також знижує обсяг трафіку за рахунок відсутності повторних HTTP-заголовків [3]. Роботи Walls присвячені практичному застосуванню Spring Framework для побудови веб-застосунків із підтримкою WebSocket [4]. Проте недостатньо вивченими залишаються питання інтеграції WebSocket-комунікації із системами моніторингу апаратних параметрів комп'ютерів.

*Формулювання цілей статті (постановка завдання).* Метою статті є дослідження архітектурних рішень для побудови інтегрованої клієнт-серверної системи моніторингу з використанням

WebSocket для забезпечення обміну даними в реальному часі. Завдання дослідження: проаналізувати особливості протоколу WebSocket і STOMP; обґрунтувати вибір архітектури системи; описати механізми інтеграції компонентів; дослідити питання безпеки WebSocket-комунікації.

*Основна частина.* Розроблена система моніторингу побудована на основі клієнт-серверної архітектури та складається з трьох основних компонентів: клієнтської частини на JavaFX із використанням Spring Framework для керування залежностями, серверної частини на Spring Boot і реляційної бази даних PostgreSQL. Така архітектура забезпечує чітке розмежування відповідальності між компонентами та сприяє масштабованості системи (рис. 1).



Рис. 1. Діаграма компонентів архітектури системи моніторингу

Клієнтська частина забезпечує взаємодію користувача із системою, включаючи збір системних параметрів комп'ютера за допомогою кросплатформеної бібліотеки OSHI-core, формування та надсилання звернень до сервісного центру, перегляду й редагування профілю, а також обміну повідомленнями зі спеціалістами через чат у реальному часі. Для побудови графічного інтерфейсу використано JavaFX з описом компонентів у FXML-файлах, що забезпечує гнучкість і зручність підтримки.

Серверна частина обробляє REST-запити від клієнтів, реалізує основну бізнес-логіку, генерує PDF-звіти на основі бібліотеки Apache PDFBox і забезпечує маршрутизацію повідомлень через WebSocket-брокер. Взаємодія з базою даних здійснюється через Spring Data JPA, що реалізує об'єктно-реляційне відображення даних без необхідності написання SQL-запитів.

Для реалізації чату в реальному часі між клієнтами та спеціалістами обрано протокол WebSocket із використанням STOMP (Simple Text Oriented Messaging Protocol). WebSocket – це протокол, стандартизований у RFC 6455, який забезпечує повнодуплексний канал зв'язку через єдине TCP-з'єднання. На відміну від HTTP, WebSocket підтримує постійне двостороннє з'єднання, що дає змогу миттєво обмінюватися повідомленнями без необхідності встановлювати нове з'єднання для кожного запиту [1].



STOMP (Simple Text Oriented Messaging Protocol) – це текстовий протокол обміну повідомленнями, який працює поверх WebSocket і надає семантику публікації/підписки. STOMP визначає формат фреймів для команд CONNECT, SUBSCRIBE, SEND, MESSAGE [6]. Використання STOMP дає змогу абстрагуватися від низькорівневих деталей протоколу та зосередитися на бізнес-логіці застосунку.

Основні переваги WebSocket включають зменшення затримки передачі даних завдяки постійному з'єднанню; зниження навантаження на сервер через відсутність повторних HTTP-заголовків; можливість надсилання даних сервером клієнту без попереднього запиту.

Конфігурація WebSocket-сервера реалізована в класі WebSocketConfig і визначає кінцеву точку /ws, через яку клієнти встановлюють з'єднання. Для маршрутизації повідомлень використовується брокер повідомлень, налаштований із префіксами /queue для особистих повідомлень, /topic для групових каналів та /user для адресації конкретним користувачам. Такі префікси дають змогу реалізувати приватні та групові канали обміну повідомленнями [2].

Для кожного звернення (issue) у системі створюється окремий топик /topic/chat/{issueId}, на який підписуються учасники діалогу. Додатково створюється канал /topic/chat-status/{issueId} для сповіщення про зміну статусу звернення (OPEN, IN\_PROGRESS, CLOSED).

Процес установа WebSocket-з'єднання складається з кількох етапів. Спочатку клієнт виконує стандартний WebSocket handshake через HTTP-запит на адресу /ws із заголовком Upgrade: websocket. Після встановлення базового з'єднання клієнт ініціює STOMP-сесію, надсилаючи фрейм STOMP CONNECT з токеном автентифікації у заголовку. Сервер виконує перевірку JWT-токена через Spring Security й у разі успіху підтверджує з'єднання фреймом STOMP CONNECTED [5].

Обробка вхідних повідомлень здійснюється в контролері ChatController за адресою /app/chat/{issueId}/send. Кожне повідомлення проходить валідацію та зберігається в базі даних через сервіс ChatService, де також перевіряється право користувача надсилати повідомлення в конкретний чат. Після збереження повідомлення миттєво транслюється всім підписникам каналу через Spring-брокер.

Безпека WebSocket-з'єднань забезпечується конфігураційним класом WebSocketSecurityConfig, який реалізує авторизацію на рівні повідомлень. Система контролює доступ користувачів до конкретних тем (topic) та особистих каналів (user) згідно з їх ролями та правами доступу. Механізм перевірки базується на JWT-токенах (JSON Web Token), які клієнт передає при встановленні сесії та які містять інформацію про ідентифікатор користувача та його роль [7].

JWT-токен складається із заголовка із зазначенням алгоритму підпису, корисного навантаження з даними про користувача й терміном дії, і підпису для перевірки цілісності. На серверній стороні застосовується Spring Security зі спеціалізованим JWT-фільтром, який перехоплює всі вхідні HTTP-запити й перевіряє валідність токена [8].

Для WebSocket-комунікації механізм перевірки прав реалізований на рівні підключення й підписки до каналів через ChannelInterceptor. Конфігурація розмежування прав доступу реалізована в класі SecurityConfiguration, де визначено дозволи для різних кінцевих точок системи відповідно до ролей: CLIENT, SPECIALIST, ADMIN [9].

Модуль комунікації підтримує ініціацію звернення через REST-запит із можливістю прикріпити звіт; обмін повідомленнями в реальному часі через WebSocket; зміну статусу чату з автоматичним інформуванням; контроль доступу на основі JWT-авторизації.

Для перевірки стійкості й продуктивності системи проведено навантажувальне тестування за допомогою фреймворку Gatling. Сценарій тестування передбачав емулювання одночасної роботи 50 унікальних користувачів, для кожного з яких виконувався ланцюжок операцій: вхід до системи та масова генерація 20 звітів.

Під час тестування виконано 1050 запитів (50 операцій входу та 1000 створень звітів) без помилок. Середній час відповіді для автентифікації становив 9162 мс, максимальний – 11911 мс, що є очікуваним для тестового сервера AWS t2.micro.

Операції генерації звітів виконувалися значно швидше. Після першого запиту (середній час 2628 мс) подальші створення звітів оброблялися із середнім часом відповіді 245–468 мс. Результати навантажувального тестування представлено на рис. 2.

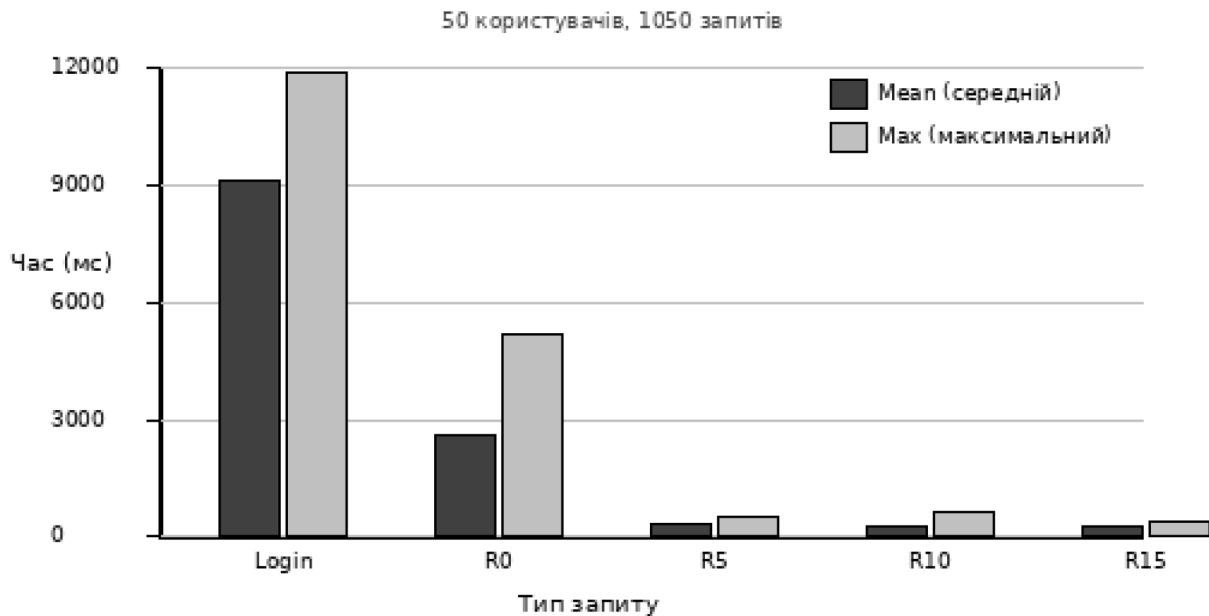


Рис. 2. Час відповіді сервера при навантажувальному тестуванні

Аналіз результатів засвідчив стійкість системи до паралельних навантажень і здатність обробляти запити від 50 одночасних користувачів. Час відповіді для операцій з даними не перевищує 1 секунди, що відповідає нефункціональним вимогам до продуктивності.

*Висновки.* У статті досліджено архітектуру інтегрованої клієнт-серверної системи моніторингу з використанням WebSocket для обміну даними в реальному часі. Установлено, що застосування WebSocket у поєднанні зі STOMP-протоколом забезпечує ефективну двонаправлену комунікацію між клієнтами та спеціалістами сервісного центру із затримкою, значно меншою за традиційне HTTP-опитування.

Обґрунтовано вибір архітектури на основі Spring Boot для серверної частини, JavaFX із Spring Framework для клієнтської частини та PostgreSQL для зберігання даних. Така архітектура забезпечує чітке розмежування відповідальності між компонентами, модульність та сприяє масштабованості системи.

Описано механізми інтеграції компонентів системи через REST API для основних операцій і WebSocket для обміну повідомленнями в реальному часі. Досліджено питання безпеки WebSocket-комунікації та реалізовано авторизацію на рівні повідомлень з використанням JWT-токенів, що забезпечує конфіденційність даних і захист від несанкціонованого доступу.

Перспективами подальших досліджень є оптимізація масштабування системи для роботи з більшою кількістю одночасних користувачів, упровадження механізмів кластеризації WebSocket-з'єднань із використанням брокерів повідомлень (RabbitMQ, Redis) і дослідження можливостей горизонтального масштабування серверної інфраструктури.

**Список використаних джерел**

1. Fette I., Melnikov A. The WebSocket Protocol. RFC 6455. IETF, 2011. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc6455>
2. Spring Framework Documentation. WebSocket Support. URL: <https://docs.spring.io/spring-framework/reference/web/websocket.html>
3. Pimentel V., Nickerson B.G. Communicating and Displaying Real-Time Data with WebSocket. *IEEE Internet Computing*. 2012. Vol. 16, № 4. P. 45–53. DOI: 10.1109/MIC.2012.64
4. Walls C. Spring in Action. 6th ed. Shelter Island : Manning Publications, 2022. 520 p.
5. Афанасьев І. І. Розробка програмного комплексу моніторингу системних параметрів та обліку клієнтських звернень для сервісного центру : дипломна робота бакалавра. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2025. 126 с.
6. STOMP Protocol Specification. Version 1.2. URL: <https://stomp.github.io/stomp-specification-1.2.html>
7. Jones M., Bradley J., Sakimura N. JSON Web Token (JWT). RFC 7519. IETF, 2015. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc7519>
8. Spring Security Reference. URL: <https://docs.spring.io/spring-security/reference/index.html>
9. Spilca L. Spring Security in Action. Shelter Island : Manning Publications, 2020. 560 p.
10. Gatling Documentation. Load Testing Tool. URL: <https://gatling.io/docs/>

*Дата першого надходження статті до видання: 10.02.2026*

*Дата прийняття статті до друку після рецензування: 05.03.2026*

*Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026*

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



**S. Hrushko<sup>1,2</sup>, I. Afanasiev<sup>1</sup>, A. Timenko<sup>1,2</sup>, N. Kulykovska<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> National University Zaporizhzhia Polytechnic

<sup>2</sup> National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

## **ARCHITECTURE OF AN INTEGRATED CLIENT-SERVER MONITORING SYSTEM USING WEBSOCKET FOR REAL-TIME DATA EXCHANGE**

### *Summary*

The article examines the architecture of an integrated client-server system for monitoring computer system parameters designed for service centers. The research investigates the features of implementing the WebSocket protocol in conjunction with STOMP (Simple Text Oriented Messaging Protocol) for bidirectional real-time messaging between clients and technical support specialists. The advantages of WebSocket technology compared to traditional HTTP polling approaches are analyzed, including reduced latency, decreased server load, and efficient network resource utilization through a persistent full-duplex connection.

The paper describes architectural solutions for integrating system components based on modern technologies: Spring Boot framework for the server-side implementation, JavaFX with Spring Framework for the desktop client application, and PostgreSQL relational database for data persistence. The system architecture ensures clear separation of responsibilities between components, modularity, and scalability for future enhancements.

Particular attention is paid to communication security mechanisms through JWT (JSON Web Token) authorization at the WebSocket connection level. The implementation of message-level authorization using Spring Security and ChannelInterceptor for controlling access to specific topics and channels according to user roles is described. The article presents load testing results using the Gatling framework, which confirmed the system's ability to handle 50 concurrent users. All 1050 requests were processed successfully with response times ranging from 245 ms for report generation to 9162 ms for authentication operations.

**Keywords:** WebSocket, STOMP, client-server architecture, integrated system, monitoring, Spring Boot, JavaFX, real-time.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-7>

UDC 004.056.5:004.75

Y. O. Zhyvylo<sup>1</sup>, PhDA. S. Yanko<sup>1</sup>, PhDE. Y. Rubin<sup>2</sup>, PhDV. V. Magaletska<sup>2</sup>, PhD

ORCID: 0000-0003-4077-7853

ORCID: 0000-0003-2876-9316

ORCID: 0009-0005-4447-4413

ORCID: 0009-0000-5562-699X

<sup>1</sup> National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic"<sup>2</sup> University of Modern Technologies

e-mail: zhivilka@i.ua

## ADAPTIVE TRUST ASSESSMENT MODEL FOR CROSS-DOMAIN SECURITY SYSTEMS BASED ON ZERO TRUST ARCHITECTURE

*Summary.* In modern distributed information systems, there is a significant increase in the complexity of interaction between different security domains, creating new challenges for ensuring high-reliability access control and effective protection of information resources. Traditional security models based on static access policies and fixed trust levels demonstrate limited effectiveness in the context of dynamic, heterogeneous, and cross-domain environments where diverse organizational, technological, and network domains interact. This paper proposes an adaptive trust assessment model for cross-domain security systems implemented based on the principles of Zero Trust architecture. The proposed approach involves the dynamic determination of the trust level for an access subject, considering a comprehensive set of parameters, including user behavioral characteristics, endpoint trust, domain reputation, access request context, and the history of previous interactions. To formalize the proposed approach, a mathematical trust assessment model has been developed, which allows for the real-time calculation of an integral trust metric and its use in decision-making regarding granting or restricting access. Based on the model, an adaptive trust assessment algorithm has been formulated, ensuring continuous verification of users and devices in a cross-domain environment. Furthermore, a system architecture is proposed, which includes modules for contextual information collection, behavioral analysis using artificial intelligence methods, a Trust Engine computational mechanism, and a decision-making system for access management. To evaluate the effectiveness of the model, an experimental simulation of a cross-domain environment was conducted with various user behavior scenarios and potential attacks, demonstrating improved trust assessment accuracy and a reduced probability of unauthorized access compared to traditional access control approaches. The proposed model can be applied to enhance the cybersecurity level of distributed information systems, cloud environments, and other complex infrastructures where ensuring adaptive access control between different security domains is critically important.

*Keywords:* cybersecurity, cross-domain security, trust assessment, adaptive trust model, Zero Trust architecture, access control, behavioral analysis.

*Statement of the problem.* Modern distributed information systems are characterized by a significant increase in the complexity of cross-domain interaction. This is driven by the scaling of organizational, technological, and network infrastructures. Additionally, the integration of heterogeneous hardware and software components further impacts this complexity.

The growing complexity of systems creates new technical challenges. Primarily, there is a need for effective access management for users and devices. Ensuring the confidentiality, integrity, and availability of information resources is also critical. Furthermore, systems must possess a high level of cyber resilience and the capability to counter dynamic threats in real time.

Traditional access control models based on static policies and predefined trust levels demonstrate limited effectiveness in such dynamic and heterogeneous environments. They do not provide an adaptive response to changes in user behavior, device state, or access request context. This is particularly



critical for cross-domain systems where diverse technologies, platforms, and organizational policies interact simultaneously. Consequently, there is an urgent need to develop adaptive trust assessment mechanisms. These mechanisms should dynamically determine the access level of users and devices in real time, accounting for behavioral characteristics, request context, and interaction history.

It is essential to emphasize that the primary problem of modern cross-domain security systems is the lack of universal trust assessment mechanisms. Existing models do not integrate a comprehensive set of factors influencing the trust level, specifically user behavioral patterns, endpoint status, domain reputation, request context, and previous interaction history.

Accordingly, the insufficient adaptability of traditional access control models increases the likelihood of unauthorized access. It also reduces the efficiency of cross-domain access rights management. Therefore, the lack of adaptability in traditional access control models leads to the limited applicability of static Zero Trust architectures and creates a requirement for implementing dynamic trust assessment mechanisms supported by contextual and behavioral analytics. Thus, it is critically important to implement mechanisms for dynamic trust assessment and continuous verification of users and devices. Subsequently, such mechanisms will ensure improved access control accuracy, a significant reduction in the probability of compromise, and reliable coordination of interaction between different domains of the information infrastructure.

*Analysis of recent research.* Current developments in the concept of cybersecurity demonstrate significant attention to Zero Trust Architecture (ZTA) as the primary paradigm of minimal trust and continuous verification of users, devices, and transactions. At the international level, systematic literature reviews confirm that ZTA has become a fundamental model for protecting complex digital ecosystems, as classical perimeter defense models are unable to function effectively in heterogeneous and cross-domain environments [1, p. 2].

In particular, literature reviews from recent years [2–6] indicate a broad field of research aimed at applying ZTA in cloud infrastructures, IoT, corporate networks, industrial systems, and distributed services. It should be emphasized that almost all modern sources point to the loss of effectiveness of static policies, thereby necessitating a transition to adaptive access control models.

Certain scientific circles in the USA, notably NIST (National Institute of Standards and Technology), have developed specialized recommendations formalizing Zero Trust components, ranging from elements of continuous authentication to conditional access based on context and risk. These standards actively influence further research and implementation practices of ZTA in government, corporate, and critical infrastructures. Current research papers reflect significant regional specificities where, considering national characteristics, technology development vectors vary considerably. For instance, while the priority in the EU is the implementation of Zero Trust in cross-domain networks in compliance with regulations (GDPR, NIS2), the emphasis in China is shifted towards adapting the architecture to local solutions where flexible access control on a corporate scale is critically important.

In the context of trust models, global experience suggests integrating risk assessment, behavioral analysis, and access management into the decision-making process. Under these conditions, Risk-based access control becomes an integral component of modern solutions, combining American experience in optimizing real-time trust assessment algorithms with European approaches to standardizing model interaction in distributed networks. Additionally, to ensure security in large-scale device networks without centralized control, the field of trust computation in IoT environments, based on the integration of ZTA architecture and decentralized learning, is actively developing [7, p. 42].

Methods of behavioral analysis, included in modern solutions based on machine learning and anomaly detection, are highlighted separately. These methods allow for a significant increase in the accuracy and adaptability of trust assessment. Specifically, studies in the USA and the EU show that such approaches significantly reduce the number of false positives and increase the response speed



to anomalous events. This is particularly important for distributed and cross-domain systems where traditional access rules cannot adapt in time to changes in the behavior of access subjects.

Scientific circles pay special attention to cross-domain security issues, as the integration of heterogeneous policies, protocols, and access structures significantly complicates the creation of a consistent trust verification mechanism. Therefore, international standards and modern research emphasize the interoperability of Zero Trust components in complex infrastructures where traditional models prove ineffective due to the gap between domains and the heterogeneity of access rules.

Ukrainian researchers also make a significant contribution to the development of the field, with works dedicated to adapting security architectures and policies based on the Zero Trust concept to the specifics of the national infocommunication space. For example, access management models based on the dynamic determination of security policies developed in [8, p. 84] demonstrate the adaptation of ZTA approaches for distributed IT infrastructures, considering different classes of users and devices. Other Ukrainian works, including projects on the application of Zero Trust in IoT environments [5, p. 173], explore the possibilities of integrating behavioral analysis and micro-segmentation for modern dynamic systems. Specific examples of ZTA application for Ukraine's critical infrastructures show the importance of adaptive access models in the context of increased threats and the need to comply with international security standards [9, p. 94].

Despite significant achievements, several substantial gaps are still observed in the scientific environment. First, there is a lack of adaptive trust models that comprehensively integrate behavioral, contextual, and historical parameters for real-time access management. Second, there is insufficient use of behavioral analysis and ML algorithms for cross-domain trust assessment, which limits the accuracy and speed of decision-making. Third, there is the absence of a universal cross-domain access architecture capable of ensuring the interoperability of diverse security policies and dynamic trust assessment across complex hybrid environments.

Thus, a review of current literature and analytical reports from international and national scientific centers confirms the presence of significant gaps in the field of cross-domain security. This underscores the urgent need to develop adaptive trust assessment mechanisms capable of dynamically determining the access level of users and devices in real time, accounting for behavioral characteristics, contextual parameters, and the history of previous interactions. It is this justified need that forms the basis for developing the research methodology and constructing the mathematical model, algorithm, and experimental simulation presented in the following sections.

*The objective of this paper is to develop an adaptive trust assessment model for cross-domain security systems based on the principles of Zero Trust architecture, which allows for improving access control accuracy, ensuring dynamic verification of users and devices, reducing the risks of unauthorized access, and optimizing interaction between heterogeneous domains of the information infrastructure.*

To achieve the stated objective, the following research tasks have been identified:

- analysis of existing access control and trust assessment models in international and national research, including Zero Trust architectures, risk-based access control, and behavioral models;
- development of a mathematical trust assessment model that integrates user behavioral characteristics, device state, domain reputation, request context, and the history of previous interactions;
- creation of an adaptive access management algorithm that implements dynamic trust level determination and decision-making regarding granting or restricting access to resources in cross-domain environments;
- designing a system architecture that includes modules for contextual information collection, behavioral analysis, a trust computation mechanism, and an access decision-making system;



– conducting an experimental simulation of a cross-domain environment to verify the effectiveness of the proposed model, algorithm, and trust assessment mechanisms under various user behavior scenarios and potential attacks.

The implementation of these tasks enables a comprehensive approach to adaptive access management in distributed and heterogeneous systems by integrating Zero Trust principles and modern behavioral analysis methods.

Consequently, achieving the outlined objective of this paper will facilitate the fulfillment of the defined tasks and establish a scientifically grounded foundation for developing adaptive trust assessment mechanisms in cross-domain security systems. Furthermore, the developed model will create the necessary conditions for building modern intelligent systems capable of self-learning, preemptive response to anomalous events, and continuous monitoring of trust levels in dynamic environments.

*Development of an adaptive trust assessment model for cross-domain systems.* Modern information systems are characterized by high complexity of cross-domain interaction and the integration of heterogeneous technological components. This necessitates the implementation of access control and trust assessment models capable of providing dynamic verification of users and devices, as well as real-time access management. To systematize the research, existing approaches can be classified into three main groups:

1. Traditional access control models (DAC, RBAC). Traditional access control models, such as DAC and RBAC, are characterized by relative simplicity of implementation and a clear policy structure, ensuring effective integration into existing corporate systems. At the same time, the centralized structure and static nature of policies limit the ability of such models to dynamically respond to changes in user behavior and endpoint states, while also complicating integration into multi-domain and heterogeneous information environments. Examples of practical implementation of these approaches include Microsoft Active Directory, which uses RBAC for centralized access management, and Oracle Database Security, which supports DAC and RBAC policies for database access control.

2. Risk-Based Access Control (R-BAC). Compared to traditional models, R-BAC approaches evaluate access requests based on the current risk level, integrating contextual parameters such as user geolocation, endpoint device type, and history of previous actions. This ensures dynamic access management, consideration of request context, and the possibility of integration with behavioral analysis mechanisms to improve decision-making accuracy. At the same time, R-BAC approaches have limitations, including increased complexity in policy configuration, significant load on risk assessment computational mechanisms, and partial support for cross-domain interaction in heterogeneous environments. Examples of R-BAC implementation include IBM Security Verify Access, which applies a risk-based approach for access control in corporate and cloud environments, and Cisco Identity Services Engine, which provides dynamic access policies with integrated contextual analysis.

3. Zero Trust Architecture (ZTA) and adaptive trust assessment models. ZTA models are based on the “never trust, always verify” principle, which entails continuous, real-time verification of users, endpoints, and transactions. An advancement of these approaches lies in adaptive trust assessment models that integrate dynamic trust scoring mechanisms. These models account for user behavioral patterns, access context, domain reputation, and the history of previous interactions, enabling an accurate and flexible assessment of the trust level within complex cross-domain environments.

The implementation of such models provides several key advantages. First, continuous verification of users and devices is implemented, which reduces the probability of unauthorized access. Second, the integration of behavioral analysis and machine learning algorithms allows for dynamic anomaly detection and real-time response to behavioral changes. Third, these approaches demonstrate high efficiency in multi-domain and heterogeneous environments where traditional static access control models prove insufficient.

At the same time, these models have significant limitations that result in the complexity of their practical implementation. Key challenges include the high complexity of constructing trust models and trust scoring algorithms, significant computational costs for processing large volumes of contextual data, and the need for centralized or hybrid data collection for accurate trust level determination.

Examples of practical implementation of ZTA and adaptive trust assessment models include Google BeyondCorp, which applies the principles presented in [10, p. 12], and the Adaptive Trust Models proposed in research [5, p. 171], which demonstrate the effectiveness of integrating behavioral analysis and dynamic trust scoring in cross-domain systems.

Given the advantages and limitations of the discussed access control and trust assessment models, a systematic comparison of their key characteristics is appropriate. Such an analysis allows for determining the effectiveness of each model under various conditions, evaluating the level of dynamism, the integration of contextual and behavioral analysis, and the capability for application in multi-domain environments. Table 1 below presents a comparison of access control models, summarizing key parameters, advantages, and practical implementation examples.

Table 1

Comparative table of access control models

Model	Dynamism	Contextual Analysis	Behavioral Analysis	Support for Cross-domain Systems
DAC	Low	No	No	No
RBAC	Low	No	No	No
Risk-Based AC	Medium	Yes	No	Partial
Zero Trust	High	Yes	Partial	Yes
Adaptive Trust	High	Yes	Yes	Yes

Thus, the conducted comparative analysis indicates that traditional DAC and RBAC models remain effective in centralized environments due to their simplicity of implementation and clear policy structure. However, their application in heterogeneous and multi-domain systems is limited by the static nature of policies and the lack of dynamic response to changes in user behavior and endpoint status.

Meanwhile, R-BAC models provide more flexible access control by integrating contextual factors such as geolocation, device type, and user activity history. Nonetheless, their effectiveness in cross-domain environments remains partially limited, as they only partially integrate behavioral analysis and cross-domain interaction, while policy configuration and risk assessment require significant computational resources.

In contrast, ZTA ensures continuous real-time verification of users and devices, which improves access control accuracy and reduces the probability of unauthorized access [11, p. 74]. At the same time, the application of ZTA requires centralized contextual data collection and high computational costs, which may complicate implementation in large-scale multi-domain systems.

In contrast to traditional and risk-oriented models, adaptive trust assessment models integrate Zero Trust principles, behavioral analysis, and contextual information, providing dynamic and high-precision access management in real time. Therefore, this approach demonstrates high efficiency in complex cross-domain environments and allows for the application of ML mechanisms to enhance system resilience against anomalies, unauthorized actions, and potential attacks.

Thus, the conducted analysis underscores the necessity of developing a proprietary adaptive trust assessment model that combines Zero Trust principles, behavioral, and contextual analysis, ensuring high-precision access control, dynamic verification of users and devices, and effective interaction in multi-domain information environments.



In cross-domain information security systems, effective access management requires a dynamic and comprehensive approach to trust assessment. To this end, a mathematical model is proposed that integrates key factors influencing the trust level of an access subject. The model formalizes the integral trust indicator  $T_s$ , which enables real-time decision-making regarding the granting or restriction of access.

$$T_s = \sum_{i \in \{u, d, r, c, h\}} w_i \cdot T_i, \quad (1)$$

where  $T_s \in [0, 1]$  – the integral indicator of trust in a user or device. A value of 0 corresponds to complete distrust, while 1 represents the maximum level of trust;  $T_i$  – the assessment of a specific trust component;  $w_i \in [0, 1]$  – the weight coefficient reflecting the significance of each factor;  $\sum w_i = 1$  ensures the normalization and consistency of the integral indicator; indices  $i \in \{u, d, r, c, h\}$  correspond to the following components:

- $u$  – user behavioral characteristics ( $T_u$ ),
- $d$  – endpoint state ( $T_d$ ),
- $r$  – domain reputation ( $T_r$ ),
- $c$  – request context ( $T_c$ ),
- $h$  – history of previous interactions ( $T_h$ ).

Component  $T_u$  represents the probability of normal user behavior, estimated based on the analysis of their actions within the system:

$$T_u = 1 - P(A_u), \quad (2)$$

where  $P(A_u) \in [0, 1]$  – the probability of user behavior anomaly, determined by machine learning methods and statistical detection of deviations.

High values of  $T_u$  indicate stable, predictable user behavior, while low values suggest a potential risk of unauthorized access.

To calculate  $A_u$ , activity pattern clustering, anomaly detection, or autoencoders can be applied to predict the risk of anomalous activity.

Component  $T_d$  assesses the technical security of the device used to access the system:

$$T_d = \alpha_s \cdot S_{OS} + \alpha_p \cdot P_{patch} + \alpha_v \cdot V_{antivirus}, \quad \alpha_s + \alpha_p + \alpha_v = 1, \quad (3)$$

Where  $S_{OS} \in [0, 1]$  – assessment of the operating system state (configuration, absence of vulnerabilities);  $P_{patch} \in [0, 1]$  – relevance of installed patches and updates;  $V_{antivirus} \in [0, 1]$  – anti-virus protection status;  $\alpha_s, \alpha_p, \alpha_v$  – weight coefficients reflecting the criticality of each sub-factor for device security;  $\alpha_s + \alpha_p + \alpha_v = 1$  ensures the normalization of the assessment  $T_d$ .

Domain reputation is modeled as an exponential smoothing of the security incident history:

$$T_r(t) = \beta \cdot T_r(t-1) + (1 - \beta) \cdot (1 - R_{incident}(t)), \quad (4)$$

where  $T_r(t) \in [0, 1]$  – domain reputation at time  $t$ ;

$R_{incident} \in [0, 1]$  – risk assessment of the current incident in the domain;

$\beta \in [0, 1]$  – smoothing coefficient that prioritizes previous events or emphasizes recent incidents.

Consequently, a high domain reputation reduces the risk of unauthorized access and increases the overall trust level.

The contextual assessment accounts for external conditions that influence access security:

$$T_c = \sum_{j=1}^m \gamma_j \times C_j, \quad \sum_{j=1}^m \gamma_j = 1, \quad (5)$$



where  $C_j \in [0, 1]$  – normalized context indicators, such as user geolocation, device type, access time, and resource criticality level;

$\gamma_j$  – weight coefficients of each contextual parameter;

$m$  – the number of contextual factors.

User interaction history is formed through a cognitive trust accumulation function:

$$T_h = \frac{\sum_{k=1}^n \delta^{n-k} \cdot S_k}{\sum_{k=1}^n \delta^{n-k}}, \quad \delta \in (0,1), \quad (6)$$

where  $S_k \in [0, 1]$  – assessment of the  $k$ -th previous interaction;

$\delta$  – discount factor highlighting the relevance of recent events;

$n$  – the number of recent interactions considered when calculating the integral indicator.

To implement model adaptivity, weight coefficients may vary depending on the current context:

$$w_i = w_i^0 \cdot f(C_{context}(t), R_{risk}(t)), \quad (7)$$

where  $w_i^0$  – the baseline value of the weight coefficient;  $f(\cdot)$  – an adaptation function that increases or decreases the significance of a component in the event of threats or anomalies.

This approach ensures dynamic balancing of trust factors in real time. The proposed model integrates behavioral, technical, and contextual analysis, along with historical interactions of users and devices, providing a complete integral trust indicator  $T_s$ . The model formalizes adaptive trust scoring, which serves as the foundation for the decision-making algorithm in cross-domain security systems [12, p. 3], enabling dynamic access management, enhanced risk assessment accuracy, and a lower probability of unauthorized actions.

Following the principles of the modern Zero Trust concept, access to information system resources must be determined through continuous assessment of the trust level of the access subject as well as an analysis of the potential risk associated with request execution [13, p. 1].

In view of the above, an adaptive access management algorithm is presented below for dynamic trust evaluation and flexible regulation of user rights within the system. Primarily, it is necessary to formalize a set of parameters characterizing the state of the access subject and the context of the request. To achieve this, a vector of contextual characteristics is introduced:

$$X(t) = \begin{bmatrix} B(t) \\ D(t) \\ R(t) \\ C(t) \\ H(t) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

where  $X(t)$  – vector of trust parameters at time  $t$ ;  $B(t)$  – indicator of user behavioral characteristics;  $D(t)$  – trust level of the access device;  $R(t)$  – reputation of the domain environment;  $C(t)$  – request context (time, geolocation, network type);  $H(t)$  – history of previous interactions with the system.

Comparing the vector representation of parameters with traditional trust assessment approaches, it can be noted that such an approach enables the application of linear algebra and statistical analysis methods for information processing.

Since various factors have different levels of significance for assessing access security, it is appropriate to utilize a system of weight coefficients. To this end, we introduce a weight vector:



$$\mathbf{W} = [w_1 \ w_2 \ w_3 \ w_4 \ w_5], \quad (9)$$

where  $w_i$  – the weight coefficients of the corresponding trust parameters.

Then the integral trust level is defined as the dot product of the weight vector and the parameter vector:

$$T(t) = \mathbf{W} \cdot X(t), \quad (10)$$

specifying:

$$T(t) = w_1B(t) + w_2D(t) + w_3R(t) + w_4C(t) + w_5H(t), \quad (11)$$

where  $T(t)$  – the integral trust indicator at time  $t$ ;  $w_i$  – the weight coefficients of the factors,  $\sum_i^5 w_i = 1$ .

Thus, the integral trust assessment is formed as a weighted aggregation of factors, enabling the model to adapt to various levels of information resource criticality.

However, relying solely on the trust level is insufficient for making an informed access decision. Therefore, an access risk assessment function is introduced based on the principle of balancing trust and risk:

$$R_{risk}(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i F_i(t), \quad (12)$$

where  $R_{risk}(t)$  – the integral risk indicator;  $F_i(t)$  – the  $i$ -th risk factor;  $\lambda_i$  – the weight coefficient of the risk factor;  $n$  – the number of risk factors.

Risk factors may include:

- anomalous user behavior;
- use of a new or untrusted device;
- access from an atypical geolocation;
- use of an unsecured network;
- low reputation of the domain environment.

Thus, risk assessment allows for accounting for potential threats that may arise during the execution of an access request.

To combine the trust level and the risk level, a generalized security indicator is introduced:

$$S(t) = \beta T(t) - \gamma R_{risk}(t), \quad (13)$$

where  $S(t)$  – integral access security indicator;  $T(t)$  – trust level;  $R_{risk}(t)$  – risk level;  $\beta, \gamma$  – weight coefficients of the influence of trust and risk.

Therefore, based on this relationship, even a high level of trust can be compensated for by an increased level of risk, which fully corresponds to the concept of dynamic access management in a Zero Trust environment.

To ensure a more flexible decision-making mechanism, it is appropriate to apply a logistic function, which allows for estimating the probability of granting access:

$$P_{access} = \frac{1}{1 + e^{-k(S(t)-\theta)}}, \quad (14)$$

where  $P_{access}$  – probability of granting access;  $S(t)$  – integral security indicator;  $k$  – steepness coefficient of the logistic function;  $\theta$  – security threshold value;  $e$  – base of the natural logarithm.

By comparing the obtained value  $P_{access}$  with established thresholds, the system determines the required level of access to the resource.



The access decision can be represented by the following function:

$$Decision = \begin{cases} Allow, & P_{access} \geq 0.75 \\ Challenge, & 0.4 \leq P_{access} < 0.75, \\ Deny, & P_{access} < 0.4 \end{cases} \quad (15)$$

where *Allow* – granting full access to the resource; *Challenge* – necessity of additional authentication; *Deny* – denial of access.

Thus, an adaptive access control mechanism is implemented, which takes into account not only the static attributes of the user but also the interaction context, behavioral history, and potential risks.

In general, the adaptive access management algorithm in a cross-domain environment is implemented as a sequence of the following stages:

1. Receiving an access request to the information resource.
2. Forming a vector of contextual access parameters.
3. Calculating the integral trust level.
4. Assessing the access risk level.
5. Forming a generalized security indicator.
6. Calculating the access probability using the logistic function.
7. Making a decision regarding granting, restricting, or denying access.
8. Updating interaction history and trust parameters.

Thus, the proposed algorithm provides dynamic and context-oriented access management in cross-domain information environments. Comparing this approach with traditional access control models, it can be argued that the use of integral indicators of trust, risk, and probabilistic decision-making methods significantly enhances the security level of information systems.

At the same time, the practical application of the proposed algorithm requires its implementation in the form of a cohesive information system. Therefore, given the necessity of processing a significant number of contextual parameters and ensuring prompt access decision-making, it is appropriate to develop a modular system architecture.

In this process, each system component fulfills a specific functional load. Specifically, the contextual information collection module ensures the retrieval of data regarding the user, device, and network environment. The behavioral analysis module processes the obtained data and detects deviations from typical behavior. Based on this data, the trust calculation mechanism implements the mathematical model for evaluating the trust level, while the decision-making system forms the final decision regarding granting or restricting access.

Thus, the logical continuation of the developed algorithm is the design of the system architecture, which ensures the coordinated operation of the specified modules. Consequently, the next stage of the research involves designing the system architecture, including modules for contextual information collection, behavioral analysis, a trust calculation mechanism, and an access decision-making system.

The Fig. 1 illustrates the component architecture of the adaptive access control system, reflecting the interaction structure of the primary functional modules and the data flows between them.

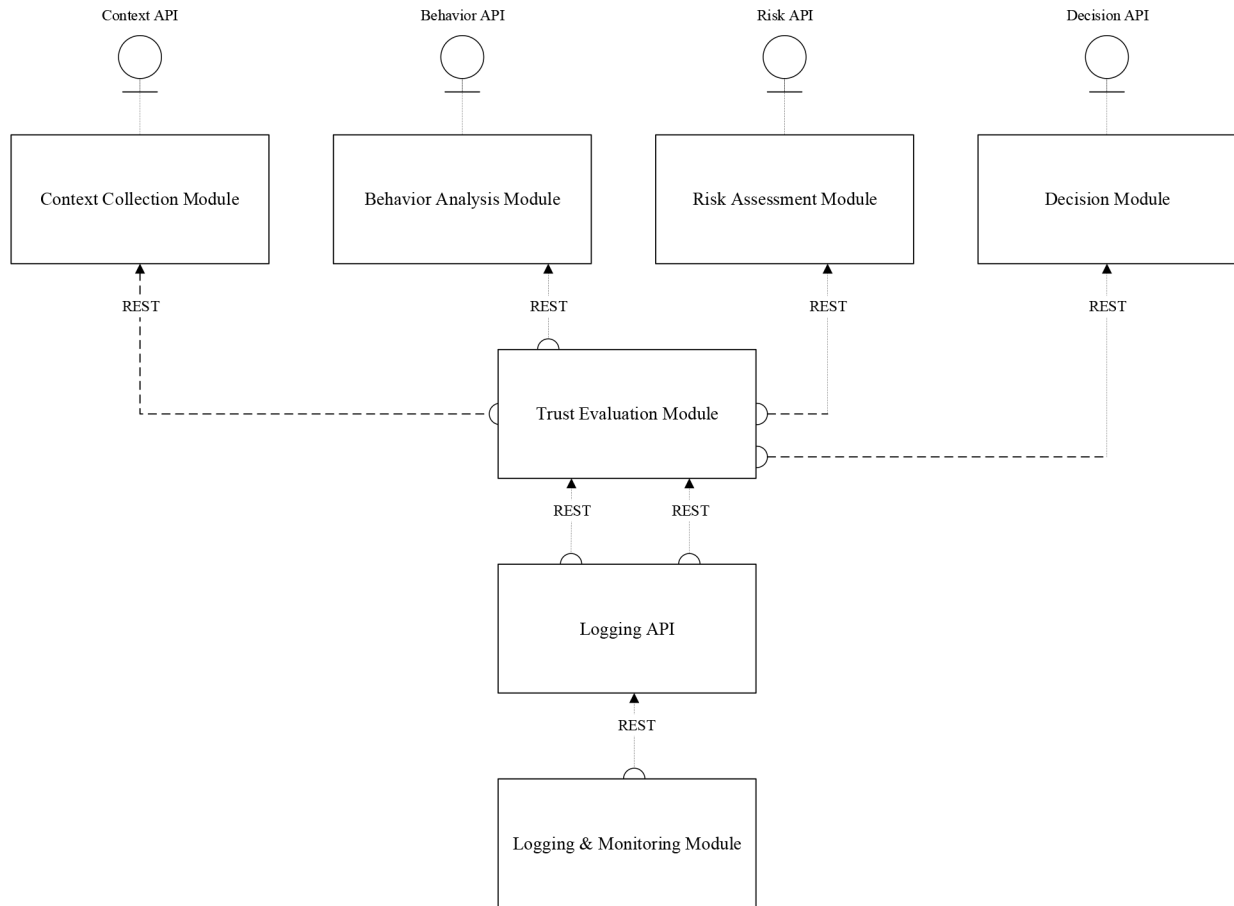
This architecture can be represented as a set of functional modules:

$$S = \{M_c, M_b, M_r, M_t, M_d\}, \quad (16)$$

where  $M_c$  – context collection module;  $M_b$  – behavior analysis module;  $M_r$  – risk assessment module;  $M_t$  – trust evaluation module;  $M_d$  – decision module.

The interaction of the components of the proposed architecture can be represented as a graph

$$G = (V, E), \quad (17)$$



**Fig. 1. Access control system architecture**

where  $V = \{M_c, M_b, M_r, M_t, M_d\}$  – the set of vertices corresponding to the functional modules of the system;  $E$  – the set of edges defining the information data flows between the modules.

The set of edges is defined as

$$E = \{(M_c, M_b), (M_c, M_r), (M_b, M_t), (M_r, M_t), (M_t, M_d)\}. \quad (18)$$

The flow logic is implemented through the following set of processes:

- $(M_c, M_b)$  – contextual data is transmitted to form a behavioral profile;
- $(M_c, M_r)$  – the same data is transmitted to assess the risk of potential compromise;
- $(M_b, M_t)$  – behavioral analysis results are used to form an integral trust indicator;
- $(M_r, M_t)$  – risk assessment is also integrated into the trust scoring formula;
- $(M_t, M_d)$  – the final trust indicator is transmitted for access decision-making.

This means that the contextual information collection module transmits data both to the behavior analysis module and directly to the trust evaluation module, while the behavioral analysis results are used for further assessment of the trust level. After calculating the integral trust indicator, the relevant data is transmitted to the decision-making module.

Taking into account the specified structure, the functioning of the adaptive access control system can be described by a generalized function

$$A = F(U, C, B, P), \quad (19)$$

where  $U$  – user attributes;  $C$  – contextual parameters of the access environment;  $B$  – behavioral analysis results;  $P$  – information system security policies;  $A$  – access decision result.

The function  $F(\cdot)$  implements the adaptive access control algorithm and includes the stages of contextual information collection, behavioral analysis, trust level calculation, and forming the final access decision.

In the general case, the access decision is defined as

$$A = Decision(T, P), \quad (20)$$

where  $T$  – integral trust indicator;  $P$  – set of security policies.

Thus, the proposed formalization allows for describing the access control system architecture as an interconnected set of functional modules between which contextual and analytical data is transmitted. The use of a graph model provides a clear visual representation of component interaction, while the mathematical description of the decision-making function formalizes the process of adaptive access control in a cross-domain information environment [14, p. 4].

The experimental research simulation was implemented to evaluate the effectiveness of the proposed adaptive trust assessment model and access management algorithm in multi-domain heterogeneous information systems. The primary objective of the study was to determine the extent to which the integration of behavioral analysis, the risk assessment module, and contextual data improves access control accuracy compared to traditional approaches such as DAC, RBAC, and R-BAC. In this regard, the experiment was comprehensive in nature and included modeling dynamic user behavior scenarios and various resource access conditions.

The purpose of the simulation was to evaluate the accuracy of the integral trust indicator  $T$ , the adaptability of the decision-making algorithm  $A$ , and the system's effectiveness in reducing the risk of unauthorized access. Additionally, the experiment allowed for determining the contribution of behavioral analysis and the risk assessment module to the system's dynamism and its ability to respond to anomalous or attacking user actions.

To achieve the goal, three domains with different access policies ( $D_1, D_2, D_3$ ) were simulated, and 5000 user requests with varying behavior were generated. The simulation included three scenarios: normal, anomalous, and potentially attacking behavior, which provided the conditions for testing the model's adaptability. The results were compared with DAC, RBAC, and R-BAC models to evaluate the advantages of the proposed approach.

The following simulation parameters were determined: three domains, 150 users, 50 resources, and 5000 requests. The distribution of behavior scenarios consisted of 70 % normal, 20 % anomalous, and 10 % attacking. Trust threshold values were set at  $T_{high} = 0.8$  and  $T_{low} = 0.5$  to ensure a balance between security and resource accessibility.

Consequently, the experimental configuration reproduced a realistic multi-domain environment and provided a reliable basis for further analysis regarding the accuracy, adaptability, and efficiency of the proposed trust evaluation model.

The effectiveness of the proposed system was evaluated using three key metrics: decision-making accuracy (Accuracy), the false positive rate (FPR), and risk mitigation efficiency (Risk Mitigation). These are defined in the following way:

$$\text{Accuracy}(\%) = \frac{N_{correct}}{N_{total}} \cdot 100, \quad \text{False Positive Rate}(\%) = \frac{N_{false}}{N_{total}} \cdot 100;$$
$$\text{Risk Mitigation}(\%) = \left( 1 - \frac{N_{breaches}}{N_{total}} \right) \cdot 100,$$

where  $N_{correct}$  is the number of correctly processed requests,  $N_{false}$  is the number of false positives,  $N_{breaches}$  is the number of recorded unauthorized accesses, and  $N_{total}$  is the total number of requests.

The simulation results are presented in Table 2.

Table 2

Comparison of Access Control Models Effectiveness

Model	Accuracy (%)	FPR (%)	Risk Mitigation (%)
DAC	85.2	8.4	76.5
RBAC	87.5	7.2	78.3
R-BAC	92.1	5.6	84.7
Adaptive Trust (proposed)	97.3	2.4	93.8

The analysis of the results confirmed that traditional DAC and RBAC models are effective in centralized environments, but they exhibit limited adaptability in multi-domain scenarios. While R-BAC models provide dynamic context-aware access control, the integration of behavioral analysis and cross-domain interaction remains partial. The proposed adaptive model demonstrates the highest accuracy, significantly reduces the false positive rate, and increases risk mitigation efficiency.

Visualization of the results in Fig. 2 and 3 demonstrates a clear advantage of the adaptive model across all experiment scenarios. The accuracy graph shows that the integration of behavioral analysis and risk assessment allows for achieving 97.3 % Accuracy, which exceeds the performance of traditional models. The risk mitigation level graph reflects 93.8 % for the adaptive model, confirming its ability to minimize unauthorized access threats.

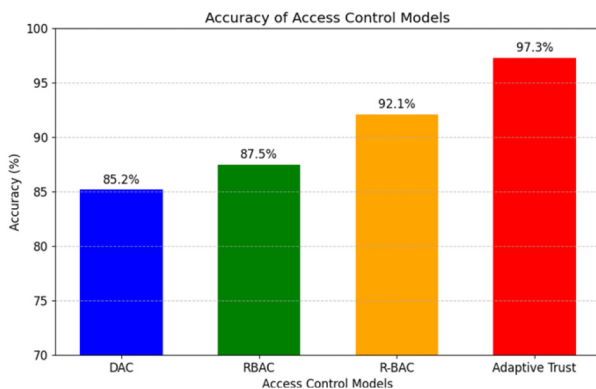


Fig. 2. Accuracy graph

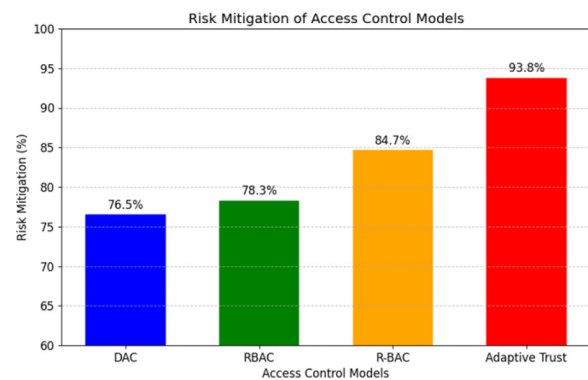


Fig. 3. Risk mitigation level graph

The experimental simulation confirmed that the integration of behavioral analysis and the risk assessment module significantly increases the accuracy of trust evaluation in multi-domain information environments. The use of the proposed adaptive access management algorithm ensures a reduction in the number of false positives and unauthorized access incidents compared to traditional DAC, RBAC, and R-BAC models, which indicates an increase in system reliability. Overall, the application of trust threshold values allows for achieving an optimal balance between security and resource accessibility while ensuring dynamic and context-oriented verification of users and devices [15, p. 42]. Thus, the simulation results confirm the high effectiveness of the proposed adaptive trust evaluation model and justify its further integration into real-world cross-domain information systems where ensuring precise access control and resilience against potential threats is critically important.

*Research Results.* As a result of the study, a comprehensive evaluation was conducted on the effectiveness of the proposed adaptive trust evaluation model for cross-domain security systems, built on Zero Trust Architecture principles. The developed approach involves the integration of user behavioral analysis, device state assessment, domain reputation, request contextual parameters, and the history of previous interactions to form a dynamic integral trust indicator. This integration

ensures context-oriented and adaptive verification of access subjects within cross-domain information environments.

The obtained results confirm that the combination of adaptive access management algorithms, behavioral analysis, and risk assessment mechanisms allows for a significant increase in access decision-making accuracy, reduces the probability of unauthorized actions, and ensures more effective detection of anomalous activity. The application of the proposed model contributes to the increased reliability, adaptability, and resilience of cross-domain information systems against potential cyber threats.

Overall, the research results confirm the feasibility of utilizing adaptive trust evaluation mechanisms in next-generation access control systems and justify the practical suitability of the proposed model for implementation in complex multi-domain information infrastructures.

*Conclusion.* The study successfully achieves its stated objective through the development of an adaptive trust assessment model specifically designed for cross-domain security systems operating on Zero Trust principles. A primary outcome of this research is the establishment of a robust mathematical and algorithmic framework that integrates a diverse range of parameters such as user behavioral patterns, endpoint device states, domain reputation, and the history of previous interactions. This framework is supported by a newly proposed adaptive algorithm that enables the real-time calculation of an integral trust score, effectively shifting access control from rigid static policies to a model of dynamic and continuous verification.

Furthermore, the research provides a detailed design for a modular system architecture which incorporates specialized engines for contextual data collection and behavioral analysis alongside a centralized Trust Engine for automated decision-making. The effectiveness of this approach was confirmed through experimental validation involving the simulation of a cross-domain environment subjected to various attack scenarios and behavioral fluctuations. These results demonstrate a significant improvement in trust assessment accuracy and a measurable reduction in the probability of unauthorized access when compared to traditional perimeter-based security models. Ultimately, the implementation of these findings establishes a scientifically grounded foundation for enhancing the cybersecurity and resilience of distributed heterogeneous information infrastructures.

Future studies should be directed toward the integration of machine learning and deep learning methods to enhance the precision of user behavioral analysis and ensure the early detection of anomalies and potential threats.

Another critical aspect involves expanding risk assessment mechanisms by incorporating additional contextual parameters, such as the temporal characteristics of user activity, endpoint device status, and the specific security policies of individual domains. Looking ahead, these advancements will increase system adaptability and the accuracy of the integral trust indicator.

Special attention should also be paid to optimizing the performance and scalability of algorithms as the number of users, resources, and domains increases, alongside exploring the integration of the proposed model into hybrid and cloud environments characterized by heterogeneous security policies.

### Bibliography

1. Gambo M. L., Almulhem A. Zero Trust Architecture: A Systematic Literature Review. *Journal of Network and Systems Management*. 2026. Vol. 34, No. 25. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10922-025-09998-x>
2. Mushtaq Sadaf, Mohsin Muhammad, Mushtaq Muhammad Mujahid. A Systematic Literature Review on the Implementation and Challenges of Zero Trust Architecture Across Domains. *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 19. Art. 6118. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25196118>



3. Ma X., Fang F., Wang X. Dynamic Authentication and Granularized Authorization with a Cross-Domain Zero Trust Architecture for Federated Learning in Large-Scale IoT Networks. *arXiv preprint arXiv:2501.03601*. 2025. URL: <https://arxiv.org/html/2501.03601v1>. (дата звернення: 15.02.2026).
4. Romashko I., Kalashnikova Y. CISCO SECUREX AND ZERO TRUST: MODERN APPROACHES TO CYBER DEFENSE. 2025. URL: <http://perspectives.pp.ua/index.php/nts/article/view/29469/29425>
5. Zhyvylo Y., Kuchma Y. Mathematical modeling of intellectual and cryptographic protection of authentication keys. *ITS*. 2025. Vol. 13, No. 2. P. 162–177. DOI: <https://doi.org/10.20535/2411-1031.2025.13.2.344591>
6. Fesenko T., Kalashnikova Y. Mathematical aspects of the combined application of the AES algorithm and steganographic methods in authentication key protection. *Information Technology and Security (ITS)*. 2025. Vol. 13, No. 2. P. 178–191. DOI: <https://doi.org/10.20535/2411-1031.2025.13.2.344592>
7. Хорошко В., Браїловський М., Пархоменко І., Киричук Т. Модель реалізації управління доступом до інформаційних активів в концепції нульової довіри. *Безпека інформаційних систем і технологій*. 2024. Т. 1, № 7. С. 39–44. DOI: <https://doi.org/10.17721/ISTS.2024.7.39-44>
8. Mankovskyi B., Dovbniak V., Opriskyu I. RESEARCH ON THE FEASIBILITY OF IMPLEMENTING THE ZERO TRUST CONCEPT IN IOT SYSTEMS. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*. 2025. Vol. 1, No. 29. P. 73–91. DOI: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.29.864>
9. Трофімов О. С. Вдосконалення політики безпеки інформаційних систем об'єктів критичної інфраструктури України на основі концепції ZERO TRUST. Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2025. № 3. С. 87–102. DOI: <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2025.038702>
10. Rose S., Borchert O., Mitchell S., Connelly S. Zero Trust Architecture (NIST Special Publication 800-207). National Institute of Standards and Technology. 2020. DOI: <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-207>
11. Zhyvylo Ye., Kuz V. Risk Management of Critical Information Infrastructure: Threats-Vulnerabilities-Consequences. *Theoretical and Applied Cybersecurity*. 2023. Vol. 5, Iss. 2. P. 68–80. DOI: <https://doi.org/10.20535/tacs.2664-29132023.2.280377>
12. Wang Z., Liu H., Ma R. A Probabilistic Linguistic Large-Group Emergency Decision-Making Method Based on the Louvain Algorithm and Group Pressure Model. *Mathematics*. 2025. Vol. 13, No. 4. Art. 670. DOI: <https://doi.org/10.3390/math13040670>
13. European Union Agency for Cybersecurity (ENISA). ENISA Threat Landscape 2024: Predictive Security Intelligence and AI-Driven Threat Analysis. Heraklion: ENISA Publications Office, 2024. URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/e71394ea-85f0-11ef-a67d-01aa75ed71a1>
14. Wei Z., Lan G., Zhao H., Li Z., Ju Z. Lattice-Based Certificateless Proxy Re-Signature for IoT: A Computation- and-Storage Optimized Post-Quantum Scheme. *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 15. Art. 4848. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25154848>
15. The development of management methods based on bio-inspired algorithms / Kashkevich, Shyshatskyi A. et al. *Information and control systems: modelling and optimizations : collective monograph*. Kharkiv : TECHNOLOGY CENTER PC, 2024. P. 35–69. DOI: <http://doi.org/10.15587/978-617-8360-04-7>

Дата першого надходження статті до видання: 15.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 10.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026

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





Є. Живило<sup>1</sup>, А. Янко<sup>1</sup>, Е. Рубін<sup>2</sup>, В. Магалецька<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

<sup>2</sup> ТОВ ПВНЗ «Університет сучасних технологій»

## АДАПТИВНА МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ ДОВІРИ ДЛЯ МІЖДОМЕННИХ СИСТЕМ БЕЗПЕКИ НА ОСНОВІ АРХІТЕКТУРИ ZERO TRUST

### *Анотація*

У статті досліджено проблему ускладнення міждоменної взаємодії в розподілених інформаційних системах, що обмежує ефективність традиційних моделей контролю доступу. Запропоновано адаптивну модель оцінювання довіри, побудовану на принципах архітектури Zero Trust. Наукова новизна полягає у розробці математичного апарату для динамічного обчислення інтегрального показника довіри на основі поведінкових чинників, репутації домену та контексту запиту.

Розроблено алгоритм безперервної верифікації суб'єктів і пристроїв, а також архітектуру системи, що інтегрує механізми штучного інтелекту для аналізу контексту (Trust Engine). Результати експериментальної симуляції підтвердили високу точність моделі у виявленні несанкціонованих дій та стійкість до атак у гетерогенних середовищах. Запропонований підхід є перспективним для посилення кіберзахисту хмарних інфраструктур та складних мережевих систем.

**Ключові слова:** кібербезпека, міждоменна безпека, оцінювання довіри, адаптивна модель довіри, архітектура Zero Trust, контроль доступу, поведінковий аналіз.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-8>

УДК 004.8

І. С. Узун, аспірант

М. В. Лобачев, канд. техн. наук, проф.

Національний університет «Одеська політехніка»

e-mail: [uzun.i.s@op.edu.ua](mailto:uzun.i.s@op.edu.ua)

ORCID: 0000-0001-6619-4862

ORCID: 0000-0002-4859-304X

## БЮДЖЕТОВАНА ДРЕЙФ-ІНІЦІЙОВАНА МІКРОАДАПТАЦІЯ ДЛЯ ПОТОКОВОГО ПРОГНОЗУВАННЯ ЧАСОВИХ РЯДІВ ЗА УМОВАМИ ЗМІН РЕЛЕВАНТНОСТІ МОДАЛЬНОСТЕЙ

*Анотація.* У потокових інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень прогнозування мульти-модальних часових рядів виконується каузально та за обмежених ресурсів, тому повне перенавчання після кожної зміни середовища є надмірним. Розглянуто дрейф відносної релевантності модальностей і подієво-ініційовану бюджетовану мікроадаптацію, що оновлює лише малу голову злиття  $\theta = (a, b, c)$ . Подію дрейфу визначають за сигналом релевантності на ковзному вікні (із згладженням і перевіркою персистентності), після чого запускається інкрементне оновлення. Показано, що в постдрейфових сегментах точність зростає до MAE =  $0.66 \pm 0.01$  проти  $0.70 \pm 0.01$  та RMSE =  $0.84 \pm 0.01$  проти  $0.90 \pm 0.01$ , а також середній час відновлення становить 157 кроків; у середньому виконуються 3 оновлення.

*Ключові слова:* машинне навчання, аналіз даних, інформаційні системи, системи підтримки прийняття рішень, багатоканальні дані, нестаціонарність, злиття даних, подієво оновлення параметрів, інкрементне навчання, ресурсні обмеження.

*Постановка проблеми.* У практичних потокових інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень (СППР) мультимодальні часові ряди формуються гетерогенними джерелами (сенсори, інформаційні канали) і прогнозуються каузально, тобто з використанням лише доступної історії. У таких умовах нестаціонарність проявляється, зокрема, як концептуальний дрейф і призводить до деградації якості прогнозування. Окремо важливим є дрейф, за якого змінюється не стільки розподіл ознак модальностей, скільки їхня *відносна релевантність* щодо цільової змінної. Повне перенавчання моделі після кожної зміни середовища часто суперечить вимогам малої латентності та обмежених ресурсів, тому актуальною є подієва адаптація з прозорим обліком витрат.

*Аналіз останніх досліджень.* Проблематику адаптації до концептуального дрейфу (concept drift) у потокових постановках систематизовано в оглядових працях, де узагальнено типи дрейфу (раптовий, поступовий, повторюваний), класи стратегій адаптації та підходи до оцінювання якості у потоках [1; 2]. Як приклади практичних механізмів виявлення змін і керування масштабом історії розглядають адаптивне ковзне вікно зі статистичними гарантіями для потоків [11]. Динамічне перезважування та заміну експертів у ансамблях для дрейфових концепцій описано у [13]. Для мультимодальних моделей принциповим є коректне злиття модальностей та керування внеском каналів: огляд методів data fusion і типових викликів (несумісність масштабів, шум, пропуски) узагальнено в [3], а таксономію мультимодального машинного навчання та типові сценарії злиття модальностей подано в [4]. У прикладних системах з потоковими даними актуальними залишаються питання моніторингу якості та організації контрольних конвеєрів у режимі експлуатації: підходи до виявлення дрейфу/аномалій як частини конвеєра валідації даних для часових рядів описано в [6], а приклад адаптивного ансамблевого підходу для еволюціонуючих потоків даних із механізмами оновлення за зміни розподілів продемонстровано в [12]. Порівняння підходів до прогнозування часових рядів на великих наборах

даних узагальнюється в результатах бенчмарків: у масштабному порівнянні методів підкреслено роль ансамблевих та гібридних схем як сильного базового рівня [14]. Українські прикладні роботи ілюструють різні домени та постановки: прогнозування пікових навантажень енергосистеми [7], прогноз температури поверхні Землі [8], оцінювання моделей для фінансових часових рядів за турбулентності [9], інформаційні системи для класифікації стану дорожнього покриття з використанням методів машинного навчання [15], прогнозування валютного курсу з використанням градієнтного бустингу [16], гібридну схему прогнозування базової інфляції на основі поєднання статистичної та нейромережевої моделей [17], а також використання нейромереж у задачах підтримки прийняття рішень [18]. Окремі прикладні роботи також розглядають адаптацію процедур у потоках за дрейфу концепції в умовах ресурсних обмежень, зокрема для політик безпеки даних [10]. Разом із тим для сценарію *дрейфу релевантності модальностей* доцільним є підхід, у якому адаптація запускається подієво та обмежується малим бюджетом оновлення, що забезпечує керований компроміс «якість–вартість».

*Формулювання цілей статті.* Метою роботи є опис і обґрунтування подієво-ініційованої бюджетованої мікроадаптації для потокового мультимодального прогнозування у випадку стійкої зміни релевантності модальностей, а також представлення ключових чисельних результатів експериментальної перевірки.

*Формулювання наукового результату.* Удосконалено метод дрейф-ініційованої бюджетованої мікроадаптації мультимодальної моделі прогнозування, у якому подія дрейфу визначається як стійка зміна релевантності модальностей, а оновлення виконується лише для малої адаптивної голови у фіксованому бюджеті зразків/кроків.

*Постановка та позначення.* Розглядається потік спостережень  $\{(\mathbf{x}_t^{(1)}, \mathbf{x}_t^{(2)}, y_t)\}_{t \in \mathbb{N}}$ , де  $\mathbf{x}_t^{(m)}$  – ознаки модальності  $m \in \{1, 2\}$ , а  $y_t$  – цільове значення для однокрокового прогнозування. Нехай базові модальні предиктори формують прогнози  $\hat{y}_t^{(1)}$  та  $\hat{y}_t^{(2)}$ . Мікроадаптація виконується в «голові» злиття, що має малу кількість параметрів:

$$\hat{y}_t = a\hat{y}_t^{(1)} + b\hat{y}_t^{(2)} + c, \quad (1)$$

де  $\theta = (a, b, c)$  – параметри, які допускається оновлювати в онлайн-режимі.

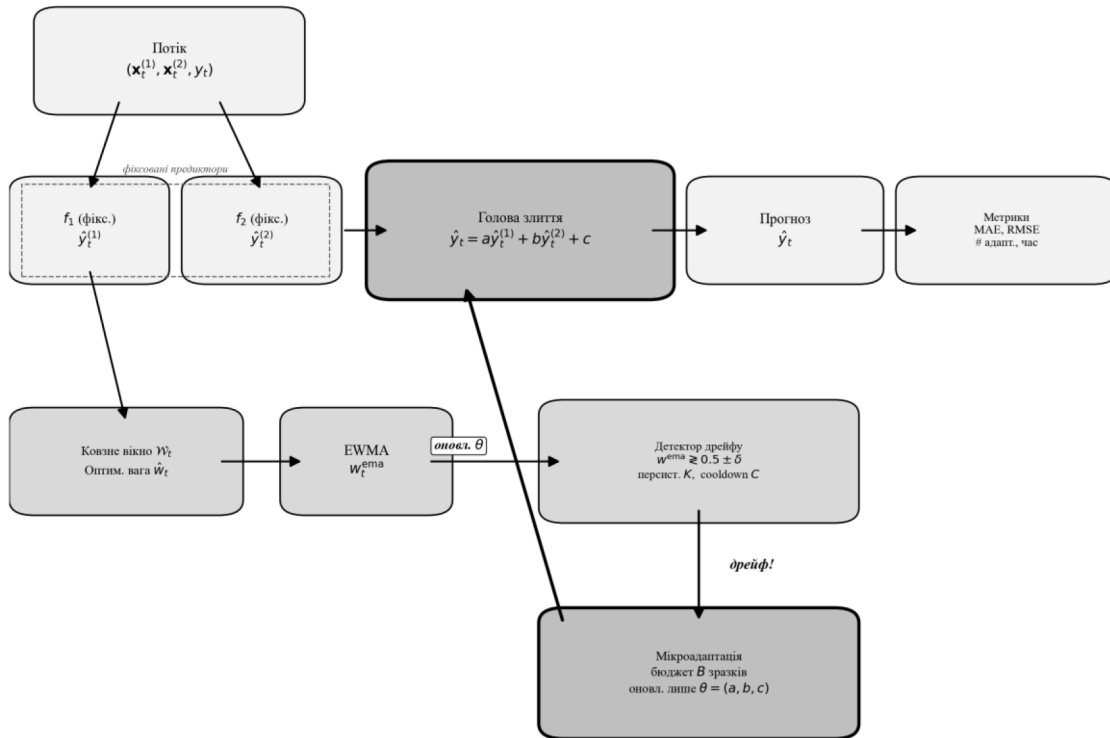
*Подієвий тригер за дрейфу релевантності модальностей.* Дрейф інтерпретується як персистентна зміна відносної релевантності модальностей, тобто як стійка зміна того, яка з модальностей має більший внесок у прогнозування цілі. Діагностика дрейфу виконується через зміну оптимальної ваги злиття на ковзному вікні, а після підтвердженої події дрейфу запускається подієва мікроадаптація. Для керованості частоти запусків у процедурі використовуються бюджети (за кількістю зразків/кроків) та період «охолодження», що зменшує ризик каскадних повторних спрацювань у шумних ділянках.

*Схема методу.* Для подання логіки «сигнал релевантності → подія дрейфу → бюджетоване оновлення  $\theta$ » наведено узагальнену схему (рис. 1).

*Метрики якості.* Якість прогнозування оцінюється метриками MAE та RMSE:

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |y_t - \hat{y}_t|, \quad \text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y}_t)^2}. \quad (2)$$

*Ключовий чисельний результат.* Показано, що дрейф-ініційована бюджетована мікроадаптація суттєво покращує точність у постдрейфових сегментах стосовно відсутності адаптації (MAE = 0,66 ± 0,01 проти 0,70 ± 0,01, RMSE = 0,84 ± 0,01 проти 0,90 ± 0,01) та забезпечує найшвидше середнє відновлення якості після дрейфу (157 кроків проти 242 для періодичної стратегії та 800 без адаптації) за малого бюджету оновлень.



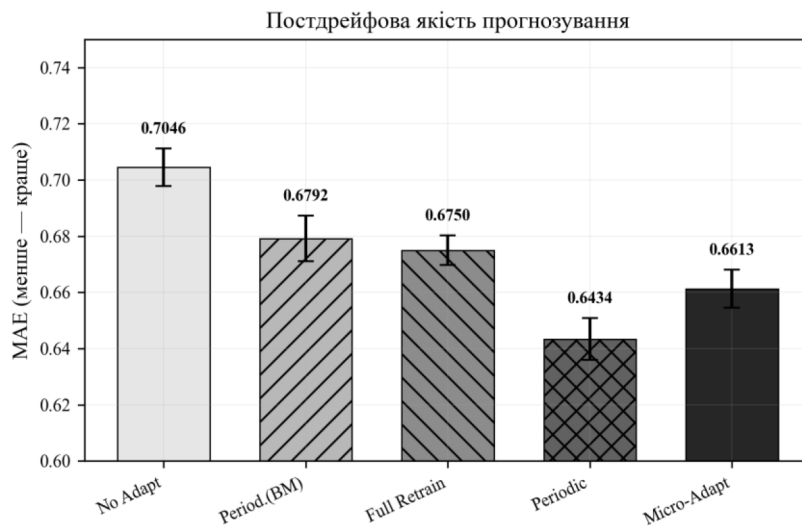
**Рис. 1. Схема подієво-ініційованої бюджетованої мікроадаптації за дрейфу релевантності модальностей**

Таблиця 1

Постдрейфова похибка прогнозування (MAE, RMSE) з подієвою мікроадаптацією та без адаптації (10 сідів,  $\mu \pm \sigma$ )

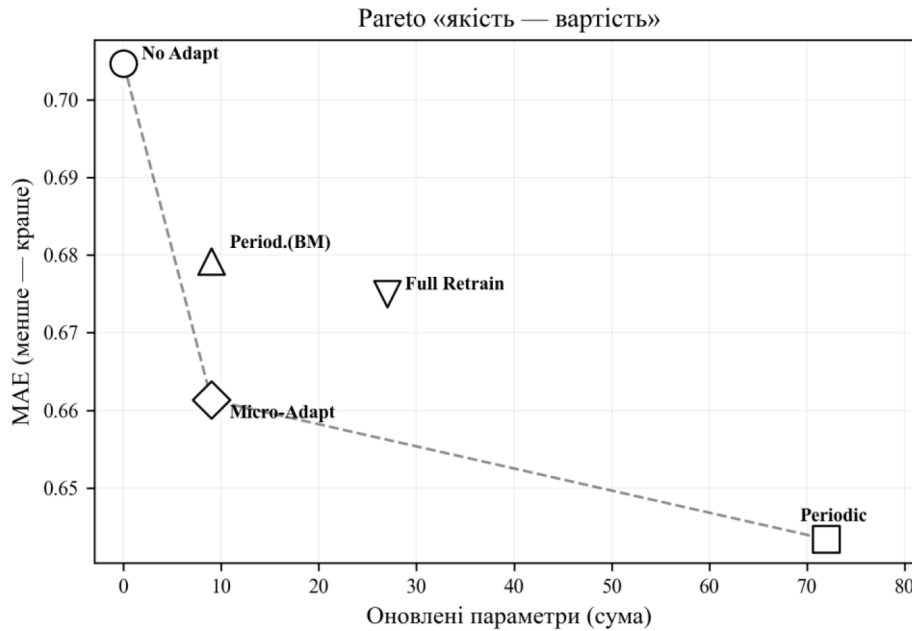
Сценарій (постдрейфові сегменти)	MAE	RMSE
Без адаптації	0,70 ± 0,01	0,90 ± 0,01
Подієва бюджетована мікроадаптація	0,66 ± 0,01	0,84 ± 0,01

Порівняння якості прогнозування за методами. На рис. 2 наведено стовпчикову діаграму MAE ( $\mu \pm \sigma$ ) для п'яти порівнюваних стратегій на постдрейфових сегментах.



**Рис. 2. Постдрейфова якість прогнозування: MAE за методами**

Компроміс «якість–вартість» за бюджетом оновлень. На рис. 3 подано діаграму Парето «якість (MAE) проти вартості (загальна кількість оновлених параметрів)».



**Рис. 3. Парето «якість–вартість»: MAE проти сумарної кількості оновлених параметрів**

Компроміс «якість–вартість» і час відновлення. Оскільки мікроадаптація запускається подієво, практична ефективність визначається не лише рівнем похибки, а й тим, наскільки швидко система повертається до прийнятної якості та який бюджет оновлення потрібен для цього. У проведеному експерименті оновлення виконується лише для малої голови  $\theta = (a, b, c)$  (три параметри), а середній час відновлення якості після дрейфу та вартість оновлень наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Компроміс «якість–вартість»: середній час відновлення після дрейфу та вартість оновлень (10 сидів)

Стратегія	Середнє відновлення, кроки	Сума оновлень	Оновлення (у середньому)
Без адаптації	800	0	0
Періодичне оновлення	242	72	24
Подієва бюджетована мікроадаптація	157	9	3

Динаміка відновлення навколо подій дрейфу. На рис. 4 наведено реальні траєкторії згладженої похибки з позначенням подій дрейфу ( $seed = 42$ ) для трьох стратегій.

Діагностика тригерів. Оскільки адаптація є подієвою, важливо розділяти три аспекти: (i) якість сигналу релевантності (наскільки стабільно він відображає зміну внеску модальностей), (ii) якість правила спрацювання (персистентність, «охолодження», компроміс між пропущеними та хибними подіями), (iii) ефект самого оновлення голови на постдрейфову похибку та швидкість відновлення. На рис. 5 наведено діагностичний таймлайн із сигналом релевантності, моментами спрацювання та траєкторією похибки.

Абляційний аналіз. На рис. 6 подано результати абляційного аналізу компонентів запропонованого методу.

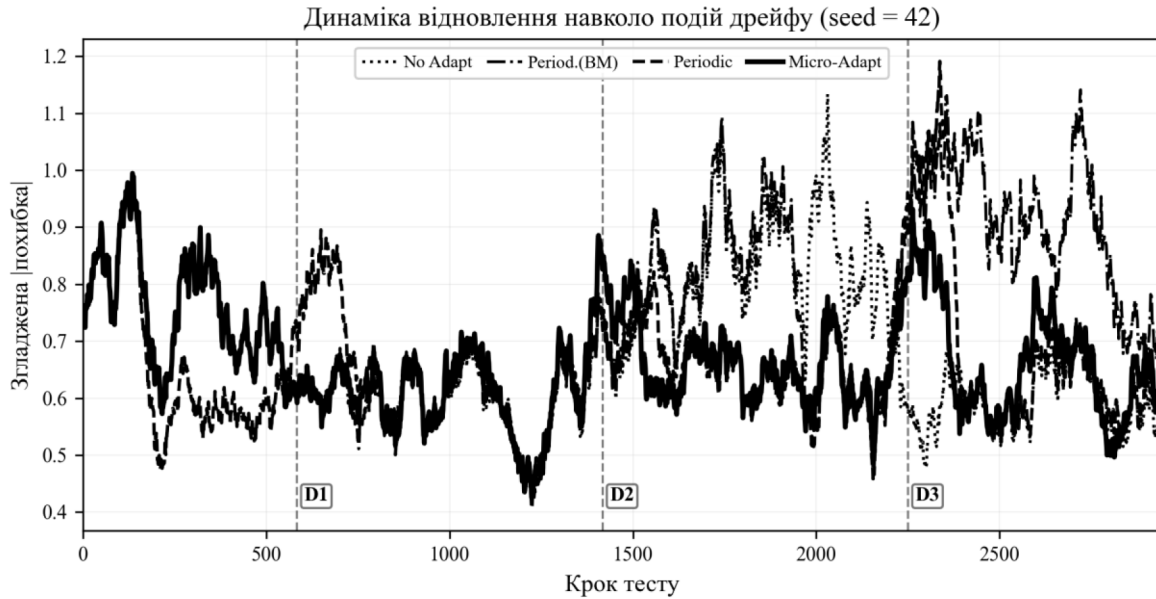


Рис. 4. Динаміка відновлення навколо подій дрейфу (seed = 42)

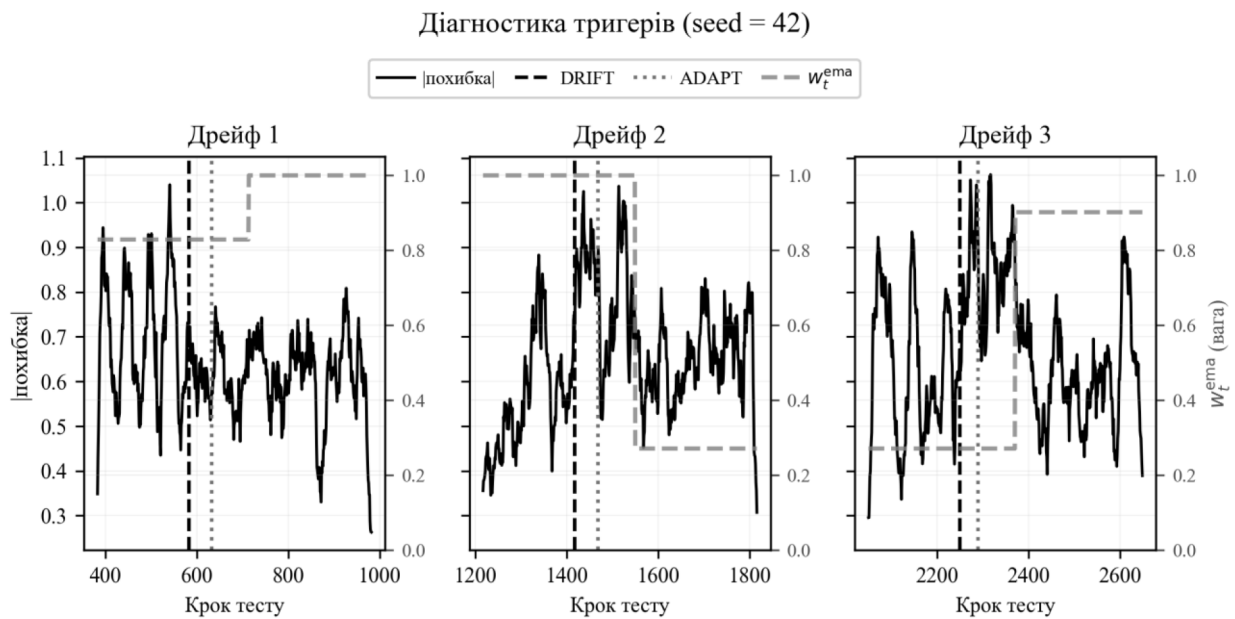
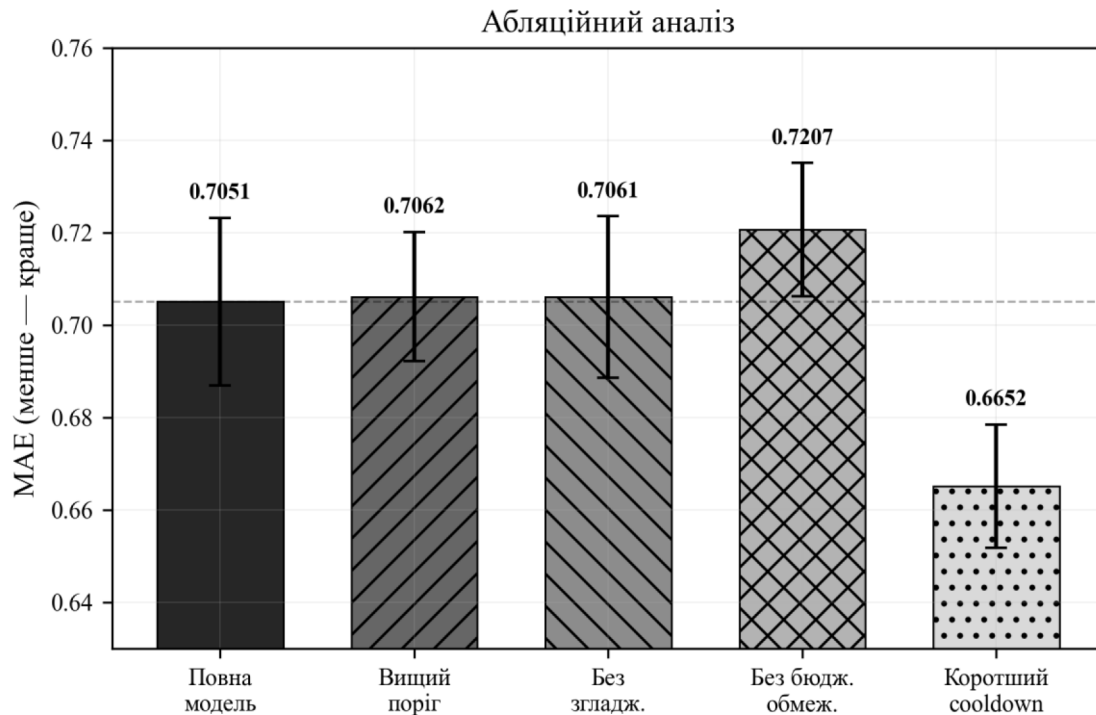


Рис. 5. Діагностика тригерів: сигнал релевантності, події дрейфу/спрацювання та динаміка відновлення якості (seed = 42)

*Обмеження.* Інтерпретація результатів має враховувати такі обмеження. По-перше, подієва мікроадаптація обґрунтована насамперед для дрейфів, що змінюють *відносну релевантність* модальностей; для інших типів дрейфу можуть знадобитися важчі стратегії. По-друге, на практиці доступність фактичного  $y_t$  у потоці та затримка його надходження впливають на можливість оперативного оновлення. По-третє, на рівні детектора можливі компроміси між чутливістю та стабільністю: надто «агресивні» правила можуть збільшувати кількість хибних спрацювань, тоді як надто консервативні – збільшувати затримку реакції. У статті ці аспекти розглядаються як керовані через бюджети та діагностичні журнали подій.

*Висновки.* Розглянуто сценарій дрейфу релевантності модальностей у потоковому мульти-модальному прогнозуванні та подієво-ініційовану бюджетовану мікроадаптацію, що оновлює



**Рис. 6. Абляційний аналіз компонентів мікроадаптації (MAE, 10 сідів)**

лише малу голову злиття з трьома параметрами. Наведено формулювання наукового результату та ключовий чисельний результат експериментальної перевірки, який демонструє покращення постдрейфової якості та швидке відновлення за помірної вартості оновлень. Перспективою подальших досліджень є розширення емпіричної валідації на інші прикладні домени та уточнення діагностики тригерів у довготривалих потоках.

#### Список використаних джерел

1. Gama J., Žliobaitė I., Bifet A., Pechenizkiy M., Bouchachia A. A Survey on Concept Drift Adaptation. *ACM Computing Surveys*. 2014. Vol. 46(4). Article 44. DOI: <https://doi.org/10.1145/2523813>
2. Lu J., Liu A., Dong F., Gu F., Gama J., Zhang G. Learning under concept drift: a review. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*. 2019. Vol. 31(12). P. 2346–2363. DOI: <https://doi.org/10.1109/TKDE.2018.2876857>
3. Lahat D., Adali T., Jutten C. Multimodal Data Fusion: An Overview of Methods, Challenges, and Prospects. *Proceedings of the IEEE*. 2015. Vol. 103(9). P. 1449–1477. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2015.2460697>
4. Baltrušaitis T., Ahuja C., Morency L.-P. Multimodal Machine Learning: A Survey and Taxonomy. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2019. Vol. 41(2). P. 423–443. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2018.2798607>
5. Hyndman R. J., Khandakar Y. Automatic Time Series Forecasting: The *forecast* Package for R. *Journal of Statistical Software*. 2008. Vol. 27(3). DOI: <https://doi.org/10.18637/jss.v027.i03>. URL: <https://www.jstatsoft.org/article/view/v027i03>
6. Boyko N., Kovalchuk R. Data Update Algorithms in the Machine Learning System. *Computer Systems and Information Technologies*. 2023. No. 1. P. 6–13. DOI: <https://doi.org/10.31891/csit-2023-1-1>
7. Kholiavka Y., Parfenenko Y. Forecasting Peak Load on the Power Grid. *Computer Systems and Information Technologies*. 2023. No. 3. P. 12–22. DOI: <https://doi.org/10.31891/csit-2023-3-2>
8. Hovorushchenko T., Alekseiko V., Shvaiko V., Ilchyshyna J., Kuzmin A. Information System for Earth's Surface Temperature Forecasting Using Machine Learning Technologies. *Computer Systems and Information Technologies*. 2024. No. 4. P. 51–58. DOI: <https://doi.org/10.31891/csit-2024-4-7>



9. Pastukh O., Petrov Y. Efficiency Analysis of Financial Time Series Forecasting Models under Market Turbulence Conditions. *Computer Systems and Information Technologies*. 2025. No. 3. P. 128–134. DOI: <https://doi.org/10.31891/csit-2025-3-13>
10. Vizhevskiy P., Savenko O. Evolutionary Adaptation of DLP Policies under Concept Drift in Streaming Data. *Збірник наукових праць*. 2025. Issue 12(43), Part II. P. 9–19. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.9-19](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.9-19)
11. Bifet A., Gavaldà R. Learning from Time-Changing Data with Adaptive Windowing. *Proceedings of the 2007 SIAM International Conference on Data Mining*. 2007. P. 443–448. DOI: <https://doi.org/10.1137/1.9781611972771.42>
12. Gomes H. M., Bifet A., Read J., Barddal J.P., Enembreck F., Pfahringer B., Holmes G., Abdesslem T. Adaptive Random Forests for Evolving Data Stream Classification. *Machine Learning*. 2017. Vol. 106. P. 1469–1495. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10994-017-5642-8>
13. Kolter J. Z., Maloof M. A. Dynamic Weighted Majority: An Ensemble Method for Drifting Concepts. *Journal of Machine Learning Research*. 2007. Vol. 8. P. 2755–2790. URL: <https://jmlr.org/papers/v8/kolter07a.html>
14. Makridakis S., Spiliotis E., Assimakopoulos V. The M4 Competition: Results, Findings, Conclusion and Way Forward. *International Journal of Forecasting*. 2018. Vol. 34(4). P. 802–808. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2018.06.001>
15. Mochurad L., Ilkiv A., Kravchenko O. A New Information System for Road Surface Condition Classification Using Machine Learning Methods and Parallel Calculation. *Computer Systems and Information Technologies*. 2023. No. 1. P. 53–61. DOI: <https://doi.org/10.31891/csit-2023-1-7>
16. Pryimak V., Bartkiv B., Holubnyk O. Forecasting the Exchange Rate of the Ukrainian Hryvnia Using Machine Learning Methods. *Computer Systems and Information Technologies*. 2023. No. 1. P. 75–83. DOI: <https://doi.org/10.31891/csit-2023-1-10>
17. Krukovets D. Exploring an LSTM–SARIMA Routine for Core Inflation Forecasting. *Technology Audit and Production Reserves*. 2024. Vol. 2. No. 2(76). P. 6–12. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.301209>
18. Savchuk O. V., Ladanyuk A. P. Research of Possibilities of Using Neural Networks in the Decision Support System. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. Vol. 4. No. 4(76). P. 15–19. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.47692>

Дата першого надходження статті до видання: 23.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 14.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026

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



**I. Uzun, M. Lobachev**

*National University Odesa Polytechnic*

## **BUDGETED DRIFT-INITIATED MICRO-ADAPTATION FOR STREAMING TIME-SERIES FORECASTING UNDER MODALITY-RELEVANCE CHANGES**

### *Summary*

Streaming multimodal time-series forecasting for decision support must operate causally under tight latency and update budgets, while the relative usefulness of modalities can change over time. This work considers modality-relevance drift as a persistent change in which modality contributes more to the target, and applies an event-triggered budgeted micro-adaptation mechanism that updates only a small fusion head  $\theta = (a, b, c)$ . A relevance signal is estimated on a sliding window and smoothed to suppress noise; a drift event is confirmed via a persistence rule and a cooldown period to avoid cascaded triggers. When a drift event is confirmed, a short online update is executed using a fixed step/sample budget, and the system logs adaptation events and costs (number of updates and updated parameters) to make the quality–cost trade-off auditable. The approach is evaluated in a controlled streaming setup with two modalities and repeated runs (10 seeds). In post-drift segments, micro-adaptation improves accuracy to



MAE =  $0.66 \pm 0.01$  versus  $0.70 \pm 0.01$  without adaptation, and RMSE =  $0.84 \pm 0.01$  versus  $0.90 \pm 0.01$ . The mean recovery time after drift is 157 steps, compared with 242 for periodic updating and 800 without adaptation. The update budget remains small: on average 3 micro-updates are executed, corresponding to 9 updated parameters in total, whereas periodic updating requires 24 updates (72 parameters). Diagnostic timelines and a Pareto view of MAE versus total updated parameters summarize the trigger behavior and the controllable trade-off between accuracy and update cost. An ablation study quantifies the contribution of the trigger components and budgeted updating to MAE across methods, supporting robust tuning decisions. Overall, event-triggered micro-adaptation provides a resource-efficient way to maintain streaming forecasting quality under modality-relevance changes.

**Keywords:** machine learning, data analysis, information systems, decision support systems, multimodal time series, concept drift, modality relevance, event-triggered adaptation, budgeted updating, online forecasting.



---

**МАШИНОБУДУВАННЯ (ЗА СПЕЦІАЛІЗАЦІЯМИ)**

---

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-9>

УДК 621.6

С. С. Антоненко<sup>1</sup>, канд. техн. наук

ORCID: 0009-0002-7490-2691

Е. В. Колісніченко<sup>1</sup>, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-6259-4049

В. Ю. Кондусь<sup>1</sup>, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-3116-7455

О. В. Ратушний<sup>1</sup>, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-3525-0953

О. С. Ковязін<sup>2</sup>, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-3027-872X

<sup>1</sup> Сумський державний університет<sup>2</sup> Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: ed.kolisnichenko@pgm.sumdu.edu.ua

**ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ НАСОСА З ВІДЦЕНТРОВО-ВИХРОВИМ  
СТУПЕНЕМ ПОРІВНЯНО З НАСОСОМ ТИПУ ЕВН**

*Анотація.* Розвиток галузі насособудування супроводжується пошуком шляхів удосконалення технологій, методів проектування й виготовлення насосного обладнання з метою підвищення його ефективності. Сучасні вимоги до насосних систем диктують необхідність створення агрегатів, здатних стабільно працювати в широкому діапазоні подач і напорів, адаптуючись до змінних умов експлуатації та властивостей перекачуваного середовища. Особливу складність становить транспортування високов'язких рідин, що потребує нових конструктивних рішень.

У роботі проведено експериментальні дослідження гідравлічних характеристик насоса з відцентрово-вихровим ступенем при різних частотах обертання робочого органу. На основі отриманих даних побудовано робочі характеристики, здійснено порівняльний аналіз енергоефективності й проведено зіставлення з електровідцентровими насосами (далі – ЕВН). Визначено оптимальні режими функціонування й окреслено перспективні ділянки застосування насосів із відцентрово-вихровими (далі – ВВ) ступенями для роботи з високов'язкими середовищами.

*Ключові слова:* насос, робоче колесо, ступінь, подача, напір, потужність, ККД, енергоефективність.

*Постановка проблеми.* У складі сучасних гідравлічних систем для транспортування високов'язких середовищ переважно застосовується насосне обладнання, що функціонує на основі гідродинамічного принципу дії [1–4]. Згідно з класифікацією лопатевих насосів, ефективна робота їх проточної частини визначається коефіцієнтом швидкохідності ( $n_s$ ), який зазвичай знаходиться в межах  $35 \leq n_s \leq 1200$ . Зона низьких значень  $n_s$  характерна для насосів об'ємного типу – поршневих, гвинтових тощо [5].

Незважаючи на здатність об'ємних насосів працювати з високов'язкими рідинами, їхня висока вартість, обмежена надійність, особливо при роботі з гідросумішами, часто не відповідають вимогам експлуатаційних організацій. Лопатеві насоси, навпаки, демонструють кращу адаптацію до перекачування багатofазних середовищ, не маючи притаманних об'ємним насосам недоліків [6].

У реальних умовах рідини, що перекачуються, рідко є гомогенними: вони часто містять тверді частинки, газові включення або їх комбінацію, що формує дво- або трифазні середовища. При роботі традиційних відцентрових насосів з такими гідросумішами виникає ризик перекриття, забивання прохідних каналів проточної частини, що спричиняє зрив робочих параметрів і, як наслідок, економічні втрати.

Для надійної роботи насосних систем у середовищі багатофазних потоків необхідно використовувати спеціалізовані лопатеві агрегати, які стійко функціонують навіть за умов зміни складу перекачуваної рідини. Такі машини повинні бути малочутливими до наявності газових бульбашок, дрібних твердих включень чи коливань фізико-хімічних властивостей середовища. Саме відцентрово-вихрові насоси відповідають цим вимогам, конструкція яких поєднує переваги відцентрових і вихрових ступенів.

*Аналіз останніх досліджень.* Відцентрово-вихрові насоси [6–10] широко застосовуються у водопостачанні, харчовій і нафтовій промисловості завдяки поєднанню переваг відцентрових і вихрових машин. Їхня конструкція включає два ступені – відцентровий і вихровий, що забезпечує високий напір, значну висоту всмоктування та здатність до самовсмоктування. Такі агрегати можуть працювати без попереднього заповнення всмоктувального трубопроводу й установлюватися вище за рівень рідини. При цьому вихрове колесо виконує функцію високонапірного ступеня, а відцентрове забезпечує безкавітаційну роботу системи. Попри це, указані насоси мають певні недоліки: знижену експлуатаційну надійність через несиметричний розподіл тиску, що викликає прогин валу та перекіс колеса; значні габарити й підвищену металомісткість через суміжне розташування коліс; а також великі осьові сили, спричинені зовнішніми вихровими каналами, які створюють додаткове навантаження та призводять до швидкого зношування підпірних шайб.

*Формулювання мети статті (постановка завдання).* Мета статті полягає в дослідженні гідравлічних характеристик насоса з відцентрово-вихровим ступенем при різних частотах обертання робочого колеса (далі – РК), визначенні оптимальних режимів його функціонування й оцінці енергоефективності порівняно з насосами типу ЕВН. Робота спрямована на обґрунтування перспективних напрямів застосування таких насосів для транспортування високов'язких рідин і пошук конструктивних рішень, що забезпечують стабільну роботу агрегатів у змінних умовах експлуатації.

*Основна частина.* Позбавитися недоліків традиційних відцентрово-вихрових насосів вдається використанням комбінованого ВВ ступеня (рис. 1), який поєднує переваги традиційних конструкцій, водночас усуваючи їхні основні недоліки – масогабаритні показники, значні осьові навантаження та недостатню експлуатаційну надійність.

Характерною особливістю цього ступеня є наявність додаткових вихрових каналів, розміщених на протилежному боці від основних проточних каналів РК, виконаних на передньому

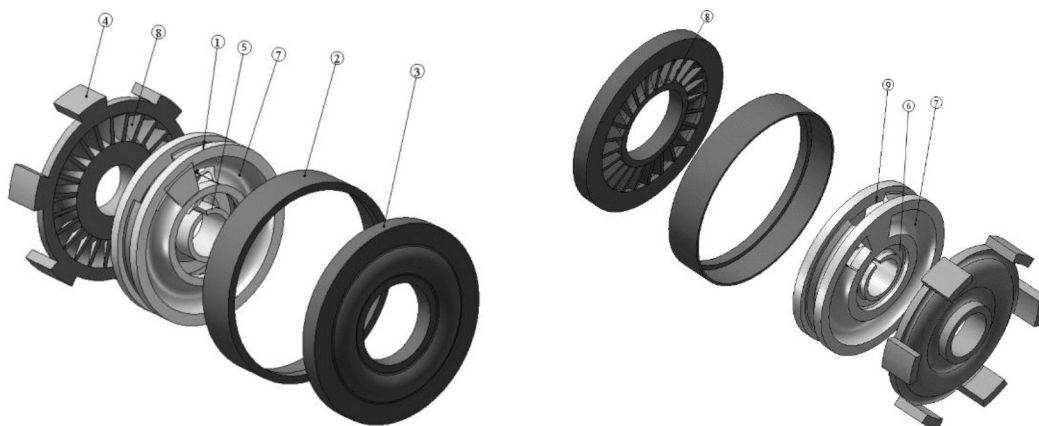


Рис. 1. Елементи ВВ ступеня:

1 – РК; 2 – корпус РК; 3 – передній вихровий диск; 4 – задній вихровий диск; 5 – всмоктувальна частина РК; 6 – лопать РК; 7 – кільцеві канали; 8 – лопатки вихрових дисків; 9 – перевідний радіальний канал

й задньому дисках. Кожен вихровий канал являє собою заглиблення з увігнутим дном, сформоване по дугоподібній траєкторії, яка на стороні, що контактує з потоком, переходить у прямолінійну площину. РК має однолопатеву конструкцію та поєднує в собі кільцеві й радіальні канали.

За конструктивними ознаками цей ступінь належить до малогабаритних робочих елементів динамічних насосів.

Експериментальні дослідження виконувалися при частотах обертання 1000, 2000 та 3000 об/хв.

Для оцінки енергетичних характеристик насоса з ВВ ступенем використовувалися безрозмірні коефіцієнти напору ( $\psi$ ), витрати ( $\varphi$ ), потужності ( $\mu$ ) та ККД ( $\eta$ ) [6]:

$$\psi = \frac{2gH}{U_2^2}; \quad (1)$$

$$\varphi = \frac{4Q}{\pi D_2^2 U_2}; \quad (2)$$

$$\mu = \frac{8N}{\rho \pi D_2^2 U_2^3 \eta}, \quad (3)$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;

$H$  – напір насоса, м;

$U_2$  – колова швидкість на виході з робочого колеса, м/с;

$Q$  – витрата насоса,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$D_2$  – зовнішній діаметр робочого колеса, м;

$N$  – потужність насоса, Вт;

$\rho$  – густина рідини, що перекачується,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Енергетичні показники досліджуваного насоса з частотою обертання  $n=3000$  об/хв представлено на рис. 2.

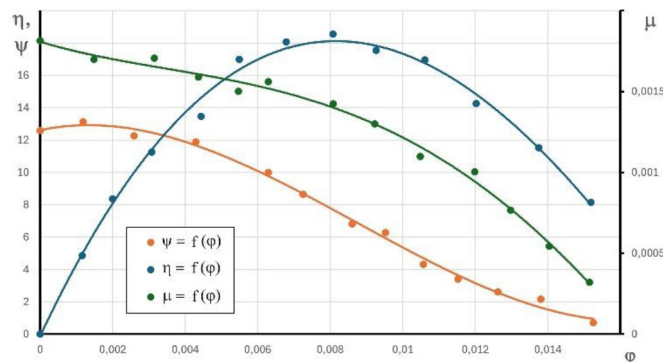


Рис. 2. Енергетичні показники досліджуваного насоса з частотою обертання  $n = 3000$  об/хв

Первинний аналіз отриманих експериментальних характеристик, представлених у графічному вигляді залежностей  $\psi = f(\varphi)$ ;  $\eta = f(\varphi)$ ;  $\mu = f(\varphi)$ , засвідчив стрімке падіння напору та споживаної потужності зі збільшенням витрати. Як видно з рис. 2, ВВ ступінь забезпечує досить високий напір при досить невеликій витраті, що перекачується. Однак при цьому демонструє досить низьке значення коефіцієнта корисної дії (далі – ККД).

На оптимальному режимі роботи ККД не перевищує 18 %. Основними причинами такої низької енергоефективності є:

- значні об'ємні втрати, зумовлені торцевими зазорами, які мають суттєвий вплив порівняно з витратою;

- гідравлічні втрати, що виникають через відсутність елементів, які переводять потік з осьового напрямку в радіальний;
- додаткові втрати в зоні вихрових каналів передньої та задньої частин ступеня.

На основі досліджень визначено безрозмірні енергетичні показники досліджуваного насоса в оптимальному режимі роботи (таблиця 1), а також побудовано порівняльні енергетичні характеристики для частот обертання 1000, 2000 та 3000 об/хв (рисунки 3–5).

Таблиця 1

Порівняльні енергетичні показники насоса з ВВ ступенем в оптимальному режимі роботи

$n$ , об/хв	$\Psi_0$	$\Phi_0$	$\mu_0$	$\eta_0$
1000	1,95	0,0075	0,00012	0,12
2000	3,1	0,0081	0,00048	0,14
3000	5,86	0,0086	0,00119	0,18

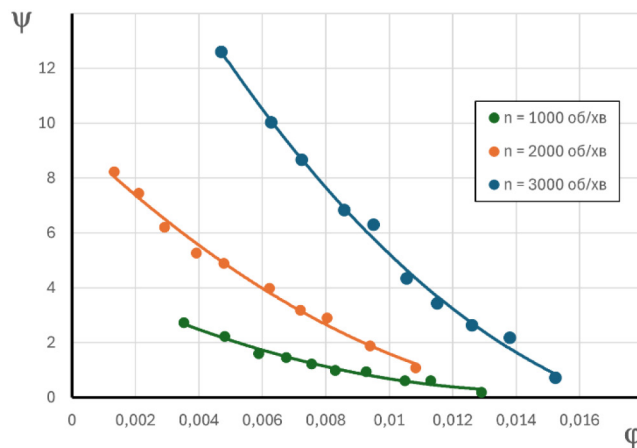


Рис. 3. Аналіз напірних показників насоса з ВВ ступенем на різних частотах обертання

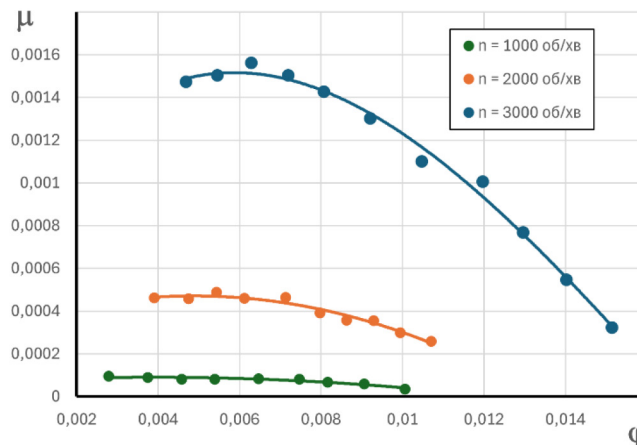
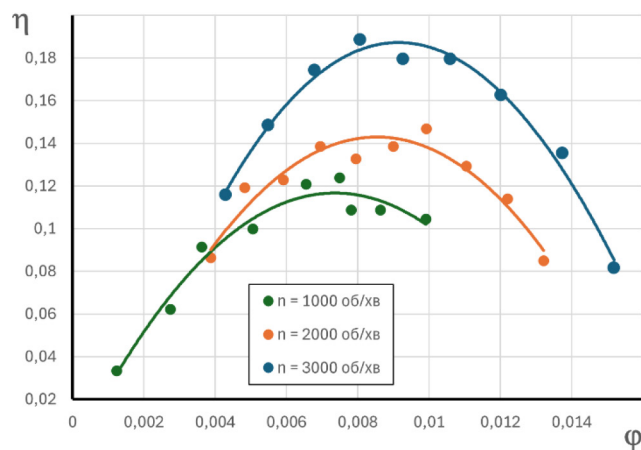


Рис. 4. Аналіз показників потужності насоса з ВВ ступенем на різних частотах обертання

Аналіз порівняльних показників напору, споживаної потужності й ККД (рис. 3–5) свідчить, що всі криві розташовані компактно та мають схожий характер. Найкращі показники спостерігаються при частоті обертання  $n = 3000$  об/хв, що значно перевищує результати, отримані при  $n = 1000$  об/хв та  $n = 2000$  об/хв. Це зумовлено покращенням обтікання проточної частини насоса зі збільшенням частоти обертання, що, своєю чергою, сприяє зменшенню гідравлічних втрат і підвищенню загальної енергоефективності агрегату.



**Рис. 5. Аналіз показників ККД насоса з ВВ ступенем на різних частотах обертання**

Графічні залежності, представлені на рис. 3–5, демонструють чітку закономірність: зі збільшенням частоти обертання спостерігається зростання основних робочих параметрів насоса. Це підтверджує позитивний вплив частоти обертання на гідравлічні й енергетичні характеристики агрегату.

Отримані результати підтверджують, що підвищення частоти обертання сприяє покращенню обтікання проточної частини, зменшенню гідравлічних втрат і, відповідно, зростанню енергоефективності насосного обладнання.

Для оцінки енергоефективності роботи насосного обладнання також проведено порівняльний аналіз гідравлічних характеристик двох типів насосів, однакових за зовнішнім діаметром робочого колеса: з ВВ ступенем і зі ступенем типу ЕВН [11–13]. Основна увага приділялася таким параметрам, як подача, напір, споживана потужність і ККД в умовах перекачування водяного середовища.

Порівняльні характеристики насоса з ВВ ступенем та ЕВ ступенем на оптимальному режимі при частоті обертання 3000 об/хв представлено в таблиці 2.

Таблиця 2

Порівняльні характеристики насоса з ВВ ступенем та ЕВ ступенем на оптимальному режимі

Вид насосу	$\psi_0$	$\varphi_0$	$m_0$	$\eta_0$
3 ВВ ступенем	5,86	0,0086	0,00119	0,18
3 ЕВ ступенем	1,6	0,022	0,0075	0,4

Порівняльні енергетичні характеристики насоса з ВВ ступенем і ступенем типу ЕВН (ЕВ), при перекачуванні чистої води при частоті обертання 3000 об/хв, наведено на рис. 6–8.

Порівняльні характеристики (рис. 6–8) дають змогу оцінити переваги й обмеження кожного типу насосного обладнання залежно від умов експлуатації.

Так насос із ВВ ступенем продемонстрував стабільну роботу при низьких витратах, забезпечуючи високий напір, що є перевагою в умовах обмеженого об'єму перекачуваної рідини. Водночас стрімке падіння напору на досить вузькому діапазоні витрат свідчить про значну обмеженість використання таких насосів. Крім того, його енергоефективність залишається на досить низькому рівні, що пояснюється конструктивними особливостями, зокрема наявністю торцевих зазорів, відсутністю перевідного апарату й утратами у вихрових каналах.

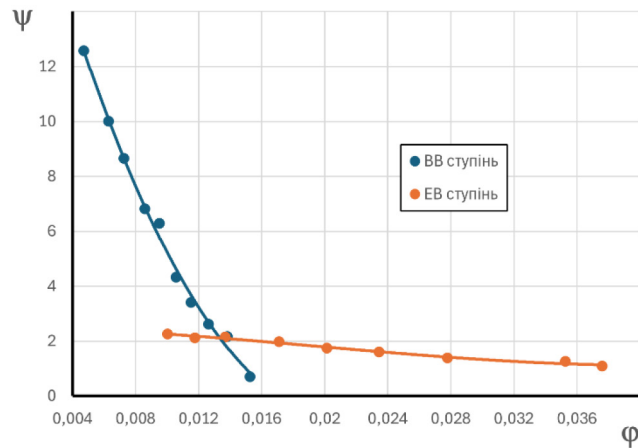


Рис. 6. Порівняльна напірна характеристика насоса з ВВ ступенем і насоса типу ЕВН

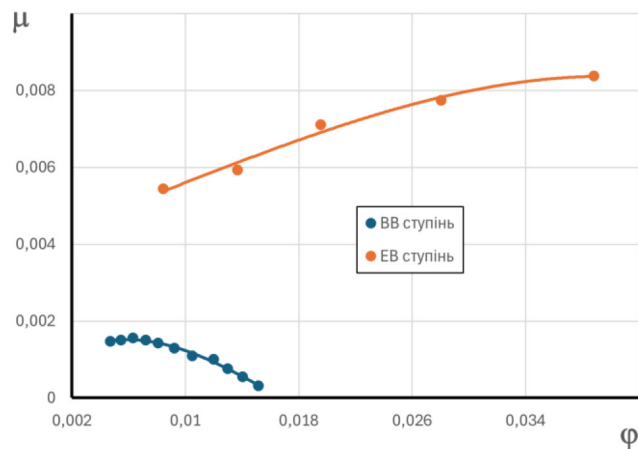


Рис. 7. Порівняльна характеристика потужностей насоса з ВВ ступенем і насоса типу ЕВН

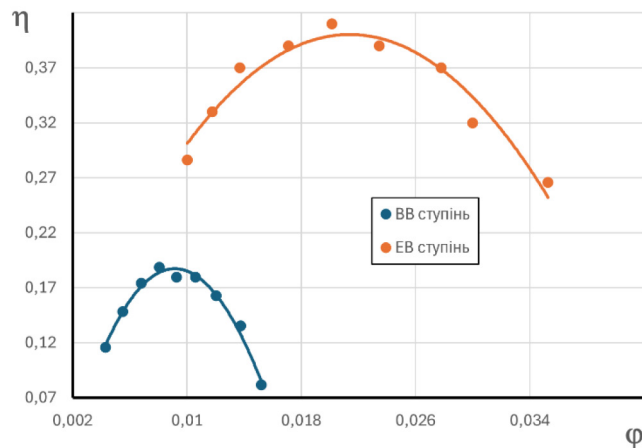


Рис. 8. Порівняльна характеристика ККД насоса з ВВ ступенем і насоса типу ЕВН

Насоси типу ЕВН, навпаки, характеризуються вищим ККД у широкому діапазоні витрат. Більш пологий характер напірної характеристики в широкому діапазоні витрат робить їх більш придатними для систем зі змінними режимами роботи. Вони демонструють кращу енергетичну ефективність, але можуть поступатися у створенні напору при невеликих витратах.

Отримані результати свідчать про доцільність вибору типу насоса залежно від специфіки технологічного процесу: для малих витрат і високого напору – ВВ ступінь; для стабільної роботи з високим ККД – ЕВ ступінь.



**Висновки.** На основі експериментального дослідження й порівняльного аналізу насосів із ВВ ступенем та ЕВ ступенями можна сформулювати такі висновки:

– насос із ВВ ступенем забезпечує високий напір при малих витратах, що робить його ефективним для застосування в умовах обмеженого об'єму середовища, що перекачується. Однак його ККД залишається низьким через значні об'ємні й гідравлічні втрати, що впливають через конструктивні особливості досліджуваного ступеня. Але треба зазначити, що для систем, де пріоритетом є високий напір при низькій витраті, доцільним убачається використання саме насосів з ВВ ступенем;

– насоси типу ЕВН демонструють вищу енергоефективність у широкому діапазоні витрат, що робить їх більш універсальними для промислових і сільськогосподарських систем з варіативними режимами роботи. Тому у випадках, коли важливо забезпечити стабільну роботу з високим ККД при змінних витратах, рекомендовано застосовувати насосне обладнання з ЕВ ступенями;

– зростання частоти обертання позитивно впливає на гідравлічні характеристики обох типів насосів, зменшуючи втрати й підвищуючи ККД;

– при проектуванні насосних систем варто враховувати не лише гідравлічні параметри, а й особливості перекачуваного середовища (в'язкість, фазовий склад), що суттєво впливають на вибір оптимального типу насоса.

#### Список використаних джерел

1. Khairul Anuar N. H., Mhd Razali M. N., Mohamad Yasin M. R. M. Abdul Hadi, Abd A. N. Ghaffar, "Study on custom centrifugal pump performance in supplying food based high viscos liquid". *JMMST*. 2021. Vol. 5, № 1. P. 80–88. DOI: 10.15282/jmmst.v5i1.6280
2. Yousefi H., Noorollahi Y., Tahani M., Fahimi R., Saremi S. Numerical simulation for obtaining optimal impeller's blade parameters of a centrifugal pump for high-viscosity fluid pumping. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2019. № 34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.04.011>
3. Mohammedali A. A. M., Omara A. A. M., Mohamed R. H. A., Mohamed H. G. H., Mohamed D. A. A. Performance Assessment of a Centrifugal Pump With Varying Blade Counts and Fluid Viscosities Through Euler Head and Entropy Production Analysis. *Engineering Reports*. 2025. № 7(4). DOI: <https://doi.org/10.1002/eng2.70105>
4. Siddique M. H., Samad A., Husain A. Combined effects of viscosity and surface roughness on electric submersible pump performance. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A. Journal of Power and Energy*. 2017. № 231(4). DOI: <https://doi.org/10.1177/0957650917702262>
5. Омельченко О. В., Цвіркун Л. О. Гідравлічні машини : навч. посіб. Кривий Ріг : ДонНУЕТ, 2020. 100 с.
6. Chang L., Xu Q., Yang C., Su X., Dai X., Guo L. Experimental Study on Gas-Liquid Performance and Prediction of Shaft Power and Efficiency by Dimensionless Coefficients in a Multistage Electrical Submersible Pump. *Journal of Fluids Engineering*. 2023. № 145(7). DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4062087>
7. Сидоренко О. В., Жуковський М. Є. Обладнання для зберігання та транспортування ПММ : навч. посіб. Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», 2019. 212 с.
8. Насоси та компресори : підручник для студентів інженерних спеціальностей. Харків, 2017. 400 с.
9. Mihalić T., Guzović Z., Predin A. Performances and flow analysis in the centrifugal vortex pump. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*. 2013. № 135(1). DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4023198>
10. Yang W., Zhang R., Yang H., Chen X. Energy Conversion Characteristics of Flow in Vortex Pump Based on Vortex Analysis. *Nongye Jixie Xuebao/Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*. 2024. № 55(5). DOI: <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2024.05.015>
11. Antonenko S., Pavlenko I., Kondus V., Kolisnichenko E., Ratushnyi O. A. Refined Technique for Predicting the Energy Efficiency of Small High-Speed Submersible Centrifugal Oil Pumps. *Energies*. 2025. № 18(23). DOI: <https://doi.org/10.3390/en18236175>
12. Kondus V., Andrusiak V., Sotnyk M., Ratushnyi O., Antonenko S. Economic Justification of High-Rotational Submersible Pumps Development for Water Supply Facilities. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2025. C. 26–41 DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_3)



13. Pavlenko I., Ciszak O., Kondus V., Ratushnyi O., Ivchenko O., Kolisnichenko E., Kulikov O., Ivanov V. An Increase in the Energy Efficiency of a New Design of Pumps for Nuclear Power Plants. *Energies*. № 16(6). DOI: <https://doi.org/10.3390/en16062929>
14. Zhang Y., Yang Z., Tong L., Zhao Y., Jia X. et al. Experiments on the Start-Up and Shutdown of a Centrifugal Pump and Performance Prediction. *Fluid Dynamics & Materials Processing*. 2025. № 21(4). P. 891–938. DOI: <https://doi.org/10.32604/fdmp.2024.059903>
15. Jiang L., Wang W., Shi Y., Chen J., Bai L., Zhou L. Vortex dynamics analysis of an energy loss mechanism in a centrifugal pump impeller. *Physics of Fluids*. 2025. № 37(2). DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0252325>
16. Khalaf H. A., Abd W. N., Tazyukov F. K. The effect of rotational speed on the performance of the electric submersible pump. *Al-Qadisiyah Journal for Engineering Sciences*, 2021. № 14(1). DOI: <https://doi.org/10.30772/qjes.v14i1.743>
17. Zhou L., Zhou C., Bai L., Agarwal R. Numerical and Experimental Analysis of Vortex Pump with Various Axial Clearances. *Water (Switzerland)*. 2024. № 16(11). DOI: <https://doi.org/10.3390/w16111602>

Дата першого надходження статті до видання: 29.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 29.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026

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



**S. Antonenko<sup>1</sup>, E. Kolisnichenko<sup>1</sup>, V. Kondus<sup>1</sup>, O. Ratushnyi<sup>1</sup>, O. Koviazin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Sumy State University

<sup>2</sup> Dmytro Motornyi Tavria State Agrrotechnological University

## PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF A PUMP WITH A CENTRIFUGAL-VORTEX STAGE IN COMPARISON WITH AN ELECTRIC CENTRIFUGAL PUMP

### Summary

The development of the pump industry was accompanied by a search for ways to improve technologies, design methods and equipment manufacturing. The purpose of these processes is to increase the efficiency of the units, reduce energy consumption and ensure stable operation under variable loads. Modern requirements dictate the creation of universal installations capable of operating in a wide range of flows and pressures, adapting to the characteristics of the pumped medium. This is important for industrial enterprises, where the reliability of the equipment determines the efficiency of technological processes.

The problem of transporting highly viscous liquids, which create additional hydraulic resistance and reduce productivity, remains relevant. Its solution requires special design solutions. Progress in mechanical engineering and the development of related technologies contribute to the emergence of new approaches to pump design, which ensure the efficiency of work with highly viscous and heterogeneous media. It is important to take into account changes in the composition and physicochemical characteristics of liquids, as they significantly affect the parameters of the systems and form new requirements for pumps, in particular regarding materials and operating modes.

The paper presents the results of an experimental study of the hydraulic characteristics of a pump with a centrifugal-vortex stage at different speeds of rotation of the working body. The operating characteristics were constructed, a comparative analysis of energy efficiency depending on the speed was carried out and a comparison was made with electric centrifugal pumps. The optimal operating modes were determined, ensuring maximum productivity at minimal energy costs, and promising areas of application of pumps with centrifugal-vortex stages in industrial processes related to pumping complex media were outlined.

**Keywords:** Pump, impeller, stage, flow, pressure, power, efficiency, energy efficiency.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-10>

УДК 664.36:621.926

В. В. Дідур<sup>1</sup>, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0001-7584-5073

Д. П. Журавель<sup>2</sup>, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-6100-895X

Я. В. Білоконь<sup>3</sup>, аспірант

ORCID: 0009-0003-4510-2780

<sup>1</sup> Уманський національний університет<sup>2</sup> Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного<sup>3</sup> Полтавський державний аграрний університет

e-mail: didur.vv@gmail.com

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРЕСУВАННЯ НАСІННЯ РИЦИНИ В ШНЕКОВИХ ПРЕСАХ

*Анотація.* У статті запропоновано математичну модель процесу відтиску олії в шнековому пресі, побудовану на основі методів розмірного аналізу. Адекватність розробленої моделі підтверджено експериментальними результатами, отриманими під час пресування насіння рицини в шнековому пресі з використанням методів регресійного аналізу. Запропонована модель дає змогу описати витрату отриманої олії з урахуванням таких основних параметрів: швидкості подачі матеріалу, вологості сировини, ступеня лущення, температури в пресувальній камері, частоти обертання шнека, діаметра сопла для вивантаження макухи й тиску в зоні пресування.

*Ключові слова:* рослинна олія, насіння рицини, шнековий прес, швидкість подачі, математична модель, регресійний аналіз.

*Постановка проблеми.* Олійна промисловість належить до ключових галузей світової економіки, оскільки рослинні олії широко використовуються в харчовій, хімічній, фармацевтичній та інших сферах. У зв'язку з цим процес одержання рослинної олії з насіння олійної сировини має важливе промислове значення. Серед основних способів вилучення олії найбільш поширеними є механічне пресування й екстракція із застосуванням розчинників, при цьому механічний метод вирізняється низкою суттєвих переваг. Це зумовило привернути увагу дослідників до процесу пресування, зокрема до аналізу чинників, які визначають його ефективність, що оцінюється, серед іншого, виходом олії з олійної сировини. Вітчизняна промисловість спеціалізується на виробництві як харчових, так і технічних олій [1]. Приблизно дві третини загального обсягу становлять харчові олії, які безпосередньо споживаються або використовуються у виготовленні маргарину, майонезу, хлібобулочних і кондитерських виробів, кулінарних жирів, консервованої продукції тощо. Інша третина припадає на технічні олії, що знаходять застосування у виробництві мийних засобів, лакофарбових матеріалів, гліцерину, жирних кислот, фармацевтичних і косметичних засобів.

*Аналіз останніх досліджень.* Основною сировинною базою рослинно-олійної промисловості є олійне насіння, яке відіграє важливу роль у сучасному сільському господарстві. Асортимент олійної сировини є досить широким: у рослинництві відомо понад 100 олійних культур, однак лише близько 40 з них доцільно використовувати для одержання олії. Решта культур є економічно не вигідними через низький уміст олії в насінні або складність технології її вилучення. До найбільш значущих олійних рослин належать соняшник, соя, ріпак, бавовник, мак, мигдаль, кунжут, горіх, олійна пальма, кокос, олива, льон і рицина [2–4].

Для вилучення олії з насіння олійної сировини застосовують два основні технологічні способи – механічний відтиск та екстракцію. Відтиск являє собою процес механічного відділення рідини з маси, що містить тверді частинки, тоді як екстракція полягає у відокремленні рідкої



фази із системи «тверда речовина – рідина» [5–7]. Механічне пресування зазвичай здійснюється за допомогою гідравлічних або шнекових пресів. Гідравлічні преси належать до обладнання періодичної дії, тоді як шнекові преси працюють у безперервному режимі [8–10].

Механічне віджимання олії з насіння за допомогою шнекового преса вважається одним із найдавніших і найпоширеніших способів її виробництва у світі. Популярність механічних олійних експелерів зумовлена низкою переваг: простою та надійною конструкцією обладнання, легкістю обслуговування й експлуатації навіть персоналом з невисокою кваліфікацією, можливістю швидкої адаптації до переробки різних видів олійного насіння, а також безперервністю процесу з отриманням готового продукту вже через кілька хвилин після початку роботи [9–11]. Додатковою перевагою є одержання макухи з високим вмістом білка без застосування хімічних реагентів, на відміну від екстракційного методу з використанням розчинників [12].

Разом із тим механічне шнекове пресування має певний недолік, оскільки з насіння вдається вилучити лише близько 86–92 % наявної олії [13–18]. Ефективність цього процесу, яка оцінюється за виходом олії з конкретної олійної культури, значною мірою залежить від способу підготовки сировини, що включає комплекс послідовних технологічних операцій [19–21], а також від робочих параметрів і конструктивних особливостей пресувального обладнання [22].

*Формулювання мети статті (постановка завдання).* Метою статті є розробка математичної моделі процесу вилучення олії в шнековому пресі з використанням методів розмірного аналізу.

*Основна частина.* У ході вивчення процесу пресування олійної сировини для його математичного опису використано теорію розмірного аналізу, яка дає змогу прогнозувати витрату олії, що виділяється з олійного матеріалу під час роботи механічних шнекових пресів. У межах цього підходу застосовано  $\pi$ -теорему, сформульовану Букінгемом [14; 15].

На основі узагальнення теоретичних положень і результатів експериментальних досліджень процесу пресування олійних матеріалів у механічних шнекових пресах у роботі виділено сім основних параметрів, що істотно впливають на перебіг процесу. До них належать масова витрата подачі матеріалу  $Q_a$  (кг/с), вологість матеріалу  $u$  (%), ступінь лущення  $q_c$  (%), температура в пресувальній камері  $\theta$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), частота обертання шнека  $n$  ( $\text{с}^{-1}$ ), зазор між вихідними конусом та отвором для вивантаження макухи  $d$  (м) і тиск у пресувальній камері  $p$  (Па). Показником результативності процесу пресування прийнято витрату отриманої олії  $Q_u$  (кг/с) [4].

Базова функціональна залежність, яка узагальнено описує процес пресування та є розмірно однорідною відносно основних одиниць міжнародної системи СІ ( $L$ ,  $M$ ,  $T$ ), має вигляд:

$$f = (Q_u, Q_a, p, d, n, u, q_c, \theta) = 0. \quad (1)$$

Обираючи як базові (визначальні) величини систему  $(Q_a, p, n)$ , відповідно до  $\pi$ -теорему Букінгема, можна сформулювати безрозмірні комплекси, або критерії подібності, які характеризують процес пресування.

Безрозмірні параметри  $u$ ,  $q_c$  та  $\theta$  вводяться до критеріального рівняння безпосередньо, без урахування їх під час побудови безрозмірних груп. Для фізичних величин витрати отриманої олії  $Q_u$  та діаметра вихідного отвору  $d$  в межах розмірного аналізу формується відповідний безрозмірний комплекс, що використовується для подальшого опису процесу пресування.

$$\pi_1 = \frac{Q_u}{Q_a^{x_1} p^{x_2} n^{x_3}} \quad \text{та} \quad \pi_2 = \frac{d}{Q_a^{x'_1} p^{x'_2} n^{x'_3}}. \quad (2)$$

Показники степеня  $x_1, x_2, x_3$  та  $x'_1, x'_2, x'_3$  визначають із вимоги, щоб комплекси  $\pi_1, \pi_2$  були безрозмірними щодо базових (фундаментальних) одиниць  $L$  (довжина),  $M$  (маса) і  $T$  (час). Тобто під час складання кожного критерію підбирають такі степені величин, щоб сумарні розмірності за  $L, M$  та  $T$  взаємно компенсувалися й у підсумку давали нульові показники.



Нижче подано розмірну матрицю п'яти величин у координатах фундаментальних одиниць  $L$ ,  $M$  і  $T$ :

	$x_1$	$x_2$	$x_3$		
	$Q_a$	$p$	$n$	$Q_u$	$d$
$L$	0	-1	0	0	1
$M$	1	1	0	1	0
$T$	-1	-2	-1	-1	0

Задавши умову, що комплекс  $\pi_1$  безрозмірним щодо трьох фундаментальних одиниць  $L$ ,  $M$  і  $T$ , і використавши наведені вище розмірності величин, отримуємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь для визначення показників степенів. Іншими словами, для кожної з фундаментальних одиниць складаємо рівняння балансу показників розмірностей, у результаті формується відповідна система лінійних рівнянь:

$$\begin{cases} -x_2 = 0 \\ x_1 + x_2 = 1 \\ -x_1 - 2x_2 - x_3 = -1 \end{cases} \quad (3)$$

Після розв'язання отриманої системи лінійних рівнянь визначено значення показників степеня:  $x_1 = 1$ ,  $x_2 = 0$  та  $x_3 = 0$ . За таких умов відповідний безрозмірний комплекс  $\pi_1$  набуває такого вигляду:

$$\pi_1 = \frac{Q_u}{Q_a^1 \cdot p^0 \cdot n^0} = \frac{Q_u}{Q_a}. \quad (4)$$

Аналогічним чином застосували ту саму методику, задали умову безрозмірності комплексу  $\pi_2$  щодо трьох фундаментальних величин  $L$ ,  $M$  і  $T$ . На підставі відповідних розмірностей величин, наведених у розмірній матриці, для цього випадку сформовано систему лінійних рівнянь, яка використовується для визначення показників степенів:

$$\begin{cases} -x_2 = 1 \\ x_1 + x_2 = 0 \\ -x_1 - 2x_2 - x_3 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

У результаті розв'язання відповідної системи лінійних рівнянь отримано такі значення показників степеня:  $x'_1 = 1$ ,  $x'_2 = -1$  та  $x'_3 = 1$ . За цих умов безрозмірний комплексний вираз  $\pi_2$  набуває такого вигляду:

$$\pi_2 = \frac{d}{Q_a^1 \cdot p^{-1} \cdot n^1} = \frac{d \cdot p}{Q_a \cdot n}. \quad (6)$$

З урахуванням отриманих безрозмірних комплексів відповідне критеріальне рівняння для процесу пресування записано в неявному вигляді, тобто у формі узагальненої функціональної залежності між критеріями подібності:

$$\Phi\left(\frac{Q_u}{Q_a}, \frac{dp}{Q_a n}, u, q_c, \theta\right) = 0. \quad (7)$$

З метою отримання рівняння, що описує витрату отриманої олії під час пресування в шнековому пресі, з критеріального рівняння виокремлено член, який містить  $Q_u$ . У результаті відповідну залежність для потоку отриманої олії приведено до такого вигляду:



$$\frac{Q_u}{Q_a} = \varphi_1 \left( \frac{dp}{Q_a n}, u, q_c, \theta \right); \quad (8)$$

$$Q_u = Q_a \cdot \varphi_1 \left( \frac{dp}{Q_a n}, u, q_c, \theta \right). \quad (9)$$

У першому наближенні для опису досліджуваного процесу запропоновано математичну модель у вигляді добутку степеневих функцій інших безрозмірних параметрів. Такий підхід дає змогу подати шукану залежність у компактній аналітичній формі та спростити подальший аналіз впливу окремих факторів на інтенсивність вилучення олії, а саме:

$$Q_u = k^* \cdot Q_a \cdot \left( \frac{dp}{Q_a \cdot n} \right)^{a_1} \cdot u^{a_2} \cdot q_c^{a_3} \cdot \theta^{a_4}, \quad (10)$$

де  $k^*$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_4$  – сталі коефіцієнти й відповідні показники степеня, значення яких визначено методом лінійної регресії за результатами експериментальних досліджень. За умови, що за певних режимів роботи вплив трьох останніх факторів можна вважати незначним, відповідний вираз доцільно подати в спрощеному вигляді:

$$Q_u = k \cdot Q_a \cdot \left( \frac{dp}{Q_a \cdot n} \right)^{a_1} = k \cdot \frac{Q_a}{Q_a^{a_1}} \cdot \left( \frac{dp}{n} \right)^{a_1} = k \cdot Q_a^{1-a_1} \cdot \left( \frac{dp}{n} \right)^{a_1}; \quad (11)$$

$$Q_u = k \cdot Q_a^{1-a_1} \cdot \left( \frac{dp}{n} \right)^{a_1}. \quad (12)$$

Для  $\frac{dp}{n} = \text{const}$  та  $Q_a \neq \text{const}$

$$Q_u^* = k_1 \cdot Q_a^{*(1-a_1)} \cdot \left( \frac{dp}{n} \right)^{a_1}. \quad (13)$$

Зробивши позначення  $\frac{dp}{n} = A(\text{const})$ , співвідношення стає таким:

$$Q_u^* = k_1 \cdot Q_a^{*(1-a_1)} \cdot A^{a_1} = (k_1 \cdot A^{a_1}) \cdot Q_a^{*(1-a_1)}. \quad (14)$$

Далі, увівши узагальнене позначення  $k_1 \cdot A^{a_1} = A^*$ , остаточний вираз можна подати в спрощеному й більш компактному вигляді:

$$Q_u^* = A^* \cdot Q_a^{*(1-a_1)}. \quad (15)$$

За умови, що подача матеріалу  $Q_a = \text{const}$ , а добуток параметрів  $d \cdot p/n \neq \text{const}$ , отриманий вираз для витрати отриманої олії набуває такого вигляду:

$$Q_u^{**} = k_2 \cdot Q_a^{(1-a_1')} \cdot \left( \frac{dp}{n} \right)^{a_1'}; \quad (16)$$

$$Q_u = a \cdot Q_a^{(1-b)} \cdot d^b \cdot \left( \frac{p}{n} \right)^b, \quad (17)$$

де  $\left( \frac{p}{n} \right)^b = \text{const}$ .

У роботі [8] експериментальні дослідження виконувалися із застосуванням шнекового прес-екструдера ПЕ-150 з частотою обертання 1,453 об/с. Під час експериментів використовували

різні значення зазорів між вихідними конусом та отвором для вивантаження макухи, що змінювалися в межах від 8 до 10 мм.

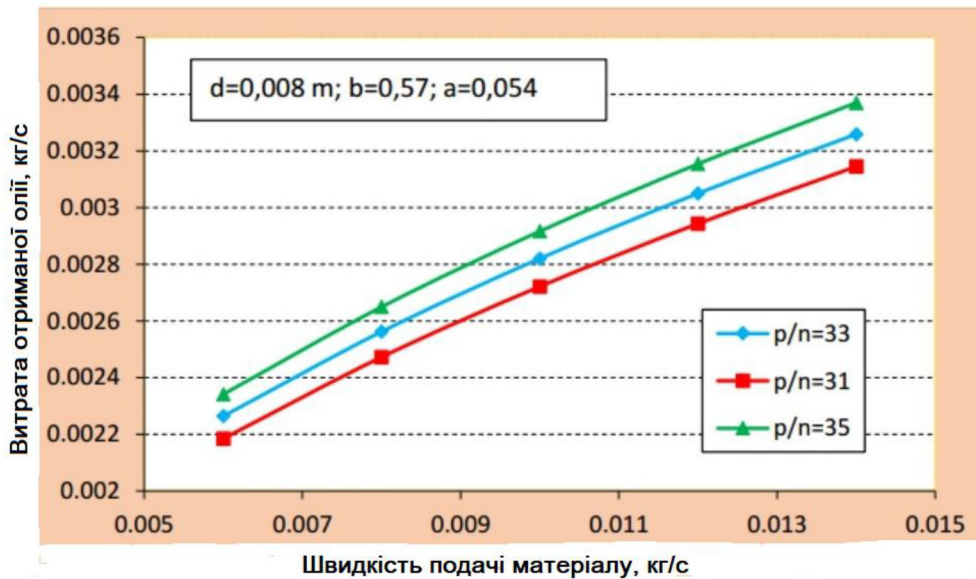


Рис. 1. Залежність витрати отриманої олії від швидкості подачі матеріалу при зазорі між вихідними конусом та отвором 8 мм [8]

У ході аналізу встановлено, що за наведених умов тиск у пресувальній камері перебуває в межах 46–48,5 МПа, тоді як витрата матеріалу становить близько 0,01 кг/с. За умови, що сталі коефіцієнти функції (17) дорівнюють  $a = 0,054$  та  $b = 0,57$  (відповідно до результатів регресійного аналізу експериментальних даних) [8], а відношення  $p/n$  змінюється в діапазоні 31–33 МПа, для значень  $Q_a$  у межах 0,006–0,014 кг/с і діаметра сопла 8 мм отримуємо криві залежності витрати отриманої олії від прикладеного тиску, які наведено на рис. 1 [8].

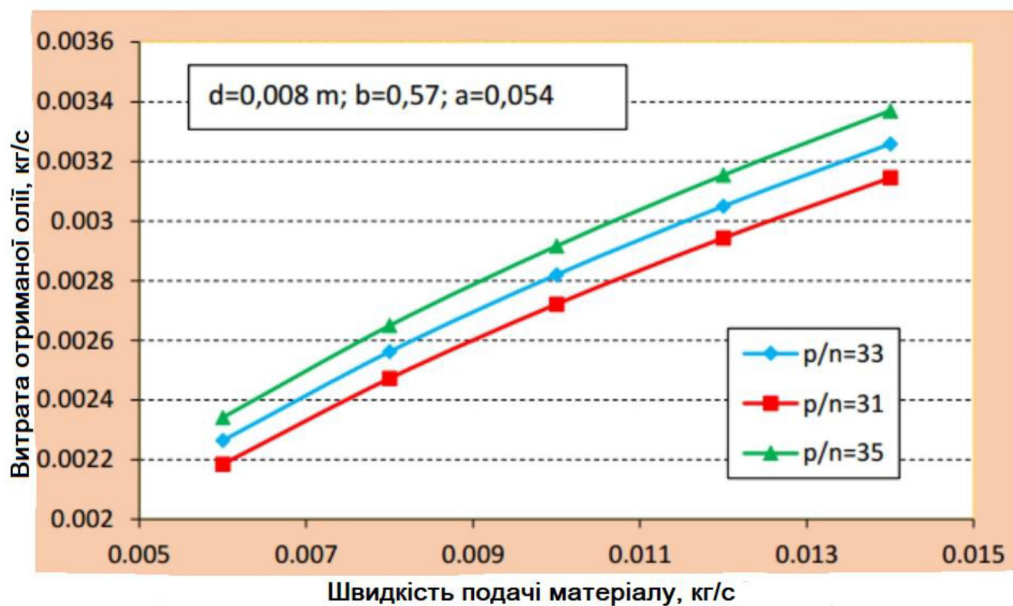


Рис. 2. Залежність витрати отриманої олії від швидкості подачі матеріалу при зазорі між вихідними конусом та отвором 10 мм [8]



Коли  $a = 0,046$  та  $b = 0,55$  [8], за тих самих значень прикладеного тиску (31–33 МПа) й однакових швидкостей подачі матеріалу, але при зазорі між вихідними конусом та отвором 10 мм характер зміни витрати отриманої олії залежно від тиску відповідає кривим, які показані на рисунку 2 [8].

*Висновки.* Отже, на основі викладеного можемо резюмувати таке:

1. Виробництво рослинної олії посідає провідне місце серед галузей світової промисловості, що зумовлено широким спектром використання рослинних олій у різних сферах господарської діяльності. Саме тому процес пресування олійної сировини є об'єктом поглиблених наукових досліджень, зокрема в частині визначення чинників, які впливають на ефективність роботи пресового обладнання. Основним показником такої ефективності є кількість олії, вилученої з олійного насіння.

2. Продуктивність механічного шнекового преса, яка оцінюється ступенем вилучення олії з конкретного виду олійної сировини, значною мірою визначається способом її підготовки. Підготовка включає комплекс окремих технологічних операцій, а також залежить від режимних і конструктивних параметрів пресувальної машини.

3. Запропонована модель процесу, яку розроблено на основі  $\pi$ -теореми розмірного аналізу, дає змогу описати витрату отриманої олії з урахуванням таких основних параметрів: швидкості подачі матеріалу, вологості сировини, ступеня лущення, температури в пресувальній камері, частоти обертання шнека, зазору між вихідними конусом та отвором для вивантаження макухи й тиску в зоні пресування.

4. Аналіз графічних залежностей, отриманих за результатами математичного моделювання та регресійної обробки експериментальних даних, показує, що потік отриманої олії зростає зі збільшенням швидкості подачі матеріалу в інтервалі 0,006–0,014 кг/с. Підвищення співвідношення  $p/n$  також сприяє зростанню витрати олії. Крім того, встановлено, що застосування зазору між вихідними конусом та отвором меншого розміру забезпечує більш інтенсивне вилучення олії з олійної сировини.

#### Список використаних джерел

1. Чумак О. П. Процеси та апарати харчових виробництв. Київ : Центр учбової літератури, 2018. 476 с.
2. Кіпніс Л. С. Обладнання підприємств олійно-жирової галузі. Київ : НУХТ, 2015. 338 с.
3. Національний університет харчових технологій. Технологічне обладнання олійно-жирових виробництв : навч. посіб. Київ : НУХТ, 2019. 420 с.
4. Gunstone F. D. Vegetable Oils in Food Technology: Composition, Properties and Uses. 2nd ed. Oxford : Wiley-Blackwell, 2011. 376 p.
5. Fellows P. Food Processing Technology: Principles and Practice. 4th ed. Cambridge : Woodhead Publishing, 2017. 1152 p.
6. Singh R. P., Heldman D. R. Introduction to Food Engineering. 5th ed. Academic Press, 2014. 864 p.
7. Geankoplis C. J. Transport Processes and Separation Process Principles. 4th ed. New Jersey : Prentice Hall, 2003. 1026 p.
8. Bird R. B., Stewart W. E., Lightfoot E. N. Transport Phenomena. 2nd ed. Wiley, 2002. 895 p.
9. McCabe W. L., Smith J. C., Harriott P. Unit Operations of Chemical Engineering. 7th ed. McGraw-Hill, 2005. 1140 p.
10. Buckingham E. On physically similar systems; illustrations of the use of dimensional equations. *Physical Review*. 1914. Vol. 4, № 4. P. 345–376.
11. Barghale P. C., Ford R. J., Sosulski F.W. Mechanical oil expression from oilseeds: A review. *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 1999. Vol. 76. P. 1033–1041.
12. Savoie R., Lanoisellé J. L., Vorobiev E. Mechanical continuous oil expression from oilseeds: A review. *Food and Bioprocess Technology*. 2013. Vol. 6. P. 1–16.
13. 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.



14. Khan L. M. Screw pressing of oilseeds: Modeling and optimization. *Journal of Food Process Engineering*. 2010. Vol. 33. P. 1–17.
15. Rosenthal A., Pyle D. L., Niranjana K. Aqueous and enzymatic processes for edible oil extraction. *Enzyme and Microbial Technology*. 1996. Vol. 19. P. 402–420.
16. Журавель Д. П., Бондар А. М. Обґрунтування технологій отримання рицинової олії. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі* : матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції / ТДАТУ, м. Запоріжжя, 01–25 листопада 2022 р. Запоріжжя, 2022. С. 77–79.
17. Шокарев О. М., В'юник О. В., Комар А. С. 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
18. Журавель Д. П., Дідур В. В. Механіко-технологічні основи глибокої переробки насіння рицини на енергетичну біосировину : монографія. Запоріжжя : ТДАТУ, 2025. 275 с. ; іл.
19. 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>
20. 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>
21. 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>
22. Дідур В. В., Журавель Д. П., Колесніченко І. А., Петриченко Є. А. Моделювання тепломасоперенесення в поверхневих капілярно-пористих середовищах. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі* : матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції (01–25 листопада 2025 року). Запоріжжя, 2025. С. 46–49.

Дата першого надходження статті до видання: 25.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 29.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026

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



**V. Didur<sup>1</sup>, D. Zhuravel<sup>2</sup>, Ya. Bilokin<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Uman National University

<sup>2</sup> Dmytro Motornyi Tavria state agrotechnological university

<sup>3</sup> Poltava State Agrarian University

## MODELING OF THE PROCESS OF PRESSING CASTOR SEEDS IN SCREW PRESSES

### Summary

The article proposes a mathematical model of the oil extraction process in a screw press, built on the basis of dimensional analysis methods. The adequacy of the developed model is confirmed by experimental results obtained during the pressing of castor seeds in a screw press, using regression analysis methods. The proposed model allows describing the consumption of the obtained oil taking into account the following main parameters: material feed rate, raw material moisture, degree of peeling, temperature in the pressing chamber, screw rotation frequency, diameter of the nozzle for unloading the cake and pressure in the pressing zone. Vegetable oil production occupies a leading place among the branches of world industry, which is due to the wide range of uses of vegetable oils in various



spheres of economic activity. That is why the process of pressing oilseeds is the object of in-depth scientific research, in particular in terms of determining the factors that affect the efficiency of the press equipment. The main indicator of such efficiency is the amount of oil extracted from oilseeds. The productivity of a mechanical screw press, which is estimated by the degree of oil extraction from a particular type of oilseed, is largely determined by the method of its preparation. Preparation includes a set of separate technological operations, and also depends on the operating and design parameters of the pressing machine. In this work, a mathematical model of the process was developed based on the  $\pi$ -theorem of dimensional analysis. The proposed model allows describing the flow rate of the obtained oil taking into account the following main parameters: material feed rate, raw material moisture, degree of peeling, temperature in the pressing chamber, screw rotation frequency, diameter of the nozzle for unloading the cake and pressure in the pressing zone. Analysis of the graphical dependencies obtained from the results of mathematical modeling and regression processing of experimental data shows that the flow rate of the obtained oil increases with increasing material feed rate in the range of 0.006–0.014 kg/s. Increasing the p/n ratio also contributes to an increase in oil flow rate. In addition, it was found that the use of a nozzle of a smaller diameter ensures more intensive extraction of oil from oil raw materials.

**Keywords:** vegetable oil, castor seeds, screw press, feed rate, mathematical model, regression analysis.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-11>

УДК 664.14:658.52.011.56:007.52

Д. В. Дмитревський<sup>1,2</sup>, канд. техн. наук, доц.

ORCID: 0000-0003-1330-7514

О. Є. Загоруйко<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.

ORCID: 0000-0003-1186-3832

<sup>1</sup> Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного<sup>2</sup> Державний біотехнологічний університет

e-mail: dmitrevskyidv@gmail.com

## АВТОМАТИЗАЦІЯ ПОТОКОВИХ ЛІНІЙ І РОБОТИЗОВАНИХ КОМПЛЕКСІВ У ВИРОБНИЦТВІ КОНДИТЕРСЬКИХ ВИРОБІВ

*Анотація.* У статті розглянуто актуальні питання автоматизації поточкових ліній кондитерського виробництва через інтеграцію інтелектуальних роботизованих комплексів. Обґрунтовано необхідність переходу від жорстких автоматизованих систем до гнучких кіберфізичних структур у межах концепції Індустрії 4.0. Основну увагу приділено застосуванню дельта-роботів, оснащених системами технічного зору й алгоритмами глибокого машинного навчання, що дає змогу забезпечити делікатне поводження з крихкою продукцією та здійснювати контроль якості в реальному часі. Описано принципи адаптивного керування технологічними параметрами, які дають змогу стабілізувати реологічні властивості кондитерських мас. Результати дослідження підтверджують, що впровадження запропонованих рішень підвищує продуктивність ліній, мінімізує частку браку та значно скорочує час переналагодження обладнання при зміні асортименту продукції.

*Ключові слова:* автоматизація, кондитерська промисловість, поточкові лінії, роботизовані комплекси, промислові роботи, системи керування, технологічний процес.

*Постановка проблеми.* Сучасна харчова промисловість, зокрема її кондитерська галузь, перебуває на етапі глобальної трансформації, зумовленої переходом до четвертої промислової революції (Industry 4.0). Кондитерське виробництво характеризується надзвичайно високою інтенсивністю технологічних процесів, широким асортиментом продукції та жорсткими вимогами до санітарно-гігієнічних норм. У цих умовах традиційні методи організації виробництва, що базуються на частковій автоматизації або значній частці ручної праці, вичерпали свій ресурс ефективності. Головна суперечність сьогодення полягає між усе більшими вимогами ринку до якості, індивідуалізації та швидкості постачання продукції й обмеженими можливостями застарілих технічних систем.

Однією з ключових проблем галузі є нестабільність якісних показників сировини, що безпосередньо впливає на роботу автоматизованих ліній. Кондитерські маси (шоколад, карамель, тісто) мають складні реологічні властивості, які змінюються залежно від температури, вологості й часу обробки. Наявні поточкові лінії часто не мають достатньої адаптивності для миттєвого реагування на ці зміни без зупинки конвеєра або втручання оператора. Це призводить до зростання відсотка браку та перевитрати дороговартісної енергії [1].

Паралельно із цим гостро стоїть питання гнучкості виробництва. Сучасний споживач вимагає постійного оновлення асортименту, що змушує підприємства часто переналаштовувати обладнання. Класичні автоматизовані лінії, спроектовані під один вид продукції, стають економічним тягарем через тривалий час простою під час переходу на нові формати виробів. Саме тут виникає потреба в інтеграції роботизованих комплексів, здатних виконувати широкий спектр операцій – від дозування й декорування до групового пакування – шляхом простої зміни програмного забезпечення або захоплюючих пристроїв [2].



Проте впровадження робототехніки в кондитерський сектор стикається з низкою специфічних технічних бар'єрів. По-перше, це складність маніпулювання крихкими та делікатними виробами. Роботизована система повинна мати високу чутливість і використовувати спеціалізовані адаптивні захоплювачі (наприклад, вакуумні або м'які силіконові), щоб не пошкодити структуру продукту. По-друге, інтеграція роботів у наявні поточкові лінії вимагає створення складних систем технічного зору. Робот має не просто рухатися за заданою траєкторією, а в режимі реального часу ідентифікувати форму, орієнтацію та навіть дефекти кожного виробу на конвеєрі, що рухається з великою швидкістю [3].

Соціально-економічний аспект проблеми також є вагомим. Дефіцит кваліфікованої робочої сили та постійне зростання вартості праці роблять повну автоматизацію не просто бажаною, а необхідною умовою виживання підприємства на конкурентному ринку. Проте швидка роботизація є нові вимоги до кібербезпеки та надійності систем керування. Будь-який збій у програмному забезпеченні роботизованого комплексу в умовах безперервного поточкового виробництва може призвести до масштабних збитків, псування великих партій сировини й тривалого виходу з ладу всього технологічного ланцюга [4].

Окремої уваги потребує проблема енергоефективності. Сучасні роботизовані комплекси споживають значну кількість енергії, і їх упровадження має бути математично й економічно обґрунтованим. Необхідно розробити алгоритми оптимального керування, які б забезпечували максимальну продуктивність при мінімальних енерговитратах, урахувавши динамічні характеристики механізмів [5].

Таким чином, наукова проблема полягає у відсутності комплексного підходу до створення інтелектуальних систем керування, які б об'єднували традиційні поточкові лінії з гнучкими роботизованими комплексами в єдину екосистему. Існує нагальна потреба в розробці нових методів моделювання та синтезу алгоритмів адаптивного керування, які дадуть змогу мінімізувати вплив людського фактору, забезпечити стабільну якість кондитерських виробів у динамічних умовах виробництва й підвищити загальну рентабельність галузі. Вирішення цих питань дасть можливість створити теоретичну та практичну базу для проектування кондитерських підприємств, де роль людини зміститься від безпосереднього виконання операцій до стратегічного нагляду за високотехнологічними системами.

*Аналіз останніх досліджень.* Сучасний стан наукових розробок у сфері автоматизації харчових виробництв характеризується переходом від жорстко детермінованих систем до адаптивних та інтелектуальних структур. Аналіз наукової літератури останнього десятиліття дає змогу виділити кілька ключових напрямів, за якими розвивається автоматизація кондитерської галузі [6].

Перший напрям охоплює фундаментальні дослідження в галузі математичного моделювання динаміки поточкових ліній. Основна увага в цих роботах приділяється опису нелінійних процесів, що відбуваються під час термічної та механічної обробки кондитерських мас. Акцентується увага на необхідності створення систем автоматичного регулювання, які здатні враховувати зміну реологічних властивостей сировини (в'язкості, пластичності, адгезії) у реальному часі. Розроблено численні алгоритми регулювання й нечіткої логіки, які дають змогу стабілізувати якість напівфабрикатів, проте їхня інтеграція в єдині комплекси з виконавчою робототехнікою залишається складним інженерним завданням [7].

Інші дослідження присвячені впровадженню систем комп'ютерного зору й інтелектуальної ідентифікації об'єктів. Описано методи сегментації зображень для сортування виробів за формою, кольором і наявністю поверхневих дефектів. Сучасні підходи базуються на використанні згорткових нейронних мереж, що дає змогу автоматизованим лініям самостійно адаптуватися до зміни асортименту без переналаштування апаратних датчиків. Проте питання швидкодії



таких систем в умовах високошвидкісного конвеєрного руху (понад 100 одиниць продукції за хвилину) потребує подальшого вдосконалення обчислювальних алгоритмів.

Інше дослідження фокусується на кінематиці й динаміці роботизованих комплексів паралельної структури (дельта-роботів) [8]. У фахових виданнях доведено, що саме такі маніпулятори є найбільш ефективними для операцій переміщення та пакування в кондитерському виробництві завдяки низькій інерційності й високій точності позиціонування. Окрему увагу приділяють розробці «м'яких» захоплювальних пристроїв, виготовлених із харчового силікону, що дає змогу маніпулювати делікатними виробами без пошкодження їхньої структури [9].

Останні роки в науковому середовищі активно обговорюється концепція «цифрових двійників» (Digital Twins) і промислового інтернету речей. Дослідження підтверджують, що створення віртуальних моделей поточкових ліній дає змогу оптимізувати енергоспоживання та прогнозувати моменти виходу обладнання з ладу за методикою «Predictive Maintenance». Це значно підвищує загальну ефективність обладнання (ОЕЕ) та зменшує кількість незапланованих зупинок [10].

Попри значні успіхи в окремих напрямках, аналіз наявних рішень свідчить про відсутність цілісної методології побудови інтегрованих систем, де потокова лінія та роботизований комплекс працюють як єдиний інтелектуальний організм [11]. Більшість публікацій розглядають ці елементи як окремі одиниці автоматизації. Також залишається недостатньо вивченим питання енергетичної оптимізації сумісної роботи багатьох маніпуляторів на одній лінії. Необхідність усунення цих прогалин і зумовила актуальність статті, спрямованої на синтез комплексних рішень для автоматизації кондитерських підприємств.

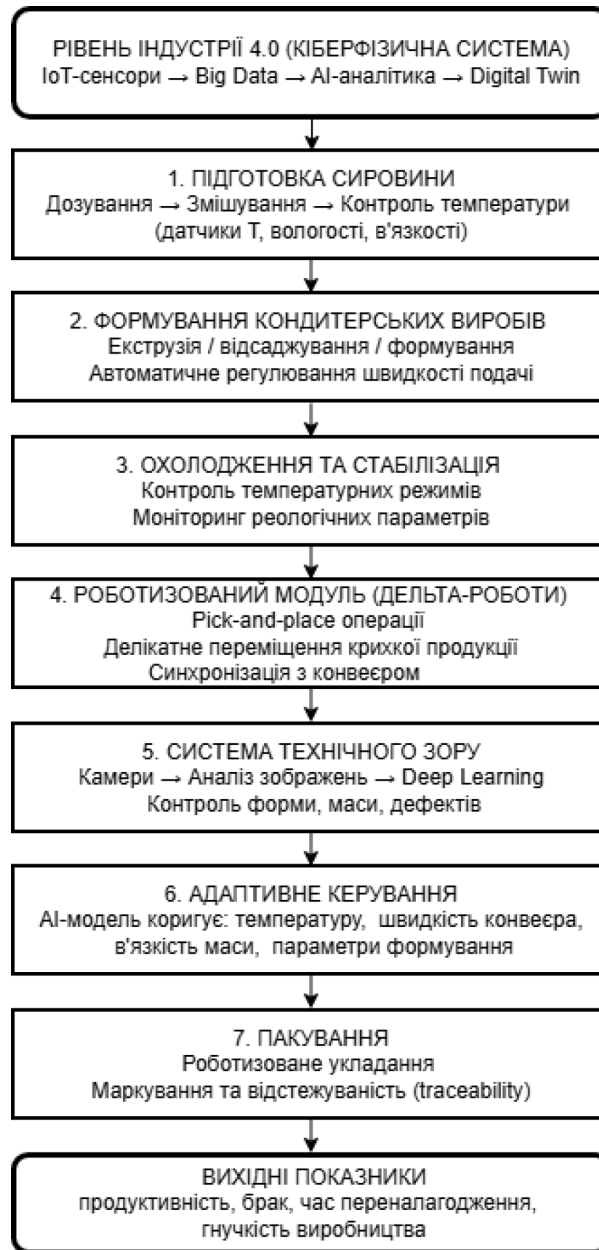
*Формулювання мети статті (постановка завдання).* Метою статті є розробка комплексної методики автоматизації поточкових ліній кондитерського виробництва шляхом інтеграції гнучких роботизованих комплексів у єдину інтелектуальну систему керування. Дослідження спрямоване на синтез адаптивних алгоритмів взаємодії маніпуляторів із динамічним конвеєрним потоком, що забезпечить мінімізацію браку при роботі з делікатними виробами, підвищення енергоефективності обладнання та скорочення часу переналагодження ліній при зміні асортименту продукції в умовах сучасного цифрового виробництва

*Основна частина.* Сучасна концепція автоматизації кондитерського виробництва базується на створенні інтелектуальних систем, де кожен вузол потокової лінії розглядається як активний елемент єдиної цифрової мережі. Перехід від традиційних механічних зв'язків до гнучких роботизованих комплексів вимагає докорінного перегляду архітектури керування й упровадження принципів кіберфізичних систем [12]. Ефективна автоматизація в сучасних умовах починається з розгортання багаторівневої структури, де нижній рівень охоплює сенсори та виконавчі механізми, а верхній забезпечує координацію рухів через промислові логічні контролери [13]. Використання високошвидкісних протоколів передачі даних дає змогу синхронізувати швидкість конвеєрної стрічки з динамікою маніпуляторів у реальному часі, що є критично важливим для збереження цілісності делікатних кондитерських виробів, таких як зефір або глазуровані цукерки.

Найбільш перспективним технічним рішенням для кондитерської галузі є впровадження роботів паралельної кінематики, відомих як дельта-роботи. Завдяки мінімальній масі рухомих частин вони здатні виконувати надшвидкі операції переміщення, що значно перевищує можливості людини. Процес роботизованого укладання виробів базується на безперервному циклі, що включає сканування потоку, планування траєкторії та м'яке захоплення [14]. На етапі сканування система технічного зору миттєво визначає координати й кут орієнтації кожного об'єкта на стрічці. Після цього програмний модуль розраховує оптимальну точку перехоплення, ураховуючи інерційні характеристики маніпулятора. Математичне моделювання таких

рухів вимагає вирішення складних диференціальних рівнянь динаміки, що дає змогу реалізувати адаптивне керування з випередженням для компенсації вібрацій конвеєра [15].

На рисунку 1 показана схема функціонування автоматизованої потокової лінії з роботизованим комплексом у кондитерському виробництві.



**Рис. 1. Схема функціонування автоматизованої потокової лінії з роботизованим комплексом у кондитерському виробництві**

Важливим складником автоматизації є інтелектуальні системи технічного зору, які виходять за межі простого визначення координат. Упровадження алгоритмів глибокого машинного навчання дає системі змогу не лише ідентифікувати виріб, а й проводити його комплексну дефектоскопію безпосередньо в потоці. Нейронні мережі аналізують геометричні параметри, колір і цілісність поверхні продукції, автоматично відсіюючи брак без зупинки лінії. Це забезпечує безпрецедентний рівень контролю якості, який неможливо реалізувати за допомогою традиційних оптичних датчиків [16]. Одночасно з механічними операціями автоматизація



повинна охоплювати й параметри технологічного середовища. Оскільки кондитерські маси є надзвичайно чутливими до температурних коливань, застосовуються каскадні системи регулювання. Зовнішні контури контролюють якісні показники продукту на виході, а внутрішні миттєво коригують подачу енергоносіїв у сорочки обладнання, що дає змогу уникнути теплової інерції та мінімізувати перевитрати сировини [17].

Особлива увага в процесі автоматизації приділяється гнучкості виробництва в межах концепції Індустрії 4.0. Проблема тривалого переналагодження ліній при зміні асортименту вирішується через упровадження рецептурного керування [18]. Використання сучасних інтерфейсів дає оператору змогу миттєво завантажувати нові профілі роботи, після чого роботи автоматично змінюють програмні траєкторії, а системи зору – моделі розпізнавання об'єктів [19]. Такий підхід трансформує жорстку потокову лінію на універсальну виробничу платформу, здатну працювати з широким спектром продукції з мінімальними простоями. Інтеграція цих рішень у загальну ERP-систему підприємства забезпечує прозорість логістичних процесів і дає змогу відстежувати ефективність кожної одиниці обладнання в реальному часі [20].

Енергетичний аспект автоматизації також відіграє ключову роль, оскільки велика кількість роботизованих вузлів підвищує навантаження на мережу. Розробка алгоритмів оптимізації циклів руху маніпуляторів дає змогу мінімізувати споживання енергії під час холостих пробігів, що позитивно впливає на собівартість продукції. Крім того, сучасні комплекси інтегрують системи безпеки нового покоління, де лазерні сканери контролюють робочу зону й дають людині можливість безпечно взаємодіяти з технікою без необхідності встановлення фізичних бар'єрів. У підсумку комплексна автоматизація та роботизація створюють синергетичний ефект, де стабільність якості поєднується з високою продуктивністю, що є основою для створення конкурентоспроможного виробництва майбутнього

**Висновки.** Аналіз і теоретичне обґрунтування підтверджують, що комплексна автоматизація поточкових ліній з упровадженням роботизованих комплексів є ключовим чинником підвищення ефективності кондитерського виробництва. Інтеграція дельта-роботів, оснащених системами технічного зору й алгоритмами машинного навчання, дає змогу розв'язати проблему маніпулювання крихкою продукцією при збереженні високої швидкості конвеєрного потоку. Установлено, що перехід до інтелектуальних систем керування за принципами Industry 4.0 забезпечує безпрецедентну гнучкість виробничих процесів, скорочуючи час переналагодження обладнання та мінімізуючи вплив людського фактору на якість готових виробів. Запропоновані підходи до адаптивного регулювання технологічних параметрів створюють підґрунтя для зниження енерговитрат і відсотків браку, що сукупно підвищує конкурентоспроможність підприємства на сучасному ринку.

#### Список використаних джерел

1. Mohammed S., Mohammadi M., Sharma S., Rana V. S., Sood S. Assessment of advancements and applications of robotics, artificial intelligence, and automated technology in the modern food sector. *Agriculture and Food Security*. 2025. Vol. 14, № 101261. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101261>
2. Alonso R., Sánchez T.F., Alfaro D.A., Cruz Y.J., Villalonga A., Castaño F. Automation and Robotics Pilot Lines in the Context of Industry 5.0. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15(5), № 2510. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15052510>
3. Xiong Y. B., Patle B. K., Pawar S. Prospects of robotics in food processing: an overview. *Journal of Mechanical Engineering, Automation and Control Systems*. 2023. № 23209. DOI: <https://doi.org/10.21595/jmeacs.2023.23209>
4. Liberty J.T., et al. Advancing food manufacturing: Leveraging robotic solutions for enhanced quality assurance and traceability across global supply networks. *Trends in Food Science & Technology*. 2024. 104705. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104705>.



5. Lyu Y., Wu F., Wang Q., Liu G., Zhang Y., Jiang H. A review of robotic and automated systems in meat processing. *Frontiers in Robotics and AI*. 2025. 1578318. DOI: <https://doi.org/10.3389/frobt.2025.1578318>
6. Zhang Y., et al. Design of an intelligent automated system for food manufacturing. *Journal of Food Engineering*. 2018. Vol. 233. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.04.017>
7. Дейниченко Г. В., Дмитревський Д. В., Гузенко В. В., Афукова Н. О. Аналіз застосування мембранних апаратів для виробництва соків із плодової сировини. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету : наукове фахове видання / ТДАТУ. Мелітополь. 2021. С. 36–43. DOI: <https://doi.org/10.31388/2078-0877-2021-21-1-36-43>*
8. Dmytrevskiy D., Horielkov D., Chervonyi V., Sefikhanova K., Rybchuk L. Investigation of the Process of Making Applesauce and Development the Device for its Implementation. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VIII. Proceedings of the 8th International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2025, June 17–20, 2025, Porto, Portugal-Volume 2: Mechanical Engineering*. P. 13–27. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-95218-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-95218-0_2).
9. Kumar S., et al. Automation in food processing: recent trends and future prospects. *Trends in Food Science & Technology*. 2020. № 98. P. 12–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.02.008>
10. Siciliano B., Khatib O. *Springer Handbook of Robotics*. Springer. 2016. 1200 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1>
11. Groover M. P. *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing*. 5th ed. Prentice Hall. 2015. 688 p. DOI: <https://doi.org/10.1142/9789812771336>
12. Cherevko O. I., Deinychenko G. V., Dmytrevskiy D. V., Guzenko V. V., Heier H. V., Tsvirkun L. O. Application of membrane technologies in modern conditions of juice production. *Прогресивна техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*. 2020. Вип. 2(32). С. 67–77. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.4369743>
13. Deinychenko G. V., Dmytrevskiy D. V., Zolotukhina I. V., Perekrest V. V., Guzenko V. V. Directions of improvement of processes of membrane separation of juices from fruit and berry raw materials. *Прогресивна техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*. 2021. Вип. 1 (33). P. 89–98. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5036090>
14. Дейниченко Г. В., Золотухіна І. В., Дмитревський Д. В., Гузенко В. В., Перекрест В. В., Гладкова О. С. Сучасні технології баромембранних процесів у харчовій промисловості. *Обладнання та технології харчових виробництв*. 2021. № 2(43). С. 86–93. DOI: <https://doi.org/10.33274/2079-4827-2021-43-2-86-93>
15. Al-Turki U., et al. A review of industrial robotics in manufacturing. *Advances in Mechanical Engineering*. 2019. № 3. P. 78–91. DOI: <https://doi.org/10.1177/1687814019835638>
16. Monostori L., et al. Cyber-physical systems in manufacturing. *CIRP Annals*. 2016. Vol. 65(2). P. 621–641. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.005>
17. Lee J., Bagheri B., Kumar, A. Industrial big data analytics and cyber-physical systems for future maintenance & service innovation. *CIRP Annals*. 2017. Vol. 66. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.015>
18. Villani V., et al. Fog computing and its role in the automation of manufacturing cells. *Computers in Industry*. 2019. Vol. 108. P. 138–150. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.11.003>
19. Bogue R. Robots in food manufacturing: a review of applications. *Industrial Robot: An International Journal*. 2018. Vol. 45(6). P. 498–507. DOI: <https://doi.org/10.1108/IR-04-2018-0080>
20. Pathak P., Sa, S. Modular and reconfigurable robot for factory automation. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2020. Vol. 99. P. 543–558. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10846-020-01145-9>

Дата першого надходження статті до видання: 15.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026

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





**D. Dmytrevskiy<sup>1,2</sup>, A. Zagorulko<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University*

<sup>2</sup> *State Biotechnological University*

## **AUTOMATION OF PRODUCTION LINES AND ROBOTIC SYSTEMS IN CONFECTIONERY MANUFACTURING**

### *Summary*

The article deals with the complex problems of automating production lines and integrating robotic systems within the modern confectionery manufacturing sector. Confectionery production is characterized by high-speed technological processes, sensitive raw materials, and strict requirements for product aesthetics. Traditional automation often lacks the flexibility required to adapt to rapidly changing consumer demands and the diverse physical properties of products such as chocolates, biscuits, and delicate pastries. The study is based on the principles of the Industry 4.0 concept, focusing on the transition from rigid mechanical automation to flexible cyber-physical systems. The research investigates the application of parallel kinematics, specifically delta robots, synchronized with high-speed conveyor belts. A significant part of the work is dedicated to the implementation of artificial intelligence, specifically deep learning neural networks, into computer vision systems to ensure real-time quality inspection and object orientation detection. The author proposes a hierarchical control architecture that integrates programmable logic controllers with robotic cells through real-time industrial communication protocols. The research demonstrates that the use of adaptive soft grippers and force-sensing technologies allows robotic complexes to handle fragile items without compromising their structural integrity. Furthermore, the implementation of recipe-based management systems significantly reduces downtime during product changeovers. The study also addresses the issues of energy efficiency and predictive maintenance, showing that digital twin modeling can optimize the energy consumption of robotic arm trajectories. The findings confirm that the integration of intelligent robotics into confectionery streamlines leads to a synergistic effect, enhancing both productivity and product quality. The proposed automation framework minimizes the impact of human error, ensures total quality control, and provides the necessary flexibility for small-batch production. This research provides a theoretical and practical basis for the technological modernization of food industry enterprises aiming to improve their global competitiveness in the digital age.

**Keywords:** automation, confectionery industry, production lines, robotic systems, industrial robots, control systems, technological process.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-12>

УДК 620.1.631

О. О. Ковальов, канд. техн. наук, ст. викл.

ORCID: 0000-0002-4390-462X

І. С. Панов, здобувач вищої освіти

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*e-mail: [oleksandr\\_kovalov@tsatu.edu.ua](mailto:oleksandr_kovalov@tsatu.edu.ua)

## ПРОЦЕСИ УТИЛІЗАЦІЇ РІЗНИХ ВИДІВ ПАКУВАЛЬНОЇ ТАРИ Й УПАКОВКИ, ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ ТА РІШЕННЯ

*Анотація.* У статті досліджено екологічні проблеми, пов'язані з утилізацією різних видів пакувальної тари й упаковки, а також проаналізовано сучасні підходи до зменшення їх негативного впливу на довкілля. Установлено, що пакувальні матеріали становлять 40–50 % загального обсягу твердих побутових відходів у світі, тоді як рівень їх переробки в Україні залишається критично низьким і не перевищує 5 %. Розглянуто специфіку екологічних ризиків для основних видів упаковки: пластикової, скляної, металевої, паперової та комбінованої (типу тетрапак). Особливу увагу приділено проблемам тривалого розкладання пластику й утворення мікропластику, енергоємності виробництва скла, екологічним наслідкам видобутку бокситів для алюмінію, вирубці лісів для паперової продукції та технологічній складності переробки багатошарових матеріалів. Проаналізовано міжнародний досвід країн-лідерів у сфері рециклінгу, зокрема Німеччини, Швеції, Фінляндії, Бразилії та Південної Кореї, де досягнуто високих показників переробки завдяки ефективним системам сортування, законодавчому регулюванню й економічному стимулюванню. Розглянуто інноваційні рішення, серед яких – упровадження біорозкладних матеріалів (PLA), розвиток інфраструктури роздільного збору відходів, застосування енергоощадних технологій переробки, використання цифрових інструментів управління відходами й розширення відповідальності виробників. Обґрунтовано, що вирішення проблеми утилізації пакувальної тари потребує комплексного підходу, який поєднує державну політику, інвестиції в сучасні технології, формування культури сортування та підвищення екологічної свідомості населення. Реалізація зазначених заходів сприятиме зменшенню навантаження на довкілля, збереженню ресурсів і впровадженню принципів циркулярної економіки в Україні.

*Ключові слова:* пакувальні матеріали, мікропластик, переробка, тара, системи циркулярної економіки, екологічний.

*Постановка проблеми.* У середньому у світі близько 40–50 % відходів припадає на різні види тари й упаковки, при цьому тенденція до відсоткового збільшення цього показника зберігається, ураховуючи все більший попит на різні товари. Значна частина з відходів накопичується на сховищах (за оцінками фахівців, життєдіяльність кожної людини в Україні забезпечує накопичення за звалищах приблизно 1 т відходів за рік) [1; 2]. Лише незначна частина із цих відходів (до 5 % в Україні) переробляється, при цьому використовується шкідливий спосіб спалювання, при якому в повітря, ґрунт, воду й організм людини потрапляють шкідливі речовини, що утворюються при цьому. Наприклад, при спалюванні полівінілхлориду, у складі якого значну частину займає хлор, утворюється соляна кислота, а у випадку неповного спалювання цього матеріалу відбувається виділення токсичного диму у формі хлор вуглеводню (у разі спалювання поліуретану виділяється ціанід) [2].

*Аналіз останніх досліджень.* У сучасному світі проблема утилізації пакувальної тари й упаковки стає дедалі актуальнішою. Відходи, що утворюються від використання пакувальних матеріалів, мають значний вплив на навколишнє середовище. Ефективне управління цими відходами є важливим завданням для забезпечення сталого розвитку.



Основні екологічні проблеми [1–3]:

1. Збільшення обсягів відходів: велика кількість пакувальних матеріалів потрапляє на звалища, що збільшує обсяг твердих відходів.
2. Забруднення довкілля: деякі пакувальні матеріали, особливо пластмаси, забруднюють природне середовище, потрапляючи у водні та ґрунтові ресурси.
3. Високий уміст небезпечних речовин: деякі види пакувальних матеріалів містять токсичні речовини, що можуть негативно впливати на здоров'я людини й тварин.
4. Тривалий період розкладання: пластикові матеріали розкладаються дуже повільно, що призводить до довготривалого забруднення довкілля.

Рішення для зменшення негативного впливу:

1. Переробка пакувальних матеріалів зменшує обсяг відходів і дає змогу повторно використовувати цінні ресурси.
2. Використання повторно придатних пакувальних матеріалів зменшує потребу у виробництві нових, що сприяє економії ресурсів.
3. Використання біорозкладних пакувальних матеріалів дає змогу зменшити тривалість їх розкладання й обсяг сміття.

Інноваційні підходи [4]:

1. Розробка нових матеріалів: учені працюють над створенням нових екологічно безпечних пакувальних матеріалів, що швидко розкладаються та не містять токсичних речовин.
2. Інтелектуальні системи управління відходами: використання сучасних технологій для автоматизації процесів сортування й утилізації відходів.

Роль державної політики та громадської свідомості:

1. Державні ініціативи: законодавчі акти й фінансова підтримка з боку держави сприяють упровадженню ефективних методів утилізації пакувальних матеріалів.
2. Освітні програми: підвищення рівня громадської свідомості через освітні програми допомагає формувати відповідальне ставлення до утилізації відходів.

*Формулювання цілей статті (постановка завдання).* Метою статті є аналіз проблематики впровадження культури сортування сміття. Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі завдання:

- проведено аналіз викликів, із якими стикаються країни при впровадженні ефективних методів утилізації пакувальної тари й упаковки;
- розглянуто проблеми, пов'язані з утилізацією кожного виду упаковки, запропоновано рішення, що забезпечують зниження негативних екологічних наслідків, і приклади їх впровадження;
- надано рекомендації щодо реалізації комплексного підходу до переробки сміття.

*Основна частина.* Попри всі зусилля та позитивний досвід, існують значні виклики, з якими стикаються країни при впровадженні ефективних методів утилізації пакувальної тари й упаковки [1; 3]:

1. Висока вартість переробки: процеси переробки можуть бути дорогими, особливо коли мова йде про сучасні технології та обладнання. Це вимагає значних інвестицій з боку держави й приватного сектору.
2. Недостатня інфраструктура: багато країн, особливо ті, що розвиваються, не мають достатньої інфраструктури для збирання, сортування та переробки відходів. Це ускладнює процес утилізації й переробки пакувальних матеріалів.
3. Низький рівень обізнаності населення: громадська свідомість є важливим фактором у системі управління відходами. Часто населення не знає про важливість сортування сміття або не має доступу до необхідних ресурсів для цього.



4. Відсутність ефективної законодавчої бази: у деяких країнах відсутні чіткі закони й регулювання щодо утилізації пакувальних матеріалів, що ускладнює впровадження ефективних систем управління відходами.

### 1. Пластикова упаковка

**Екологічні проблеми** пластикової упаковки пов'язані з тривалим терміном їх розкладу, що спричинює забруднення ґрунтів та океанів. Другою складовою екологічних проблем є мікропластик. Частинки пластику потрапляють у харчові ланцюги, загрожуючи здоров'ю людей і тварин [5].

**Можливі рішення** означених проблем включають використання технології рециклінгу, при якому широко впроваджуються переробні пластикові матеріали (PET, HDPE). Альтернативою цьому може бути впровадження технології, що передбачає заміну штучного пластику на біопластик, PLA (полілактид), який розкладається в умовах компостування. До радикальних способів рішення стосовно негативного впливу полімерних матеріалів належить заборона виробництва й використання одноразового пластику, що вже реалізовано в деяких країнах ЄС і Канаді [2; 6].

Кажучи про успішні приклади вирішення негативного впливу на навколишнє середовище пластикової упаковки, можна назвати країни ЄС, де переробляється понад 40 % пластикової тари (лідером є Німеччина (47 %)). Іншим прикладом успішного вирішення екологічних наслідків використання полімерів є Південна Корея, у якій переробляється 54 % пластику завдяки суворій системі сортування [7].

### 2. Скляна тара

Використання скляної тари пов'язано із суттєво меншою кількістю негативних наслідків. Між тим варто зазначити, що при виробництві скла задіяні високі температурні режими, а оскільки термін розкладання скла становить близько 1 млн років, а також виходячи з корисних якостей скляної тари, більшість виробів спрямовується для рециклінгу. Складність же проведення рециклінгу полягає в неправильному сортуванні скляної тари.

Можливі рішення полягають у широкому впровадженні методів, які забезпечують дотримання мешканцями культури та правил сортування сміття. Доцільно розглянути й ретельно дослідити технології, що будуть забезпечувати зниження температур плавлення скломаси, що можна досягнути, шляхом додавання певних речовин до складу шихти [3]. Ще одним рішенням може бути використання легшого скла, що дасть змогу знизити витрати на транспортування та виробництво.

Між тим фахівці зазначають безальтернативність переробки скла, урахувавши той факт, що скло може приймати будь-яку форму, що може бути конкурентною перевагою виробника (брендові пляшки). Скло є чи не єдиним матеріалом, який може перероблятися нескінчену кількість разів, при цьому не погіршуючи початкові характеристики. Спеціалісти відзначають, що рециклінг скла вимагає на 40 % менше витрат енергії порівняно з виробництвом нових одиниць [3; 7]. З точки зору заощаджуваності ресурсів фахівці зазначають можливість багаторазового повторного використання, наприклад, пивні пляшки в деяких країнах повторно використовуються до 50 разів.

Серед прикладів успішного використання скляної тари варто згадати Швецію, у якій переробляється 94 % скляної тари, що стало можливим завдяки ефективній системі збору [4]. Майже  $\frac{3}{4}$  скляних виробів переробляється в Італії, що дало країні змогу суттєво знизити обсяг відходів на сміттєзвалищах.

### 3. Металева упаковка (алюміній, сталь)

Екологічні проблеми, які виникають під час виробництва металевої тари, пов'язані з виділенням шкідливих викидів. Так, видобуток бокситів для алюмінію супроводжується забруднен-



ням довкілля [8]. Другим негативним наслідком використання металевої упаковки є складна технологія переробки комбінованих матеріалів: наприклад, металізована упаковка з пластиком (наприклад, для чіпсів) переробляється в ході багатостадійного енерговитратного процесу.

Серед можливих рішень варто назвати широке впровадження переробки алюмінію, яка потребує на 95 % менше енергії, ніж первинне виробництво [2; 8]. Іншим та очевидним рішенням є широке впровадження контейнерів, пунктів прийому для збору металевих відходів, банок і пляшок і подальшого використання після відновлення початкових товарних якостей тари.

Приклади успішних рішень щодо мінімізації негативного впливу металевої тари на довкілля реалізовані в країнах ЄС, де рівень переробки металевої упаковки становить 74 %, лідером є Нідерланди (95 %) [5]. Іншим прикладом може бути Бразилія, де завдяки програмам збору й переробки переробляється 99 % алюмінієвих банок.

#### **4. Паперова упаковка**

Екологічні проблеми, пов'язані з використанням паперової та картонної тари, полягають у вирубці лісів. Рішенням може стати вирощування для потреб папероробної промисловості швидкозростаючих дерев, але ця технологія не набула значного поширення в Україні. Іншим негативним наслідком для екології є складність утилізації комбінованої упаковки (наприклад, картон із пластиковим покриттям) [4; 8].

Можливі рішення для мінімізації негативного впливу на довкілля картонно-паперової тари є використання паперу з контрольованих лісів, що можливо завдяки реалізації технології сертифікації FSC. Альтернативою є широке впровадження системи збору паперових відходів для рециклінгу. І хоча, порівняно з виробами зі скла, картонно-паперова тара при переробці втрачає якісні характеристики, вимагає суттєвих витрат води й енергії, реалізація цієї програми дасть змогу задовольнити низку потреб у цих матеріалах, одночасно дотримуючись принципів Зеленої угоди [7]. Третім шляхом може бути більш широке впровадження біорозкладних матеріалів у складі комбінованої упаковки, наприклад, заміна пластикових елементів тари на екологічні покриття [3; 5].

Приклади успішних рішень у галузі переробки картонно-паперової тари реалізовані в ЄС, де середній рівень переробки паперової упаковки становить 85 %, із лідером у Фінляндії (94 %) [4]. З іншого боку глобусу знаходиться Південна Корея, де переробляється 90 % паперу, що є одним із найвищих показників у світі.

#### **5. Комбінована упаковка (тетрапак)**

Екологічні проблеми, пов'язані з використанням комбінованих матеріалів, полягають у складності її переробки. Матеріали зі складу комбінованої упаковки (папір, пластик, алюміній) потребують розділення на спеціалізованих заводах [6]. Крім того, частина країн, використовуючи комбіновані упаковки типу тетрапак, не мають можливості переробляти її, що пов'язано зі складністю й великою вартістю технології переробки комбінованої упаковки. В Україні такі підприємства є, але, на жаль, у недостатній кількості.

Можливі рішення щодо зниження негативного впливу на довкілля комбінованих матеріалів полягають у збільшенні інвестицій для проведення досліджень щодо здешевлення та більш масового впровадження технології. Залучення інвестицій дасть змогу також купувати сучасне обладнання для розділення різнорідних шарів матеріалу. Рішенням може бути й розробка та впровадження упаковки, яка, зберігаючи корисні властивості комбінованих матеріалів, виготовлялася з однорідного матеріалу, який легко піддається переробці. Однак мабуть нині найбільш актуальним для більшості країн є повернення комбінованої упаковки на завод-виробник для переробки й повторного використання.

Прикладом успішних рішень щодо утилізації комбінованої тари з мінімальною шкодою для навколишнього середовища є Швеція, у якій завдяки добре організованій системі збору рівень



переробки тетрапаку становить близько 70 %. До країн-лідерів у цій галузі можна зарахувати Німеччину, у якій переробляється близько 76 % комбінованої упаковки, завдяки наявності сучасних технологій [8].

Таблиця 1

Порівняльна таблиця рішень для нівелювання негативного впливу на довкілля різних видів тари по країнах світу

Тип упаковки	Країна-лідер	Рівень переробки, %	Основні рішення
Пластик	Німеччина	47 %	Сортування, перехід на біопластик
Скло	Швеція	94 %	Контейнери, нескінченна переробка
Метали	Бразилія	99 %	Збір банок, економія енергії
Папір	Фінляндія	94 %	Збір макулатури, екологічні покриття
Тетрапак	Німеччина	76 %	Спеціалізовані заводи, нові технології

Аналіз даних таблиці 1 свідчить, що найвищі показники переробки досягаються в країнах, де поєднуються розвинена інфраструктура збору, законодавче регулювання й економічна мотивація населення та бізнесу. Лідером за рівнем переробки є металева упаковка (Бразилія – 99 %), що пояснюється високою енергоефективністю вторинного алюмінію й налагодженою системою збору банок. Скляна та паперова тара також демонструють стабільно високі результати (Швеція – 94 % скла, Фінляндія – 94 % паперу) завдяки ефективним контейнерним системам і культурі сортування. Натомість пластик (Німеччина – 47 %) і комбінована упаковка типу тетрапак (Німеччина – 76 %) [1; 4; 8] мають нижчі показники через технологічну складність переробки та багатокомпонентність матеріалів. Отже, ефективність утилізації прямо залежить від технологічної простоти матеріалу, наявності спеціалізованих підприємств і комплексної державної політики, що стимулює сортування й повторне використання ресурсів.

Вплив COVID-19 на утилізацію пакувальної тари

Пандемія COVID-19 додала нових викликів у сферу утилізації відходів. Через підвищене споживання одноразових пакувальних матеріалів і засобів захисту (маски, рукавички тощо) значно зросли обсяги відходів. Це вимагає впровадження нових методів утилізації та підвищення ефективності існуючих систем.

*Висновки.* У статті з'ясовано, що утилізація пакувальної тари становить одну з ключових екологічних проблем, оскільки у світі 40–50 % твердих побутових відходів припадає саме на упаковку, тоді як в Україні рівень переробки не перевищує 5 %. Детально проаналізовано екологічні ризики для кожного виду матеріалу: пластик характеризується тривалим періодом розкладання й утворенням мікропластику; скло потребує енергоємного виробництва, але може перероблятися необмежену кількість разів з економією до 40 % енергії; переробка алюмінію дає змогу зменшити енергоспоживання на 95 % порівняно з первинним виробництвом; паперова тара пов'язана з вирубкою лісів і високими витратами води; комбінована упаковка типу тетрапак є складною через багатошаровість і високу вартість технологій розділення. Наведені приклади провідних країн (Німеччина – 47 % переробки пластику, Швеція – 94 % скла, Бразилія – 99 % алюмінієвих банок, Фінляндія – 94 % паперу) демонструють ефективність системного підходу.

Обґрунтовано, що ключем до вирішення проблеми є комплексна модель, яка поєднує розвиток інфраструктури сортування, інвестиції в сучасні технології, законодавче стимулювання виробників і формування культури відповідального споживання. Запропоновано конкретні інструменти: упровадження біорозкладних матеріалів (PLA), заборона одноразового пластику, створення спеціалізованих заводів для переробки комбінованої упаковки, розширення системи



контейнерного збору, цифрові рішення (смайт-контейнери, мобільні додатки), а також освітні програми для населення. Підкреслено, що без активної ролі держави в нормативному, економічному та просвітницькому забезпеченні навіть успішний міжнародний досвід не може бути повною мірою адаптований в Україні.

#### Список використаних джерел

1. Інноваційні технології та обладнання галузі. Переробка продукції тваринництва: посібник-практикум / К. О. Самойчук, С. В. Кюрчев, Н. О. Паляничка, В. О. Верхоланцева, С. В. Петриченко, О. О. Ковальов ; ТДАТУ. Мелітополь : Видавничо-поліграфічний центр «Forward press», 2020. 250 с.
2. Palianychka N., Verkholantseva V., Kovalyov A. Use of energy-efficient equipment in drinking milk technological line. *Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв* : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (24–25 листопада 2022 року). Харків : ДБТУ, 2022. С. 90–92.
3. Ковальов О. О., Самойчук К. О., Необхідні умови забезпечення конкурентоздатності України на світових ринках продуктів харчування. *Інтеграційні та інноваційні напрями розвитку харчової індустрії* : матеріали Шостої міжнародної науково-практичної конференції (3–4 листопада 2022 р). Черкаси : ФОП Гордієнко Є. І., 2022. С. 143–146.
4. Gruber E. S., Stadlbauer V., Pichler V., Resch-Fauster K., Todorovic A., Meisel T. C., Trawoeger S., Hollóczki O., Turner S. D., Wadsak W., Dick Vethaak A., Kennercorresponding L. To Waste or Not to Waste: Questioning Potential Health Risks of Micro- and Nanoplastics with a Focus on Their Ingestion and Potential Carcinogenicity. *Expo Health*. 2022. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9971145/>
5. Palianychka N., Samoichuk K., Kovalyov A. Application of computer simulation for researching the process of milk emulsion dispersion. *Інтеграційні та інноваційні напрями розвитку харчової індустрії* : матеріали Шостої міжнародної науково-практичної конференції (3–4 листопада 2022 року). Черкаси : ЧДТУ, 2022. С. 110–115.
6. UNEP Food Waste Index Report 2021. URL: <https://www.unep.org/resources/report/unep-food-waste-index-report-2021>.
7. Основи розрахунку та конструювання обладнання переробних і харчових виробництв : підручник / К. О. Самойчук, В. С. Бойко, В. О. Олексієнко та ін. ; ТДАТУ. Мелітополь : Вид. «ММД», 2020. 428 с.
8. Vitenko T., Marynenko N., Kramar I. European Experience in Waste Management. *Environ. Sci.Proc.* 2021. № 9. P. 17. DOI: <https://doi.org/10.3390/envirosciproc2021009017>

Дата першого надходження статті до видання: 29.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026

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



**A. Kovalyov, I. Panov**

*Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University*

## PROCESSES OF DISPOSAL OF VARIOUS TYPES OF PACKAGING CONTAINERS AND MATERIALS: ENVIRONMENTAL PROBLEMS AND SOLUTIONS

### Summary

The article examines the environmental challenges associated with the disposal of various types of packaging containers and materials and analyzes effective solutions aimed at reducing their negative impact on the environment. Packaging waste accounts for approximately 40–50 % of total solid household waste globally, while in Ukraine the recycling rate does not exceed 5 %, which highlights the urgency of implementing comprehensive waste management reforms. The study identifies the main ecological risks related to different packaging materials. Plastic packaging poses a significant threat due to its long degradation period and the formation of microplastics that enter food chains. Glass, although energy-intensive in production, can be recycled indefinitely with energy savings of up to 40 % compared to primary manufacturing. Aluminum recycling requires 95 % less energy than primary production,



making it one of the most efficient materials in circular economy systems. Paper and cardboard packaging are associated with deforestation and high water consumption, while composite materials such as Tetra Pak present technological and economic challenges due to their multilayer structure.

The article analyzes successful international practices, including Germany's high plastic recycling rates, Sweden's 94 % glass recycling rate, Brazil's 99 % aluminum can recycling performance, and Finland's 94 % paper recycling level. Innovative approaches are considered, such as the introduction of biodegradable materials (PLA), bans on single-use plastics, smart waste management systems, investment in specialized recycling facilities, and digital tools for improving waste collection efficiency.

It is concluded that effective packaging waste management requires an integrated approach combining legislative support, economic incentives, infrastructure development, technological innovation, and public awareness campaigns. Without strong state involvement and coordinated action between government, business, and society, sustainable waste sorting and recycling systems cannot be successfully implemented.

**Keywords:** packaging materials, microplastics, recycling, containers, circular economy systems, environmental.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-13>

УДК 662.8.055

В. П. Кувачов, д-р техн. наук, проф.

ORCID: 0000-0002-5762-256X

О. О. Червоткіна, асистент

ORCID: 0000-0002-6814-0566

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*

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

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ШВИДКОСТІ ПРЕСУВАННЯ НА ФІЗИЧНУ ЩІЛЬНІСТЬ БРИКЕТІВ ІЗ РІЗНОТИПНОЇ БІОМАСИ

*Анотація.* Робота зосереджена на експериментальному аналізі динамічного впливу швидкості пресування на фізичну щільність брикетів, виготовлених із трьох технологічно відмінних видів біомаси: лушпиння соняшнику, соломи та деревної тирси. Дослідження є актуальним для вдосконалення кінетики ущільнення різномірної сировини. Кількісно встановлено нелінійну залежність щільності від швидкості пресування, підтверджено, що раціональний режим є критичним для якості. Максимальні значення щільності для всіх матеріалів досягнуто в діапазоні 10–12 мм/с, що свідчить про ідеальний час для термопластичної консолідації. Відхилення в бік низької швидкості спричиняє локальне термічне перенапруження й деструкцію зв'язувальних компонентів, а надмірне зростання швидкості призводить до збільшення пружної післядії та падіння щільності через недостатність часу на релаксацію. Отримані результати забезпечують наукову основу для диференційованого встановлення раціональних швидкісних режимів у промисловому брикетуванні.

*Ключові слова:* щільність брикету, сировина, лігнін, швидкість пресування, температура.

*Постановка проблеми.* Виробництво твердого біопалива у формі брикетів із агропромислових і деревообробних відходів, включаючи лушпиння соняшнику, солому та деревну тирсу, є актуальним напрямом для підвищення енергетичної незалежності [1; 2]. Незважаючи на спільну мету, ці три види сировини мають кардинально відмінні фізико-хімічні властивості (волокнистість, уміст лігніну, фракційний склад і наявність олійних компонентів у лушпинні) [3]. Це призводить до неоднакової реакції на термомеханічне навантаження під час пресування. Наявні технологічні регламенти часто використовують уніфіковані режими, розроблені переважно для деревної тирси. Такий підхід не враховує динамічні реологічні характеристики лушпиння та соломи, що призводить до нестабільної якості кінцевого продукту, його низької механічної міцності й значної пружної післядії.

Ключова проблема полягає в недостатньому розумінні кінетики процесу ущільнення різномірної біомаси. Зокрема, вплив швидкості пресування на формування міцних міжчасткових зв'язків і фінальну щільність залишається малодослідженим у порівняльному аспекті [4]. Неконтрольована швидкість може спричинити локальний перегрів або, навпаки, недостатній час консолідації для кожного окремого типу сировини, що прямо впливає на енергоефективність процесу й експлуатаційний знос обладнання.

Таким чином, виникає науково-технічна необхідність у проведенні порівняльних експериментальних досліджень для встановлення кількісної залежності між швидкістю пресування та фізичною щільністю брикетів для кожного з трьох типів сировини, що дасть змогу розробити науково обґрунтовані рекомендації щодо диференційованої раціоналізації технологічних режимів.

*Аналіз останніх досліджень.* Сучасні наукові дослідження у сфері переробки біомаси на тверде біопаливо зосереджені на кінетиці процесу пресування й термомеханічних взаємодіях, які безпосередньо впливають на кінцеву щільність, механічну міцність та експлуатаційні характеристики брикетів. Аналіз опублікованих робіт свідчить про глибоку диференціацію



підходів, залежно від типу вихідної сировини – деревної, соломистої чи агропромислових відходів, таких як лушпиння соняшнику [5; 6]. Фізико-хімічна природа сировини є детермінуючим фактором, а процес брикетування є термопластичним явищем, в основі якого лежить пластифікація природних полімерів (лігніну, геміцелюлоз) під дією механічної енергії й тепла [7]. У роботах, що стосуються деревної тирси з високим умістом лігніну, дослідники встановили чіткий температурний поріг у 90–120 °С, при досягненні якого лігнін починає переходити у в'язку текучий стан, що є необхідною умовою для максимальної консолідації [8]. У разі дослідження соломистої біомаси з низьким умістом лігніну та високою волокнистістю ключовим обмежувальним фактором визнається пружна післядія, спричинена анізотропією волокон, тому наголошується на необхідності попереднього подрібнення для зниження внутрішніх напружень [9]. Стосовно лушпиння соняшнику вчені акцентують увагу на термодинамічній чутливості цієї сировини, оскільки жирові компоненти хоч і є природними пластифікаторами, але мають низьку термічну стабільність, що може призводити до передчасної деструкції та погіршення зв'язувальних властивостей при неконтрольованому нагріві [10; 11].

Останні роботи активно досліджують швидкість пресування як ключовий динамічний параметр, що контролює час релаксації матеріалу та локальний температурний режим. У наукових джерелах експериментально обґрунтовано, що функціональна залежність кінцевої фізичної щільності брикетів від швидкості пресування демонструє нелінійний, екстремальний характер. Зокрема, при низьких швидкостях збільшений час експозиції матеріалу в зоні ущільнення призводить до надлишкової акумуляції теплової енергії внаслідок дисипації сил тертя, що спричиняє локальне термічне перенапруження сировини [12]. Це викликає термічну деструкцію зв'язувальних елементів та інтенсивне пароутворення, що створює внутрішній тиск і, як наслідок, знижує кінцеву щільність [13]. Натомість при надмірно високій швидкості прискорений процес ущільнення скорочує час витримки під максимальним тиском, що є недостатнім для завершення віскоеластичних і пластичних деформацій [14]. Це призводить до неповної консолідації, збереження значних внутрішніх напружень і зростання коефіцієнта пружної післядії. Крім того, збільшення швидкості викликає зростання питомої енергоємності через інерційні навантаження, що є економічно недоцільним [15]. Сучасні дослідження використовують різні вимірювальні системи, такі як тензометричні датчики та високошвидкісні датчики переміщення, для отримання динамічних кривих у режимі реального часу, забезпечуючи надійну основу для моделювання й оптимізації процесу [16; 17]. Аналіз сучасних досліджень у галузі термомеханічного ущільнення біомаси дає підстави стверджувати про необхідності диференційованої оптимізації швидкості пресування задля запобігання ризику термічного перенапруження як при низьких швидкостях, так і недоущільнення при надмірно високих.

*Формулювання цілей статті (постановка завдання).* Метою наукової роботи є експериментальне дослідження й кількісне обґрунтування впливу швидкості пресування на фізичну щільність брикетів, виготовлених із різних видів сировини. Для реалізації поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання: визначити залежність кінцевої фізичної щільності брикетів від швидкості пресування при постійних, заздалегідь встановлених значеннях тиску, температури й вологості, установити кореляцію між швидкістю пресування та коефіцієнтом пружної післядії брикетів, оскільки швидкість впливає на час, відведений для релаксації матеріалу й виходу повітря. За результатами отриманих експериментальних даних сформулювати науково обґрунтовані рекомендації щодо вибору раціонального режиму швидкості пресування, який забезпечує максимальну щільність і стійкість паливних брикетів.

*Основна частина.* Метою цього етапу дослідження було кількісне визначення впливу швидкості пресування на фізичну щільність брикетів, виготовлених із різномірної біомаси: лушпиння соняшнику, соломи та деревної тирси. Експерименти проводилися на лабораторній



установці, що імітує процес високотемпературного пресування, яка оснащена системою прецизійних вимірювальних пристроїв: датчиками тиску, термопарами для контролю температури матриці й датчиком переміщення пуансона для точного контролю швидкості. Параметри тиску, температури та вологості зафіксовані на сталих значеннях, що дало значення ізолювати вплив швидкості як єдиної незалежної змінної. Фізична щільність кожного брикету вимірювалася ваговим методом після 24 годин охолодження для завершення процесу пружної післядії [18]. Вимірювання здійснювалося шляхом зважування брикету на високоточних вагах і визначення його геометричного об'єму за допомогою штангенциркуля з точністю 0,05 мм з подальшим розрахунком за формулою:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (1)$$

де  $m$  – маса брикету, кг;  
 $V$  – об'єм брикету, м<sup>3</sup>.

Обрані види біомаси являють собою матеріали з кардинально відмінною хімічною структурою та фракційним складом. Отримані дані дослідів, представлені в таблиці 1, виявили нелінійну залежність щільності від швидкості пресування для всіх досліджуваних матеріалів, підтверджуючи існування раціонального швидкісного режиму.

Таблиця 1

## Результати досліджень

Швидкість пресування, мм/с	5	10	15	20	25
Щільність паливних брикетів із лущиння соняшнику, т/м <sup>3</sup>	1,2	1,25	1,2	1,05	1,
Щільність паливних брикетів із соломи, т/м <sup>3</sup>	1,1	1,18	1,1	1,12	1
Щільність паливних брикетів із тирси, т/м <sup>3</sup>	1,2	1,25	1,2	1,2	1,1

Графічна залежність, отримана на основі експериментальних даних, представлена на рисунку 1.

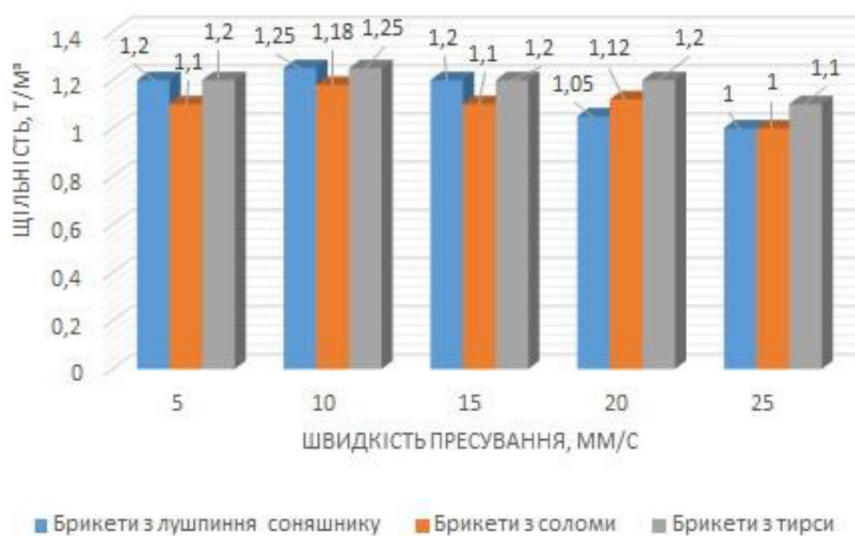


Рис. 1. Графік залежності щільності брикету від швидкості пресування

Низька швидкість пресування 5 мм/с характеризується тривалим часом експозиції матеріалу під дією максимального тиску. Хоча триваліший час теоретично сприяє повноцінній пластичній релаксації та дегазації, на практиці спостерігається зниження щільності порівняно з раціональним режимом [19; 20]. Цей феномен пояснюється термодинамічними ефектами. Трива-



лий контакт матеріалу зі стінками матриці в зоні ущільнення спричиняє локальний перегрів сировини. Перевищення критичної температури призводить до часткової термічної деструкції та зниження в'язкості природних зв'язувальних компонентів. Для лушпиння соняшнику, так як це дрібнодисперсна фракція з умістом олій, погіршуються адгезійні властивості матриці. Також тривалий нагрів викликає інтенсивне внутрішнє пароутворення, яке створює контриск і перешкоджає ефективному механічному ущільненню, що призводить до зниження кінцевої щільності. Деревна тирса, завдяки оптимальному середньо-дисперсному фракційному складу й високій температурній стійкості лігніну, виявилася менш чутливою до цього ефекту.

Режим 10 мм/с забезпечив максимальну фізичну щільність для всіх трьох видів біомаси: лушпиння – 1,25 т/м<sup>3</sup>, тирса – 1,25 т/м<sup>3</sup>, солома – 1,18 т/м<sup>3</sup>. Цей режим являє собою технологічний оптимум, де досягається ідеальний баланс між кінетикою процесу й термопластичною механікою. Цей режим пресування забезпечує повну деформацію частинок і мінімізацію внутрішніх порожнин, а енергія тертя й зовнішній нагрів досягають температури активації лігніну без їх деструкції. Дослід показав, що повітря та надлишкова пара встигають вийти з об'єму матеріалу, а дрібнодисперсна фракція лушпиння й середньо-дисперсна фракція тирси досягають максимального коефіцієнта стискання, що сприяє формуванню монолітної структури.

Збільшення швидкості пресування до 15 мм/с призвело до часткового зниження щільності брикету з лушпиння соняшнику та соломи. Основною причиною зниження щільності є скорочення часу витримки під максимальним тиском, що є недостатнім для повного завершення релаксаційних процесів. Швидке стиснення призводить до акумуляції внутрішніх пружних напружень, викликає значне зростання коефіцієнта пружної післядії після виходу брикету з матриці, зумовлює зниження кінцевої фізичної щільності брикетів. Волокниста структура соломи виявилася найбільш чутливою до цієї динамічної нестачі часу, оскільки вимагає тривалішого часу для реорієнтації волокон. Деревна тирса зберігає високу щільність 1,2 т/м<sup>3</sup>, підтверджуючи її релаксаційну стійкість у ширшому швидкісному діапазоні. Режими швидкості пресування більше за 20 мм/с демонструють критичне зниження якості брикетів, особливо для лушпиння  $\rho = 1,0$  т/м<sup>3</sup> та соломи  $\rho = 1,0$  т/м<sup>3</sup>. Це зниження є наслідком недостатнього часу, відведеного для ущільнення й активації зв'язувальних, що унеможливує формування стійких міжчасткових зв'язків. Крім того, висока швидкість призводить до інтенсивного внутрішнього тертя, створює умови для формування мікрodefektів і повітряних включень, які не встигають вийти з об'єму матеріалу.

*Висновки.* Експериментальне дослідження кількісно підтвердило, що швидкість пресування є критичним динамічним параметром, який визначає ефективність ущільнення брикетів із різнорідної біомаси. Установлено, що для лушпиння соняшнику, соломи та деревної тирси існує технологічний раціональний режим швидкості в діапазоні 10–12 мм/с, який забезпечує досягнення максимальної фізичної щільності завдяки оптимальному балансу між часом для термопластичної консолідації та пластичної релаксації. Відхилення в бік низької швидкості менше ніж 5 мм/с призводить до зниження щільності через локальний перегрів і термічну деструкцію зв'язувальних речовин, тоді як висока швидкість більша за 15 мм/с викликає різке падіння щільності внаслідок недостатності часу консолідації та значного зростання пружної післядії. Таким чином, для забезпечення максимальної якості продукту й раціонального використання енергії жорсткий контроль швидкості пресування в установленому раціональному діапазоні є обов'язковим.

**Список використаних джерел**

1. Хіврич О. Б. Енергетичні рослини як альтернатива традиційним видам палива. *Агробіологія*. 2011. Вип. 6. С. 153–157.
2. Гелетуша Г. Г. та ін. Аналіз можливостей виробництва і споживання паливних брикетів з біомаси сільськогосподарського походження в Україні. Частина 2. *Теплофізика та теплоенергетикам*. 2019. Т. 41, № 1. С. 67–73.
3. Ткачук Р. А., Заєць, Л. М. Технологія виробництва біопалива з відходів сільського господарства. *Аграрна наука та виробництво*. 2017. № 1(18). С. 78–83.
4. Говоруха В. Б., Луц П. М., Кисельов О. В. Результати лабораторних досліджень процесу виготовлення паливних брикетів з ріпакової соломи. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2023. № 2. С. 23–31.
5. Mani S., Tabil L., Sokhanshaj S. Effects of compressive force, size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. *Biomass and Bioenergy*. 2006. Vol. 30, № 7. P. 648–654.
6. Кіндзера Д. П., Атаманюк В. М. та ін. Дослідження процесу формування паливних брикетів із рослинної сировини та визначення їх характеристик. *Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України*. 2013. Вип. 23. С. 138–146.
7. Говоруха В. Б., Луц П. М., Кисельов О. В. Фізико-математична модель процесу пресування паливних брикетів з рослинних матеріалів. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. № 3(110). С. 67–74.
8. Пурдик В. П. Обґрунтування основних експлуатаційних параметрів обладнання для виробництва паливних брикетів. *Тези доповідей, на 12-му Міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків у Львові*. Львів, 2015. С. 73–74.
9. Kang Y. S., Spillman C. K., Steele J. L., Chung D. S. Mechanical Properties of Wheat. *Transactions of the ASAE*. 1995. № 38(2). P. 573–578.
10. Атаманюк В.М. Сушіння подрібнених стебел сояшника в умовах фільтрації теплоносія. *Сучасні технології та обладнання харчових виробництв* : збірник тез доп. Міжнар. наук.-техн. конф. Тернопіль, 2011. С. 188.
11. Rindyuk D. V. The method of determination of the optimal parameters of dispersed materials granulation through consolidation. *Food and Environment Safety. Journal of Faculty of Food Engineering, Ștefan cel Mare University*. 2012. Vol. XI, Iss. 2. P. 15–18.
12. Бурдяк В. М. Брикетування відходів деревини та сільського господарства. *Технологія та обладнання*. Вінниця : ВНТУ, 2018. С. 120–135.
13. Лук'янець В. О. та ін. Вплив параметрів ущільнення рослинної біомаси на показники якості біопаливних брикетів. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2014. Вип. 99, Т. 2. С. 103–113.
14. Ярмлюк М. В., Романюк І. П. Дослідження процесу брикетування біомаси під високим тиском. *Промислова теплотехніка*. 2019. № 41(2). С. 70–76.
15. Тверде біопаливо: технологічні вимоги, властивості компонентів та технологія виробництва. *Агробізнес сьогодні*. № 19. С. 290.
16. Єременко О. І., Василенков В. Є., Руденко Д. Т. Дослідження процесу брикетування біомаси шнековим механізмом. *Інженерія природокористування*. 2020. № 3(17). С. 15–22.
17. Бойко В. С., Самойчук К. О., Тарасенко В. Г., Паляничка Н.О. та ін. *Процеси і апарати. Серія «Механічні та гідромеханічні процеси»*. Київ : Проф-Книга, 2021. С. 468.
18. Markowski M., Żuk-Gołaszewska K., Kwiatkowski. D. Influence of variety on selected physical and mechanical properties of wheat. *Industrial Crops and Products*. 2013. № 47. 113–117.
19. ДСТУ EN ISO 17831-1:2022 (EN ISO 17831-1:2015, IDT; ISO 17831-1:2015, IDT). Біопаливо тверде. Визначення механічної міцності пелет і брикетів. Частина 1.
20. ДСТУ 7124:2009. Лушпиння сояшникове пресоване гранульоване. Технічні умови.

Дата першого надходження статті до видання: 20.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026

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



**V. Kuvachov, O. Chervotkina***Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University***STUDY OF THE EFFECT OF PRESSING SPEED ON THE PHYSICAL DENSITY OF BRIQUETTES MADE FROM DIFFERENT TYPES OF BIOMASS*****Summary***

This work focuses on the experimental analysis of the dynamic influence of pressing speed on the formation and final physical density of briquettes made from three technologically different types of biomass: sunflower husks, straw, and wood sawdust. The research is relevant for improving the kinetics of compacting heterogeneous raw materials and increasing the overall efficiency of production processes, taking into account the unique chemical composition of each material.

A nonlinear dependence of density on pressing speed has been quantitatively established, confirming that the optimal speed regime is a critical determining parameter for the quality of the final product. The maximum density values for all materials studied were achieved in a narrow range of 10–12 mm/s, indicating the achievement of the ideal time required for complete thermoplastic consolidation and effective air removal (degassing).

A detailed analysis of deviations revealed that movement towards a low speed of less than 5 mm/s causes local thermal overstressing of the material. Prolonged contact with the matrix leads to excessive friction, causing destruction of the binding components (especially oil fractions in the husk) and intense steam formation, which creates internal counter pressure, significantly reducing the final density. On the other hand, an excessive increase in speed of more than 15 mm/s leads to a critical drop in density and an increase in the elastic aftereffect coefficient due to insufficient time to complete viscoelastic relaxation and the formation of strong interparticle bonds.

The results obtained provide a scientific basis for the differentiated establishment of rational speed regimes in industrial briquetting, which will minimize energy costs, reduce equipment wear, and ensure consistently high quality of the final biofuel. This increases the economic feasibility of biomass processing.

**Keywords:** briquette density, raw materials, lignin, pressing speed, temperature.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-14>

УДК 515.2

О. Є. Мацулевич, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-5553-709X

І. Р. Тетервак, асистент

ORCID: 0009-0009-0616-8983

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*

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

## ВЕРСТАТНЕ ПРИСТОСУВАННЯ ДЛЯ ОБРОБКИ ЧЕРВ'ЯЧНИХ ВАЛІВ ДЛЯ ВУЗЛІВ ТА АГРЕГАТИВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ

*Анотація.* Упровадження групових методів обробки за наявності добре укомплектованої бази механізації та випуску уніфікованих деталей дає змогу здійснити часткову або повну автоматизацію всього робочого циклу виробу. Такі методи можуть використовувати навіть заводи з дрібносерійним типом виробництва завдяки використанню сучасних програмних модулів для розробки технологічних процесів.

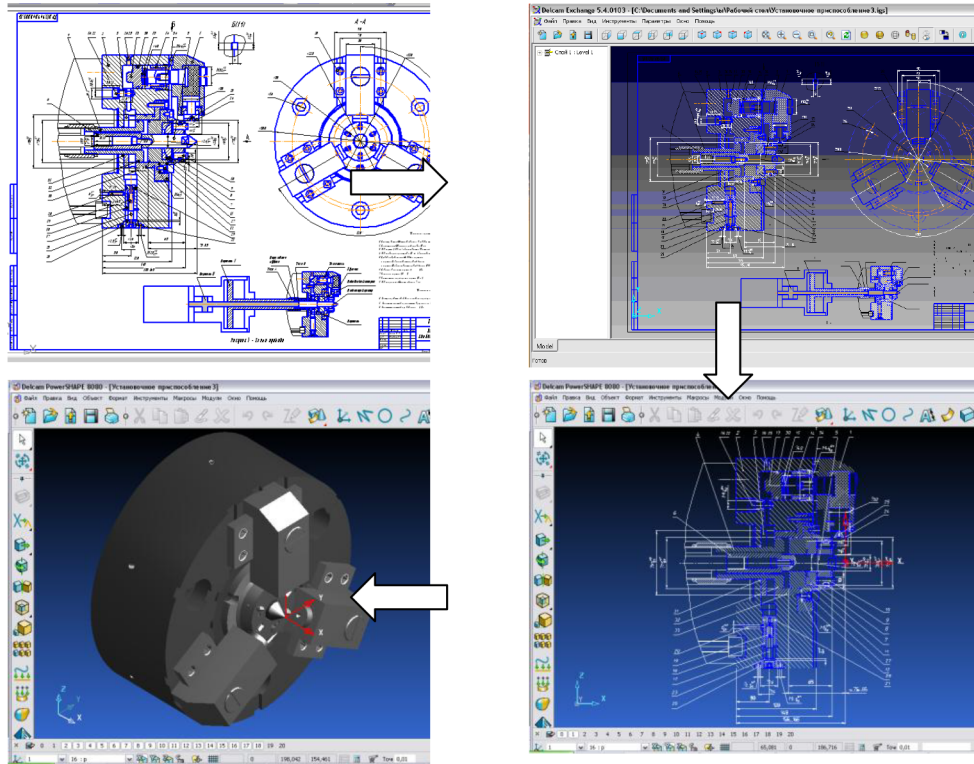
У роботі особливу увагу приділено компоненту технологічної системи – пристосуванню. На відміну від верстата, пристосування (для конкретної деталі, що входить до групи) матиме варіанти виконання. У технолога під рукою має бути база електронних моделей групових пристосувань, що переналагоджуються. Пристосування як компонент ТЗ здійснює геометричний зв'язок між верстатом і деталлю. Водночас 3D-модель пристосування виконує низку функцій: є основним носієм інформації про геометрію виробу, може описувати завантаженість робочої зони й дає змогу провести аналіз зіткнень рухомих частин технологічної системи, а головне, найефективніше й найточніше орієнтувати деталь.

*Ключові слова:* багатофункціональний верстат, груповий метод організації виробництва, груповий технологічний процес, пристосування, комбінований патрон, черв'як.

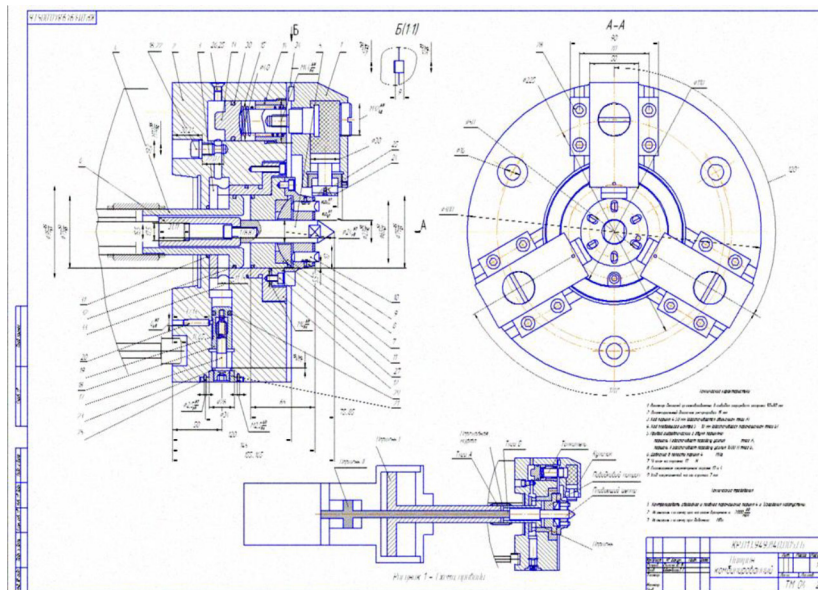
*Постановка проблеми.* Сучасний рівень машинобудівного виробництва характеризується широким застосуванням верстатів з ЧПК. При цьому максимальної ефективності можна досягти за рахунок високої концентрації технологічних операцій на одному робочому місці за одну установку деталі. Для цього купують дорогі багатофункціональні верстати, що мають чотири й більше керуючих осей. Вартість однієї години роботи такого обладнання перевищує тисячу гривень. Ця обставина викликає потребу в підвищенні якості технологічної підготовки виробництва. Скорочення простоїв верстатів з організаційно-технічних причин можна досягти за рахунок застосування групового методу організації виробництва. Суть групового методу обробки полягає у виготовленні продукції за умови об'єднання складових виробу в групи, для кожної з яких застосовні однорідні (групові) технологічні операції й загальне (групове) технологічне оснащення, яке швидко переналаштовується. Розробка групового технологічного процесу починається зі створення комплексної деталі (збірки). Вона являє собою реальну (найскладніша в цій групі) або умовну (спроектована як сукупність геометричних елементів) деталь групи. Таким чином, після проектування такого технологічного процесу (для комплексної деталі) можна виготовити будь-яку деталь із цієї групи.

*Аналіз останніх досліджень і формулювання мети статті (постановка завдання).* За готовими креслениками комбінованого патрона проектується 3D-модель пристосування. Імпорт креслень не забезпечує точного передавання всіх допоміжних ліній, але для створення 3D-моделі це необов'язково. Загальна схема отримання моделі наведена на рисунку 1.

Для обробки черв'яків в умовах серійного виробництва на токарних обробних центрах доцільно застосовувати як установче пристосування комбінований патрон: трикулачковий гідравлічний і повідковий штирковий патрон (рис. 2).



**Рис. 1. Загальна методика проєктування 3D-моделі**



**Рис. 2. Кресленик комбінованого патрона**

Під час закріплення черв'яка кулачками досягається висока радіальна жорсткість за великого переданого крутного моменту, що дає змогу проводити операції фрезерування, а під час закріплення в штирковому патроні дає змогу обробити контур черв'яка з одного установлення, у такий спосіб забезпечується сталість і поєднання технологічної та виміральної баз. Деталь черв'яка базовим діаметром установлюється в кулачки й підтискається центром (рис. 3).

У патрона два виконавчі елементи – кулачки (від 3 до 6) і повідковий штирковий патрон, який потрібен для закріплення черв'яка на остаточному етапі токарного оброблення, що характеризується незначними зусиллями різання. Оскільки деталь черв'яка обробляється на токарному

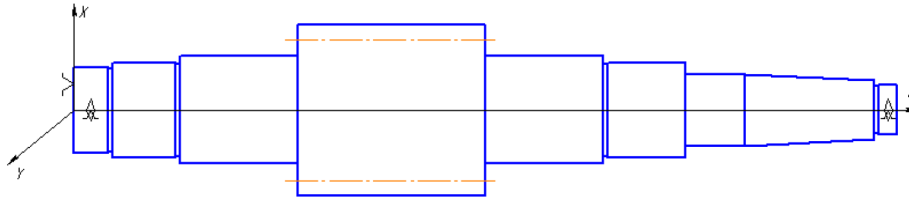


Рис. 3. Схема базування черв'яка в пристосуванні

обробному центрі, то повідковий патрон забезпечує осьову жорсткість і сталість зусилля закріплення, що є сприятливим фактором для фрезерування шпонкових пазів. Необхідне зусилля закріплення повідковим патроном сприймається від другої тяги пневмоциліндра.

*Основна частина.* Розроблене пристосування використовується в серійному виробництві для встановлення й закріплення тіл обертання, що обробляються на токарних обробних центрах. Пристосування переналаштовується для закріплення деталей типу валу різного діаметра за допомогою гідроциліндра, убудованого в патрон, за допомогою перерозподілу тиску в системі й комплекту змінних налагодок для кулачків. Для затиску деталі слугують три силові вузли, що діють від пневмогідралічного приводу (гідралічна частина вмонтована в корпус патрона). Вузли складаються з двох частин гайки і втулки, гайка взаємодіє з кулачками через гвинт, який, штовхаючи втулку, передає тиск через шар гідропласту на рухомий шток кулачка, що контактує з поверхнею заготовки. Надлишковий тиск у гідралічній системі створюється поршнем, який приводиться в дію від пневматичного приводу. Для попереднього затиску заготовки слугує гвинт, що переміщує під час прикручування поршень. Для сталості зусилля притиснення центром слугує другий шток, що взаємодіє зі штирковим центром.

Комбінований патрон складається з двох складальних вузлів: штиркового повідкового патрона й гідралічного кулачкового патрона. Тому процес створення 3D-моделі умовно поділений на два етапи: моделювання повідкового патрона; моделювання гідралічного патрона. Конструкція патрона вимагала ретельного опрацювання окремих елементів, тому процес проектування здійснювався за допомогою роботи з поверхнями. Для зручності роботи побудову формотворчих поверхонь варто вести в різних шарах.

Так само як і проектування пристосування, процес створення моделі починається від деталі, що контактує із заготовлею – центру. На кресленні з роздільних ліній створюється контур центру, після цього створюється тіло обертання (рис. 4), формуються пази на бічній поверхні центру і створюється різбовий отвір під гвинт (рис. 5).

Майже всі деталі пристосування являють собою тіла обертання, тому вони мають загальну послідовність моделювання:

- створення контуру з роздільних ліній (твірна для тіла обертання);
- створення тіла обертання;
- створення конструктивних елементів (вирізи, похилі поверхні, отвори, фаски, заокруглення, пази, об'єднання з примітивами).

Така методика побудови 3D-моделі (рис. 5) дає змогу значно скоротити час проектування. Достатньо одного разу розробити 3D-модель виробу й користуватися ним у подальших проєктах.

Асоціативний зв'язок конструкторської моделі (ескіз, креслення) і 3D-моделі оснащення забезпечує безпомилкове й швидке внесення змін. Щойно конструктор закінчить ескізне проектування деталі, технолог одразу зможе використовувати її для проектування підготовки виробництва.

Подальші уточнення й зміни, які виконує конструктор, не вимагатимуть від технолога повторного моделювання. Відповідні зміни поширюватимуться автоматично. На відміну від паперової технології, не обов'язково чекати повного завершення проектування пристосування для передання її технологам. Унесення змін у конструкцію 3D-моделі пристосування для кон-

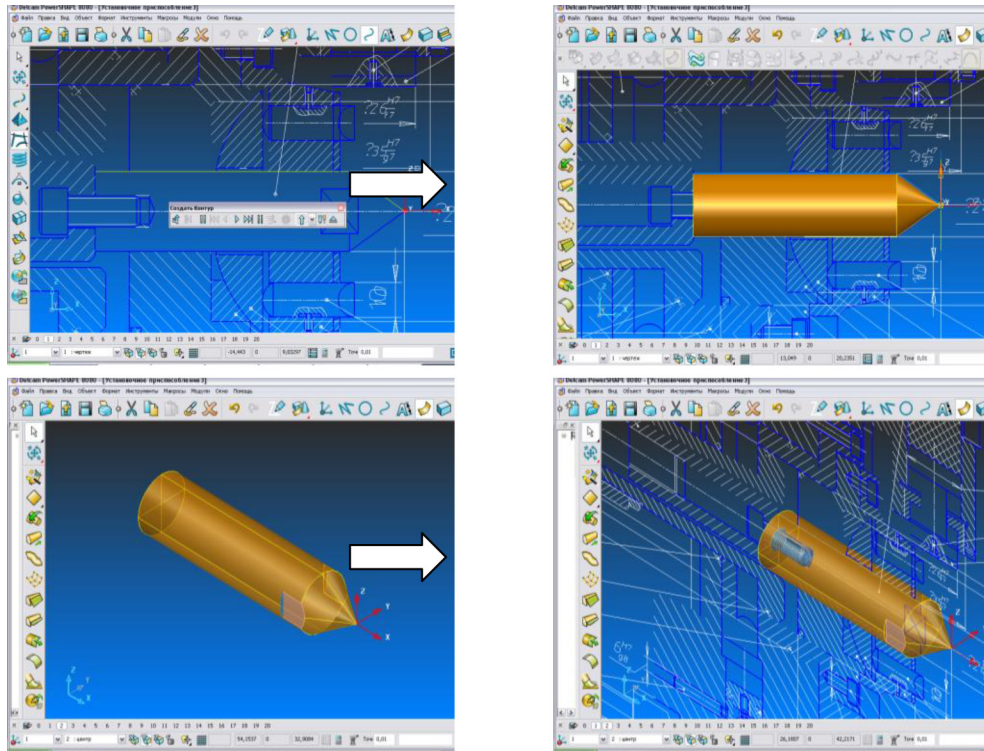
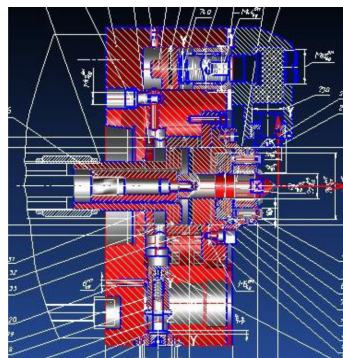
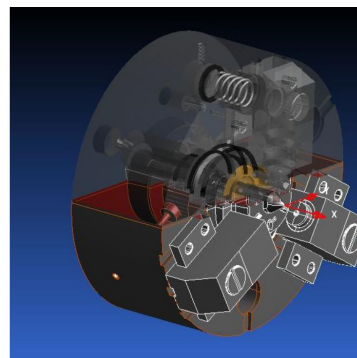


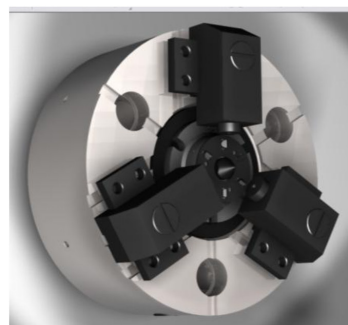
Рис. 4. Створення базового тіла обертання та послідовність моделювання центру



а



б



в

Рис. 5. Готова 3D-модель комбінованого патрона:  
а, б – відображення 3D-моделі з використанням динамічного перетину;  
в – фотореалістичне відображення пристосування



кретної деталі, що входить до групи, дає змогу значно скоротити час проектування, усунути нестикування оснащення з деталлю, скоротити зусилля, необхідні для внесення змін у моделі оснащення під час зміни деталі, мінімізувати підготовчо-заклучний час для налаштування верстата, а отже, підвищити ефективність виробництва.

**Висновки.** Щоб витримати досить жорстку конкуренцію, підприємству необхідно мати широкий вибір виробів, уміти орієнтуватися на ринку й швидко налагодити виробництво необхідного асортименту продукції. В умовах застосування групових технологій обробки це можливо лише за комплексного застосування групових підходів проектування з використанням сучасних автоматизованих засобів проектування, що дають змогу створити будь-який виріб і запустити виріб у серію в найкоротші терміни. Тому виникає потреба у створенні 3D-моделей пристосувань, але ці моделі мають бути виділені в самостійні групи. Застосування групових пристосувань дає змогу мінімізувати підготовчо-заклучний час, пов'язаний із налаштуванням верстата.

### Список використаних джерел

1. Мацулевич О. Є., Дереза О. О., Тетервак І. Р. Використання CAD-системи UNIGRAPHICS для технологічної підготовки виробництва корпусних деталей. *Удосконалення освітньо-виховного процесу в закладі вищої освіти* : збірник науково-методичних праць ТДАТУ. 2023. Вип. 26. С. 166–175.
2. Мацулевич О. Є. Застосування спеціалізованої PLM-системи Technologi CS при розробці автоматизованої системи ведення конструкторсько-технологічних баз даних підприємства сільськогосподарського машинобудування. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету* : наукове фахове видання / ТДАТУ. Запоріжжя : ТДАТУ, 2024. Вип. 24, Т. 1. DOI: 10.32782/2078-0877-2024-24-1-13
3. Програмування автоматизованих процесів обробки деталей : навчально-методичний посібник ; лабораторний практикум / Ю. О. Дмитрієв, О. Є. Мацулевич, Є. А. Гавриленко, Ю. В. Холодняк, Г. В. Антонова. Мелітополь, 2022. 170 с.
4. Мацулевич О. Є., Щербина В. М., Залевський С. В. Автоматизація процесу геометричного моделювання робочих поверхонь насадок для фонтанів. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2019. Вип. 8, Т. 1. С. 55–68.
5. Мацулевич О. Є., Зінов'єва О. Г. Розв'язання задач аналізу тренд-сезонних часових рядів. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2019. Вип. 19(2). С. 264–270.
6. Вершков О. О., Мацулевич О. Є., Тетервак І. Р., Супрун М. В. Моделювання кулачків зубозаточувальних верстатів. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Запоріжжя : ТДАТУ, 2025. Вип. 25, Т. 2. С. 106–110.
7. Мацулевич О. Є., Вершков О. О., Чаплінський А. П., Супрун М. В. Моделювання зубного мосту в пакеті програм DENTCAD. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Запоріжжя : ТДАТУ, 2025. Вип. 25, Т. 2. С. 134–140.
8. Alrefo I. F., Rawashdeh M. O., Matsulevych O., Vershkov O., Halko S., Suprun O. Designing the functional surfaces of camshaft cams of internal combustion engines. *Naukovy Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2024. № 3. P. 72–78. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-3/072>
9. Alrefo I. F., Matsulevych O., Vershkov O., Halko S., Suprun O., Miroshnyk O. Designing the working surfaces of rotary planetary mechanisms. *Naukovy Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2023. № 4. P. 82–88. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-4/082>. ISSN 2071-2227, E-ISSN 2223-2362. (Q3).
10. Дереза О. А., Антонова Г. В., Тетервак І. А., Валієва К. М. Аналітичні дослідження методики інтелектуального аналізу даних. *Розвиток сучасної науки та освіти: реалії, проблеми якості, інновації* : матеріали IV Міжнар. наук.-практ. конф. (Запоріжжя, 29–31 травня 2023 р.). Запоріжжя : ТДАТУ, 2023. С. 147–153.
11. Гавриленко Є. А., Холодняк Ю. В., Мірошніченко М. Ю. Алгоритм моделювання одновимірних обводів за заданими умовами. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2022. Вип. 12, Т. 1. № 22.
12. Івженко О. В., Антонова Г. В. Реверс інжиніринг та виготовлення складної тривимірної поверхні. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2022. Вип. 12, Т. 1. № 23.
13. Михайленко О. Ю., Антонова Г. В. Технологія формоутворення елементів каркасу динамічної поверхні. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2022. Вип. 12, Т. 2. № 26.



14. Холодняк Ю. В., Гавриленко Є. А. Розв'язання позиційних задач при моделюванні монотонних кривих ліній. *Сучасні проблеми моделювання*. 2022. Вип. 24. С. 173–181.
15. Вершков О. О., Бондаренко Л. Ю., Антонова Г. В., Тетервак І. Р. Аналіз дослідної експлуатації програмного модулю розрахунку норм часу обробки деталей сільськогосподарської техніки. *Сучасні комп'ютерні та інформаційні системи і технології* : матеріали III Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф. (Запоріжжя, 12–19 грудня 2022 р.). Запоріжжя : ТДАТУ, 2022. С. 94–100.
16. Холодняк Ю. В., Гавриленко Є. А. Моделювання кривих ліній з заданою точністю. *Інноваційні технології в агропромисловому комплексі* : матеріали II Всеукраїн. наук.-практ. інтернет-конференції. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. С. 28–31.
17. Мацулевич О. Є., Михайленко О. Ю., Супрун М. В. Дискретна інтерполяція спіралеподібних дискретно представлених кривих на основі нелінійного закону зміни кутів суміжності. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2025. Вип. 15, Т. 2.
18. Вершков О. О., Мацулевич О. Є., Михайленко О. Ю., Тетервак І. Р. Програмний модуль «База інженерних знань для структурного синтезу газодувки». *Науковий вісник ТДАТУ*. 2025. Вип. 15, Т. 2.
19. Дереза О. О., Мацулевич О. Є., Вершков О. О., Чаплінський А. П. Автоматизація проектування технологічних процесів виготовлення різьбонарізного інструменту на прикладі плашки. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2025. Вип. 15, Т. 2.

*Дата першого надходження статті до видання: 16.01.2026*

*Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.02.2026*

*Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026*

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



**O. Matsulevych, I. Tetervak**

*Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University*

## **MACHINE TOOL FOR PROCESSING WORM SHAFTS FOR ASSEMBLIES AND UNITS OF AGRICULTURAL MACHINERY**

### **Summary**

The main trend in modern mechanical engineering is to ensure competitiveness, which involves increasing efficiency by reducing design and manufacturing times, reducing costs, improving the operating parameters of machines and structures, reducing their material and energy consumption, and improving quality.

In order to meet market requirements, the process of design, technological and organisational preparation of production must be considered systematically (as a complex system of interrelated organisational, design, calculation and technological software tools at all stages of the project).

The introduction of group processing methods, with a well-equipped mechanisation base and the production of standardised parts, makes it possible to partially or fully automate the entire working cycle of a product. Such methods (techniques) can be used even by factories with small-batch production. This is possible thanks to the use of modern software modules for the development of technical processes, with their help it is possible to organise any type of production – from serial to mass.

In this work, special attention is paid to a component of the technological system – the fixture. Unlike a machine tool, a fixture (for a specific part belonging to a group) will have different design options. The technologist should have at hand a database of electronic models of group fixtures that can be reconfigured. As a component of the technological system, the fixture provides a geometric connection between the machine tool and the part. At the same time, the 3D model of the fixture performs a number of functions: it is the main carrier of information about the geometry of the product, can describe the workload of the working area and allows you to analyse collisions of moving parts of the technological system, and most importantly, allows you to orient the part most efficiently and accurately. The development involves the creation of a 3D model of the fixture, on the basis of which it is possible to quickly design a new fixture (reconfiguration) for installing a specific part.

**Keywords:** multifunctional machine tool, group method of production organisation, group technological process, fixture, combined chuck, worm gear.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-15>

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 ім. Дмитра Моторного*

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

## ЕКСПЛУАТАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНА ОЦІНКА ТРИМАШИННОГО ПОСІВНОГО МТА

*Анотація.* Одним із перспективних напрямів сільгоспмашинобудування є розроблення тримашинних (тримодульних) посівних комплексів. У запропонованого агрегату такого спрямування енергетичною основою є орно-просапний трактор, налаштований на реверсивний варіант руху. До його переднього навісного механізму з допомогою напівнавісної зчіпки приєднують дві бокові причіпні сівалки. Третю (центральну) посівну машину причіплюють до заднього навісного механізму трактора. У статті подано результати оцінювання техніко-експлуатаційних показників роботи такого агрегату. Установлено, що процес агрегування трактора зі зчіпкою і трьома причіпними сівалками два механізatori реалізують за 0,80 години, тобто за 48 хвилин. Продуктивність роботи нового агрегату за 1 год основного часу порівняно з базовим МТА більша на 32,4 %. Досягнуто це за рахунок більшої (у 1,5 раза) робочої ширини захвату. Змінна продуктивність роботи в нового посівного МТА щодо базового вища на 40,4 %. Такий результат досягнуто за рахунок більшого (на 6,3 %) значення коефіцієнта використання часу зміни новим посівним агрегатом. Це перевага зумовлена більшим (на 6,6 %) значенням коефіцієнта робочих ходів. Остання обставина, своєю чергою, є результатом значно менших витрат новим посівним часу на повороти. Питомі витрати пального новим МТА виявилися меншими на 21,6 % порівняно з агрегатом базовим.

*Ключові слова:* причіпна сівалка, поворот, показник поворотності, працеемкість, продуктивність роботи, питомі витрати пального.

*Постановка проблеми.* Сучасні посівні машинно-тракторні агрегати (МТА) можна розділити на одномашинні (одномодульні), двомашинні (двомодульні) і тримашинні (тримодульні). Перші, які складаються із трактора й причіпної/навісної сівалки, є найбільш дослідженими, а тому найбільш розповсюдженими. Двомодульні МТА складаються в основному з причіпної зчіпки та причіпних сівалок. Агрегати такої схеми вивчені менше. Ще рідше зустрічаються тримодульні посівні комплекси. Хоча, як показують дослідження й практика [1], саме вони репрезентують найбільш актуальний напрям у галузі посівної техніки. Їх енергетичною основою є трактор з переднім і заднім навісними механізмами, а також передніми керованими колесами. До одного (переднього) із навісних механізмів приєднується напівнавісна зчіпка, а до другого (заднього) – центральна причіпна сівалка. Бокові сівалки приєднуються до зчіпних пристроїв напівнавісної зчіпки.

Однією з проблем такого посівного машинно-тракторного агрегату є здійснення повороту таким чином, щоб запобігти зіткненню бокових причіпних сівалок із колісним енергетичним засобом. Згідно з розробленою робочою гіпотезою, розв'язок цієї проблеми можна забезпечити шляхом налаштування трактора на реверсивний хід. Бокові причіпні сівалки агрегуються при цьому таким чином, щоб осі їх коліс знаходилися на одній лінії з передніми неповоротними рушійними енергетичного засобу.

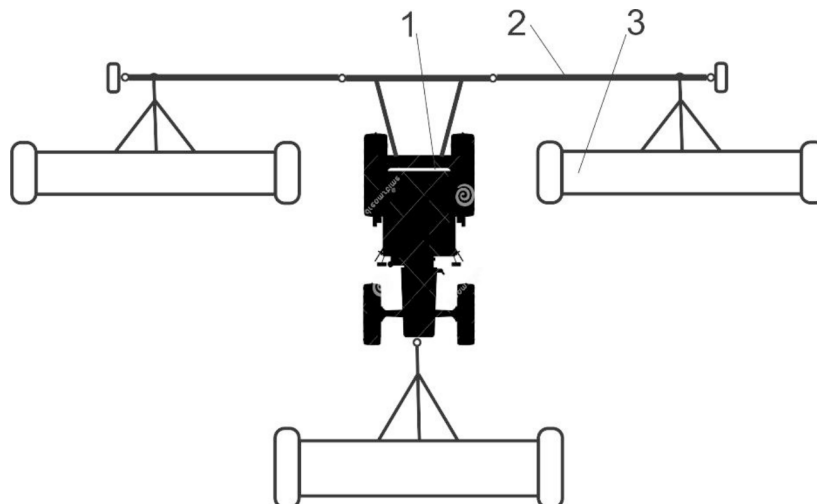
Практичне упровадження такого досить складного конструктивного рішення вимагає обґрунтованого вибору схеми й параметрів тримашинного посівного агрегату. Останнє пов'язано з проведенням низки як теоретичних, так і експериментальних досліджень.

*Аналіз останніх досліджень.* Наголосимо, що конкретних досліджень щодо вирішення проблем для таких посівних машинно-тракторних агрегатів украї недостатньо. Найвні ж приклади демонструють техніко-економічну ефективність тримодульних МТА, складених за допомогою напівнавісних зчіпок [2], причому як при задньому шеренговому, так і при бічному розташуванні машин щодо трактора. Поряд із цим оцінено мостову схему з'єднання трьох сівалок із двома тракторами. Проте якихось досліджень, що стосуються кінематики, а тим більше динаміки повороту таких МТА, немає. А це робить досить проблематичним вирішення питання обґрунтованого вибору їх конструктивних параметрів.

На практиці застосовується тримодульний агрегат для скошування трав у валки. Від складається із самохідного засобу, фронтальної та двох бічних косарок [3]. Однак результатів досліджень кінематики або динаміки як за робочого руху, так і за здійснення ним повороту в інформаційних джерелах не виявлено.

У роботі [4] описано конструкцію тримодульного посівного комплексу з бічним розташуванням двох навісних сівалок. Але автори надають лише конструкцію агрегату. Ні кінематику, ні динаміку руху на поворотній смузі вони не розглядають.

З огляду на це, нами розроблено тримодульний посівний агрегат у складі налаштованого на реверсивний варіант руху трактора, напівнавісної зчіпки та причіпних сівалок (рис. 1).



**Рис. 1. Дослідний посівний агрегат:**  
1 – трактор ХТЗ-16131; 2 – зчіпка; 3 – сівалка СЗ-3,6

Дві з них є бічними, а одна центральною. Бічні причіпні сівалки приєднуються до зчіпки, що навішується на задній навісний механізм трактора. При його реверсивному русі цей навісний механізм разом із зчіпкою та двома сівалками є переднім. Третя причіпна зернова сівалка приєднується до розташованого позаду переднього навісного механізму трактора. У результаті утворюється компактний посівний агрегат нової схеми, що характеризується відносно малою кінематичною довжиною при великій ширині його захвату.

Однак у процесі повороту такого МТА існує можливість зіткнення коліс передніх бічних сівалок з колесами трактора. У зв'язку з цим нами теоретично обґрунтовані такі параметри посівного агрегату, які унеможливають контакт коліс бічних сівалок із колесами реверсивно налаштованого трактора при русі на поворотній смузі [5; 6]. Практично оцінена достовірність здійснення безпечного повороту нового тримодульного МТА та розроблено практичні рекомендації щодо вибору конструктивних параметрів тримодульного посівного агрегату на базі трактора з реверсивним ходом. Водночас реальним та остаточним підтвердженням адекват-



ності отриманих результатів стосовно тримашинного посівного МТА є його експлуатаційно-технологічні показники роботи.

*Формулювання мети статті (постановка завдання).* Мета статті – визначення експлуатаційно-технологічних показників роботи реверсивно налаштованого трактора з напівнавісною зчіпкою та трьома причіпними сівалками.

*Основна частина.* Одним із експлуатаційно-технологічних показників МТА є працесмікість його агрегування. Під агрегуванням цього машинно-тракторного агрегату розглядали витрати праці на його переведення із транспортного в робоче положення. Така процедура є дуже важливою з огляду на складну конструкцію розглядуваного агрегату. Агрегування МТА здійснювали за розробленою в ТДАТУ методикою. При цьому встановлено, що процес агрегування трактора зі зчіпкою й трьома причіпними сівалками два механізatori реалізують за 0,80 години, тобто за 48 хвилин. Отриманий результат є цілком прийнятним. Так, за даними, наприклад, австрійської провідної фірми APV (<https://www.apv.at/ueber-apv>), на складання трисівалкового агрегату витрачається від 0,5 до 1,0 години.

Що стосується процесу руху цього агрегату на поворотній смузі, то він здійснюється таким чином. МТА здійснює робочий хід до тих пір, поки на контрольну лінію поля не вийдуть останні робочі органи бокових причіпних сівалок. Після цього сошники цих посівних машин переводяться в транспортне положення, а агрегат продовжує прямолінійний робочий хід, поки задні робочі органи задньої причіпної сівалки не досягнуть контрольної лінії. Далі робочі органи цієї посівної машини теж переводяться в транспортне положення й машинно-тракторний агрегат починає здійснювати криволінійну фазу поворотного процесу.

Практично всі посівні агрегати функціонують «човниковим» способом руху, який супроводжується виконанням петльового (за правило – «грушоподібного») або безпетльового поворотів. У цьому випадку маємо саме останній випадок. Для правильної організації повороту варто спочатку розрахувати мінімальне значення поворотної смуги ( $E_{\min}$ ). У разі застосування безпетльового маневру посівного МТА цей параметр розраховується із виразу [7]:

$$E_{\min} = 1,14R_{\min} + L_a + 0,5d_k, \quad (1)$$

де  $R_{\min}$  – мінімальне значення радіусу повороту трактора, м;  $L_a$  – довжина прямолінійного виїзду посівного МТА на поворотній смузі, м;  $d_k$  – кінематична ширина МТА, м. Для досліджуваного нами МТА  $E_{\min} = 21,05$  м.

У реальних умовах експлуатації користуються не розрахунковим мінімальним значенням поворотної смуги ( $E_{\min}$ ), а дійсним ( $E_d$ ). Останній параметр має бути кратним цілому числу – ширині захвату посівного агрегату –  $B_p$ . У математичному представленні це можна записати так:

$$E_d = \text{Int} \left( \frac{E_{\min}}{B_p} \right) \cdot B_p. \quad (2)$$

Так як для цього МТА  $B_p = 10,8$  м, то  $E_d = 20,16$  м. Як бачимо, розраховане значення параметра  $E_d$  репрезентують два проходи цього тримашинного посівного агрегату.

Оскільки мова йде про поворот МТА, то доцільно оцінити час, який він витратить на його здійснення ( $t_x$ ). Значення цього параметра можна визначити із формули:

$$t_x = \frac{L_x}{V_x}, \quad (3)$$

де  $L_x$  – довжина повороту МТА на поворотній смузі, м;  $V_x$  – швидкість повороту посівного агрегату, м/с.

Для безпечливого повороту із [7] маємо:

$$L_x = 1,14 \cdot R_{\min} + 2 \cdot L_a. \quad (4)$$

Спільне рішення рівнянь (3) і (4) дає:

$$t_x = \frac{1,14 \cdot R_{\min} + 2 \cdot L_a}{V_x}. \quad (5)$$

Попередніми дослідженнями визначено, що максимальна швидкість повороту цього агрегату на полі може бути на рівні 2,8 м/с. З огляду на це, отримуємо, що  $t_x = 8,5$  с. При цьому наголосимо, що реальне значення швидкості повороту тримашинного посівного МТА може бути значно меншим за 2,8 м/с. Значення цього показника нами визначено для кінематичних умов, які не враховують динамічні процеси, що мають місце під час повороту агрегату. З огляду на це, розглянемо можливість вибирати швидкість повороту МТА з урахуванням діапазону зміни показника режиму повороту  $K_n = 4,5\text{--}25,0$  м/рад. Як впливає із [8]:

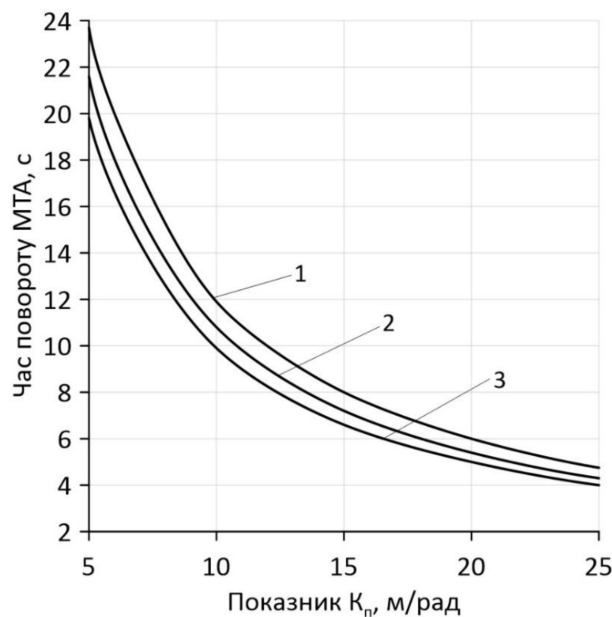
$$V_n = K_n \cdot \omega.$$

Беручи це до уваги, вираз (5) можна переписати так:

$$t_x = \frac{1,14 \cdot R_{\min} + 2 \cdot L_a}{K_n \cdot \omega}. \quad (6)$$

Далі спробуємо проаналізувати динаміку зміни часу повороту МТА від значень показника режиму  $K_n$  за різних значень показника інтенсивності повороту керованих коліс трактора  $\omega$ . Останній будемо розглядати в межах 0,20–0,24 рад/с. Аналіз отриманих даних розрахунків виразу (6) показав, що незалежно від значення показника  $\omega$  маневр МТА з більшим значенням показника  $K_n$  характеризується меншим значенням часу його повороту (рис. 2).

Водночас інтенсивність цього процесу не однакова в діапазоні значень показника  $K_n$ . По суті, кожна з кривих рис. 2 умовно складається з двох зон. У першій із них зменшення значень



**Рис. 2.** Залежність часу повороту МТА від параметра  $K_n$  за різних значень кінематичного показника  $\omega$ :

1 – 0,20 рад/с; 2 – 0,22 рад/с; 3 – 0,24 рад/с



часу повороту агрегату (параметр  $t_n$ ) зі зростанням значень показника  $K_n$  відбувається інтенсивніше, ніж у другій.

Методика визначення координат точки, яка розділяє ці дві зони, досить предметно викладена в роботі [9]. Застосовуючи цю методику, доходимо висновку, що найбільш інтенсивне зменшення часу повороту посівного МТА відбувається до позначки показника  $K_n$  на рівні 10 м/рад.

З огляду на це, постає такий стан речей, за якого в реальних умовах експлуатації цього посівного МТА поворот останнього доцільно здійснювати в режимі, якому притаманний показник  $K_n$  зі значеннями 5–10 м/рад. Прийнявши значення параметра  $\omega = 0,22$  рад/с, знаходимо, що швидкість повороту досліджуваного машинно-тракторного агрегату може приймати значення в діапазоні від 1,1 до 2,2 м/с. Така швидкість повороту дослідного МТА є цілком можливою.

Знаючи практично прийнятний (допустимий) діапазон швидкості повороту агрегату (1,1–2,2 м/с), із виразу (6) знаходимо, що очікуваний час маневру машинно-тракторного посівного комплексу на поворотній смузі знаходиться в діапазоні 11–22 с.

Ще одним параметром, який пов'язаний з організацією функціонування посівного МТА, є довжина гону поля ( $L_c$ ). У роботі [10] виведено рівняння, яке пов'язує цю характеристику поля з низкою інших чинників:

$$L_c = \frac{\pi \cdot \varphi \cdot B_p}{2 \cdot k \cdot \left[ \varphi \cdot \left( \frac{\pi \cdot B_p^2}{2 \cdot k \cdot S_n \cdot 10^4} - 1 \right) + 1 \right]} \quad (7)$$

У рівнянні (7) прийнято такі позначення:  $\varphi$  – коефіцієнт робочих ходів МТА;  $k$  – коефіцієнт, який відображає близькість значень швидкостей руху машинно-тракторного агрегату на гоні й при повороті на поворотній смузі. У роботі [10] рекомендується  $k = 0,75$ – $1,00$ . У дослідженні приймаємо  $k = 1$ ;  $S_n$  – площа поля, га. Середньостатистичним значенням цього параметра для умов півдня України можна прийняти 80 га.

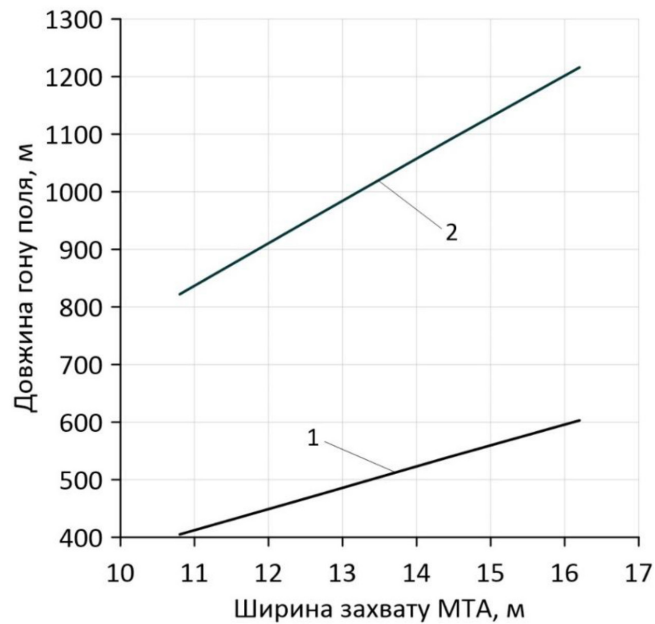
Перед безпосереднім визначенням значення довжини гону поля є доцільність розглянути його залежність від ширини захвату МТА ( $B_p$ ). Отримані дані засвідчують, що, чим більше значення параметра  $B_p$ , тим більшим має бути довжина робочого гону поля (рис. 3).

При цьому важливу роль відіграє коефіцієнт робочих ходів МТА (параметр  $\varphi$ ). Коли його значення знаходиться на рівні 0,96, то зростання ширини захвату посівного агрегату з 10,8 до 16,2 м (трактор з трьома сівалками СЗ-5,4) зумовлює зростання довжини гону поля з 400 до 600 м, тобто у 1,5 рази (пряма 1, рис. 3). Натомість за значення параметра  $\varphi$  на рівні 0,98 і того ж діапазону зміни параметра  $B_p$  (10,8–16,2 м) довжина гону поля має змінюватися в межах 800–1200 м. У цьому випадку це у 2 рази більше, ніж за умови  $\varphi = 0,96$ . Звідси випливає, що за практичної експлуатації посівного МТА варто добиватися якомога більшого значення коефіцієнта його робочих ходів.

Насамкінець зазначимо, що площа поля ( $S_n$ ) здійснює дуже малий вплив за зміну значень довжини робочого ходу посівного агрегату. Як випливає з аналізу, збільшення значення параметра  $S_n$  з 80 до 100 га практично не змінює значень параметра  $L_c$ . З огляду на це, можна зробити висновок, що раціональні значення довжини гону поля інваріантні стосовно площі оброблюваного поля. Завдання полягає у виборі правильного співвідношення параметрів  $L_c$  і  $B_p$ .

Експлуатаційно-технологічну оцінку здійснювали для двох посівних машинно-тракторних агрегатів: нового й базового. Новий посівний агрегат був у складі трактора ХТЗ-16131, напівнавісної зчіпки СН-75 і трьох причіпних сівалок СЗ-3,6. Базовий МТА складався із цього ж енергетичного засобу, причіпної зчіпки СП-8 і двох причіпних сівалок СЗ-3,6.

Науковцями свого часу розроблений та апробований у виробничих умовах посівний агрегат у складі трактора Т-150К, причіпної зчіпки типу СП-16 і трьох причіпних сівалок СЗ-3,6. Вод-



**Рис. 3. Залежність довжини гону поля від ширини захвату МТА за різних значень коефіцієнта робочих ходів:  
1 –  $\varphi = 0,96$ ; 2 –  $\varphi = 0,98$**

ночас, попри наукові рекомендації, такий агрегат широкого розповсюдження не набув. Причина такого результату така. По-перше, цей МТА має велику кінематичну довжину, яка зумовлює значну ширину поворотної смуги. По-друге, переїзд з одного поля на віддалене інше агрегатом у робочому положенні неможливий через габарити (більше ніж 11 м), а процес переведення МТА з робочого положення в транспортне досить працездатний. З огляду на це, виробничники використовують агрегат у складі трактора тягового класу 3 (серії ХТЗ-170 чи ХТЗ-160), центральну частину причіпної зчіпки типу СП-16 і дві сівалки СЗ-3,6. Такий МТА теж має значну кінематичну довжину. Але його можна не переводити з робочого в транспортне положення для здійснення транспортних переїздів. Саме ця обставина виявилася визначальною при виборі виробничниками складу посівного МТА з двома, а не трьома сівалками типу СЗ-3,6.

Для отримання об'єктивної оцінки посів озимої пшениці нормою 200 кг/га здійснювали випробовуваними агрегатами почергово (щодобово). На обох МТА працював один і той же механізатор. Результати експлуатаційно-технологічної оцінки порівнюваних посівних агрегатів (нового й базового) репрезентовані таблицею 1.

Аналіз отриманих даних засвідчує таке. Продуктивність роботи нового агрегату за 1 год основного часу порівняно з базовим машинно-тракторним агрегатом більша на 32,4 %. Досягнуто це за рахунок більшої (у 1,5 раза) робочої ширини захвату.

Водночас змінна продуктивність роботи в нового посівного МТА щодо базового вища на 40,4 %. Такий результат досягнуто за рахунок більшого (на 6,3 %) значення коефіцієнта використання часу зміни новим посівним агрегатом. Це досить вагома перевага. Зумовлена вона більшим (на 6,6 %) значенням коефіцієнта робочих ходів. Остання обставина, своєю чергою, є результатом значно менших витрат новим посівним часу на повороти. Як засвідчують результати експлуатаційно-технологічної оцінки посівних агрегатів (таблиця 1), середній час повороту в нового МТА утричі менший, ніж у базового. Такий результат досягнуто за рахунок переваг конструктивної схеми першого агрегату перед другим.

Питомі витрати пального новим МТА виявилися меншими на 21,6 % порівняно з агрегатом базовим. Однією з причин такого результату є менша продуктивність роботи останнього.



Таблиця 1

## Експлуатаційно-технологічні показники роботи посівних МТА

Показник	МТА	
	новий	базовий
Склад МТА: трактор	ХТЗ-160	
с.-г. машина	зчіпка, 3 СЗ-3,6	зчіпка 2 СЗ-3,6
Режим роботи:		
– ширина захвату, м	10,7	7,1
– швидкість робочого руху, км · год <sup>-1</sup>	8,8	10,0
– довжина гону, м	1250	1250
Об'єм виконаної роботи, га	90	70
Продуктивність роботи, га · год <sup>-1</sup> :		
– основного часу	9,4	7,1
– змінного часу	<b>8,0</b>	<b>5,7</b>
– експлуатаційного часу	8,0	5,7
Питомі витрати пального, л · га <sup>-1</sup>	4,0	5,1
Експлуатаційно-технологічні коефіцієнти:		
– використання змінного часу	<b>0,85</b>	<b>0,80</b>
– використання експлуатаційного часу	0,85	0,80
– надійності технологічного процесу	1,00	1,00
– використання робочих ходів	0,97	0,91
Тривалість одного повороту, с	<b>15</b>	<b>45</b>
Ширина поворотної смуги, м	<b>21</b>	<b>36</b>
Агротехнічні показники:		
– середнє значення ширини захвату, см	10,7 ± 0,10	7,1 ± 0,15
– СКВ ширини захвату, ± см	1,9	1,8
– наявність огріхів	відсутні	

Так як обидва агрегати в процесі експлуатаційно-технологічного оцінювання не мали технічних відмов, то значення їх коефіцієнтів використання експлуатаційного часу не відрізнялися від значень коефіцієнтів використання зміни. У зв'язку з цим однаковими були значення змінної й експлуатаційної продуктивності порівнюваних посівних агрегатів.

Рівними й при цьому максимально можливими є значення коефіцієнтів надійності технологічного процесу в обох МТА. Це вказує на технологічну надійність виконання ними посіву озимини.

Рівномірність зміни робочої ширини захвату новим і базовим посівними агрегатами здійснювали шляхом порівняння дисперсій коливань цього параметра з допомогою  $F$ -критерію Фішера. Як відомо, він розраховується шляхом ділення більшої дисперсії (тобто квадрату СКВ) на меншу. У нашому випадку дійсне значення ( $F_{\delta}$ ) цього критерію дорівнює:  $F_{\delta} = 1,9^2/1,8^2 = 1,11$ .

Теоретичне (табличне) значення цього критерію ( $F_m$ ) у нашому випадку становить 1,39. Так як  $F_m = 1,39 > F_{\delta} = 1,11$ , то можна стверджувати, що нуль-гіпотеза про рівність порівнюваних дисперсій не відхиляється. А це означає, що отримана різниця між цими статистичним показниками є випадковою й на статистичному рівні 0,05 незначущою.

*Висновки.* Процес агрегування трактора зі зчіпкою й трьома причіпними сівалками два механізatori реалізують за 0,80 години, тобто за 48 хвилин.

У реальних умовах експлуатації цього посівного МТА його поворот доцільно здійснювати в режимі, якому притаманний показник  $K_n$  зі значеннями 5–10 м/рад. За інтенсивності повороту керованих коліс трактора  $\omega = 0,22$  рад/с швидкість повороту досліджуваного машинно-тракторного агрегату може приймати значення в діапазоні від 1,1 до 2,2 м/с.

За практичної експлуатації розглядуваного посівного МТА варто добиватися якомога більшого значення коефіцієнта його робочих ходів. Коли його значення знаходиться на рівні 0,96,



то зростання ширини захвату посівного агрегату з 10,8 до 16,2 м (трактор з трьома сівалками СЗ-5,4) зумовлює зростання довжини гону поля з 400 до 600 м, тобто в 1,5 раза.

Продуктивність роботи нового агрегату за 1 год основного часу порівняно з базовим МТА більша на 32,4 %. Досягнуто це за рахунок більшої (у 1,5 раза) робочої ширини захвату.

Змінна продуктивність роботи в нового посівного МТА щодо базового вища на 40,4 %. Такий результат досягнуто за рахунок більшого (на 6,3 %) значення коефіцієнта використання часу зміни новим посівним агрегатом. Це перевага зумовлена більшим (на 6,6 %) значенням коефіцієнта робочих ходів. Остання обставина, своєю чергою, є результатом значно менших витрат новим посівним часу на повороти.

Питомі витрати пального новим МТА є меншими на 21,6 % порівняно з агрегатом базовим. Однією з причин такого результату є менша продуктивність роботи останнього.

#### Список використаних джерел

1. Надикто В., Самородов В. Перспективний напрямок створення комбінованих та широкозахватних МТА. *Техніка в АПК*. 2006. № 4. С. 6–9.
2. Konstantinov M. M., Terpilovsky E. Y. Improving Methods for Constructing wide-width units. *News Orenburg State Agrarian University*. 2006. Vol. 3, № 11(1). P. 71–73.
3. Antille D.L. et al. Review: Soil compaction and controlled traffic farming in arable and grass cropping systems. *Agronomy Research*. 2019. Vol. 17, № 3. P. 653–682.
4. Krasovskikh B. S. 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.
5. 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.
6. Надикто В. Т., Жокін І. О. Вплив кута повороту керованих коліс трактора на коефіцієнт кінематичної невідповідності приводу його мостів. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2025. Т. 2. Вип. 2. С. 93–98.
7. *Машиновикористання в землеробстві* / В. Ю. Ільченко, Ю. П. Нагірний, П. А. Джолос та ін. Київ : Урожай, 1996. 384 с.
8. *Збирання зернових культур роздільним способом* / В. Т. Надикто та ін. Запоріжжя : Inter-M, 2012. 312 с.
9. Надикто В. Т., Величко О. В. Означення точки оптимуму кривої та спосіб її визначення. *Техніка і технології АПК*. 2014. № 2. С. 16–18.
10. Адамчук В. В., Булгаков В. М., Надикто В. Т. та ін. Дослідження впливу ширини захвату машинно-тракторного агрегату на його експлуатаційні показники. *Вісник аграрної науки*. 2022. № 10. С. 29–36.

Дата першого надходження статті до видання: 05.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026

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



**V. Nadykto, I. Zhokin***Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University***OPERATIONAL AND TECHNOLOGICAL ASSESSMENT  
OF THREE-MACHINE SEEDING UNIT*****Summary***

One of the promising directions of agricultural engineering is the development of three-machine (three-module) sowing complexes. In the proposed unit of this direction, the energy basis is a plow-and-till tractor configured for reversible movement. Two side-trail seeders are attached to its front attachment using a semi-mounted hitch. The third (central) seeding machine is attached to the tractor's rear attachment. This article presents the results of an evaluation of the technical and operational indicators for the operation of such a unit. It was established that the process of aggregating a tractor with a hitch and three trailed seeders is carried out by two machine operators in 0.80 hours, i.e., in 48 minutes. The productivity of the new unit in 1 hour of basic time is 32.4 % higher than that of the basic unit. This was achieved due to a larger (1.5 times) working width of the grip. The variable productivity of the new sowing unit in relation to the basic one is 40.4 %. This result was achieved due to a larger (by 6.3 %) value of the coefficient of use of the time of change by the new sowing unit. This advantage is due to a larger (by 6.6 %) value of the coefficient of working strokes. The latter circumstance, in turn, is the result of significantly lower time costs for turning by the new sowing unit. The specific fuel consumption of the new unit was 21.6 % lower than that of the basic unit.

**Keywords:** trailed seeder, turning, turning index, labor intensity, work productivity, specific fuel consumption.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-16>

УДК 66.047; 544.421

О. А. Новохат, канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0002-1198-6675

В. В. Філіпов, аспірант

ORCID: 0009-0000-5098-5539

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

e-mail: novokhatoleh@gmail.com

## КІНЕТИЧНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ДЕГІДРАТАЦІЇ БІШОФІТУ ЗА ТЕРМОРАДІАЦІЙНОГО ПІДВЕДЕННЯ ТЕПЛОТИ

*Анотація.* У статті досліджено кінетику ізотермічної дегідратації кристалічного бішофіту ( $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) при температурах 70 °С, 90 °С, 100 °С та 110 °С із терморадіаційним нагріванням. На основі експериментальних даних зміни маси бішофіту під час дегідратації отримано графічні залежності зміни ступеня дегідратації та кількості молекул кристалізаційної води в гідраті хлориду магнію. Установлено наявність двох кінетичних стадій процесу, що відображають зміну механізму дегідратації. Розраховано константи швидкості стадій процесу та значення ефективної енергії активації. Отримані результати можуть бути використані для прогнозування швидкості дегідратації бішофіту в технологічних процесах.

*Ключові слова:* бішофіт, хлорид магнію, гідрат, дегідратація, інфрачервоне випромінювання.

*Постановка проблеми.* Кристалічний природний бішофіт може містити воду в різних видах: вільну, адсорбовану й у складі молекул у формі гідрату.

Для отримання товарного матеріалу бішофіт зазвичай висушують від вільної й частково адсорбційної вологи. Потім упаковують у герметичну поліетиленову тару та відправляють на реалізацію. Проте в результаті порушення герметичності пакування бішофіт може поглинути вологу з навколишнього середовища. Це призведе до злежування та грудкування подрібненого мінералу. Тому досить поширеною є практика часткового видалення кристалічної вологи до рівня тетрагідрату хлориду магнію.

Подальше зниження частки кристалізаційної води до рівня дигідрату чи безводного хлориду магнію більш доцільне при транспортуванні на великі відстані й у разі потреби саме безводної солі.

Тому є важливим знати кінетичні закономірності дегідратації природнього мінералу бішофіту в його гексагідратній формі. Це дасть змогу підібрати правильний тепловий режим процесу, контролювати ступінь дегідратації та поточну форму гідрату, отримуючи якісний продукт без зайвих масових втрат.

Одним зі способів підведення теплоти є терморадіаційний спосіб. Проте, як показав аналіз літературних джерел, дослідження цього способу як джерела теплового потоку під час дегідратації бішофіту недостатньо висвітлене.

*Аналіз останніх досліджень.* Існує багато праць, які описують процес зневоднення бішофіту. Зокрема, описується сушіння бішофіту як видалення вільної та адсорбційної вологи [1; 2; 3]. Проте в таких роботах не досліджено явище дегідратації бішофіту, а саме видалення води в кристалізаційній формі в гідратах хлориду магнію. Хоча варто зазначити, що інколи часткова контрольована дегідратація спеціально проводиться й під час сушіння [4].

Також представлені публікації з описом досліджень щодо дегідратації бішофіту. Найбільш поширеним способом підведення теплоти до матеріалу в таких роботах є кондуктивно-конвективні способи, зокрема із застосування печей [5; 6; 7; 8], рідше просто кондуктивним [9].



Окремим в роботах висвітлюється тематика керованого пригнічення гідролізу під час нагрівання бішофіту, під час якого утворюються гідроксохлориди магнію [7; 8].

Окрім хімічно-орієнтованих робіт, значна кількість літературних джерел описує використання бішофіту як матеріалу для акумулювання теплоти [10; 11; 12; 13].

Дослідження дегідратації бішофіту за допомогою терморадіаційного способу підведення теплоти майже відсутні. У наявній літературі також немає аналізу зміни структури гідрату в молекулі бішофіту [14]. Це ускладнює задавання чітких параметрів технологічного процесу дегідратації залежно від необхідного ступеня дегідратації бішофіту певної структури гідрату.

*Формулювання мети статті (постановка завдання).* Терморадіаційний спосіб підведення теплоти досить поширений у зв'язку зі здатністю інфрачервоного випромінювання проникати вглиб матеріалу [15]. Для визначення доцільності застосування інфрачервоного випромінювання для дегідратації природного подрібненого бішофіту в початковій гексагідратній формі необхідно встановити кінетичні закономірності цього процесу. Їх аналіз дає змогу простежити динаміку стадій переходу гідратних форм під час дегідратації. У зв'язку з цим метою роботи є на основі експериментальних досліджень дегідратації бішофіту терморадіаційним способом отримати кінетичні залежності процесу, проаналізувати їх та оцінити доцільність застосування цього способу.

*Основна частина.* Для визначення кінетичних закономірностей першої стадії дегідратації шестиводного кристалічного бішофіту ( $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ) застосовано дослідну сушильну установку [1]. Як джерело теплового потоку застосовано керамічний інфрачервоний випромінювач номінальною електричною потужністю 1 кВт та температурою робочої поверхні близько 600 °С. Дослідження виконувалося за допомогою термогравіметричного аналізу з безперервною фіксацією маси й температури поверхні кристалічного бішофіту. Регулювання теплового потоку реалізовувалося зміною відстані від робочої поверхні випромінювача до поверхні матеріалу. Усього застосовано чотири теплові режими зі значенням усталеної температури на поверхні бішофіту в 70 °С, 90 °С, 100 °С та 110 °С.

За дослідний матеріал використано попередньо висушений природній подрібнений кристалічний бішофіт (гексагідрат хлориду магнію). Середнє значення фракції становило 3 мм.

За експериментальними даними розраховано ступінь дегідратації як відношення кількості видаленої кристалізаційної води до її загальної кількості в гексагідраті хлориду магнію.

Графічні залежності зміни ступеня дегідратації кристалів сипучого бішофіту під час дегідратації показано на рисунку 1.

Аналіз кривих показує, що на початку процесу дегідратація найбільш інтенсивна з подальшим спаданням швидкості.

Висока початкова інтенсивність може бути пов'язана з видаленням залишкової адсорбційної вологи, на видалення якої необхідна менша кількість теплоти, ніж на видалення кристалізаційної води з молекул бішофіту.

Крім того, під час дегідратації кристалізаційна вода спочатку втрачається в поверхневих шарах кристалу, створюючи додатковий гідравлічний опір для подальшої її дифузії в більш глибоких шарах кристалів бішофіту.

Числові значення ступеня дегідратації наприкінці процесу показано в таблиці 1.

Для опису кінетики процесу застосовано рівняння Аврамі-Єрофєєва:

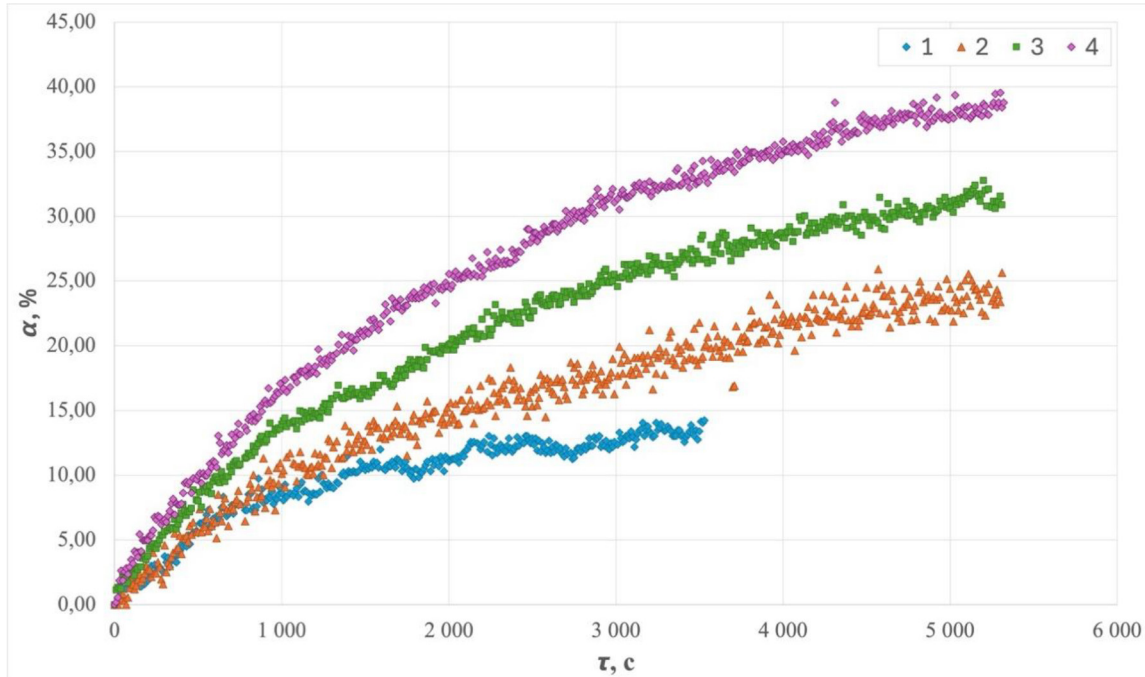
$$\alpha = 1 - e^{-k\tau}, \quad (1)$$

де  $\alpha$  – ступінь дегідратації;

$k$  – константа швидкості процесу,  $s^{-1}$ ;

$n$  – показник механізму;

$\tau$  – час, с.



**Рис. 1.** Графічні залежності ступеня дегідратації  $\alpha$  від часу  $\tau$ :  
1 – 70 °C; 2 – 90 °C; 3 – 100 °C; 4 – 110 °C

Таблиця 1

Залежність ступеня дегідратації від температури процесу

Температура поверхні бішофіту $t$ , °C	Ступінь дегідратації $\alpha$ , %
70	14
90	24
100	32
110	39

Це рівняння лінеаризоване у вигляді

$$\ln(-\ln(1 - \alpha)) = n \ln \tau + \ln k. \quad (2)$$

Для визначення констант швидкості реакції побудовано графічні залежності (рисунки 2, 3, 4 та 5) у координатах  $\ln(-\ln(1 - \alpha)) = f(\ln \tau)$ .

Аналіз залежностей показав, що процес дегідратації бішофіту за цих умов проходить у два етапи, які більш чітко виражені за нижчих температур. На першому етапі відбувається прогрів матеріалу, остаточне видалення залишкової адсорбційної вологи й початок дегідратації. Швидкість процесу визначається переважно температурою та енергією розриву зв'язків між водою й кристалічною структурою.

У міру видалення води на поверхні формується шар частково дегідратованого матеріалу. Цей шар ускладнює дифузію води. У результаті процес поступово переходить до дифузійної другої стадії, коли швидкість визначається вже не стільки розривом хімічних зв'язків, скільки переміщенням молекул води всередині твердого матеріалу до поверхні.

Значення констант швидкостей за стадіями залежно від температурного впливу наведено в таблиці 2.

Спостерігається чітка тенденція, що швидкість першої стадії дегідратації в заданих часових межах вища, ніж у другій стадії, а швидкість однотипних стадій зростає зі збільшенням теплового потоку до бішофіту.

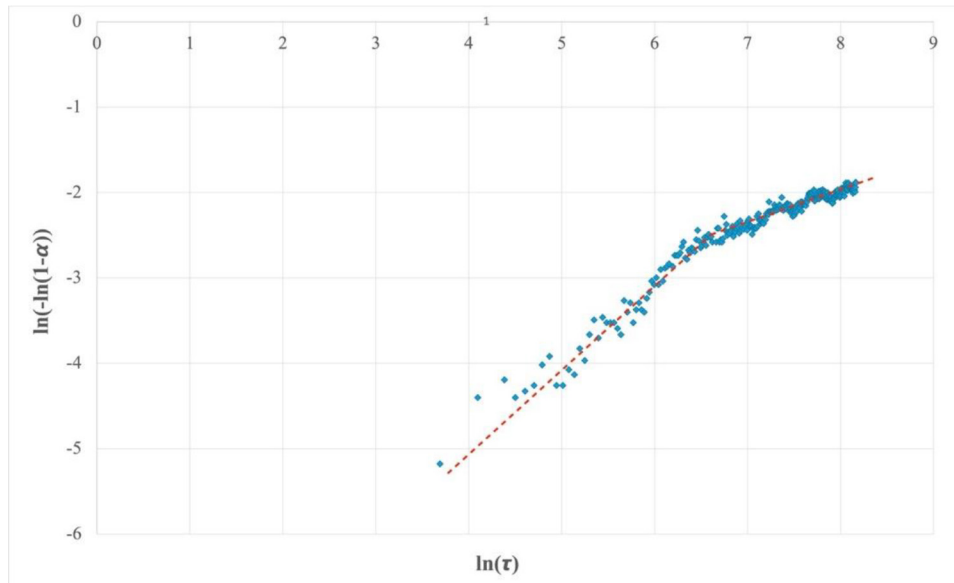


Рис. 2. Лінеаризація для температурного впливу в 70 °С

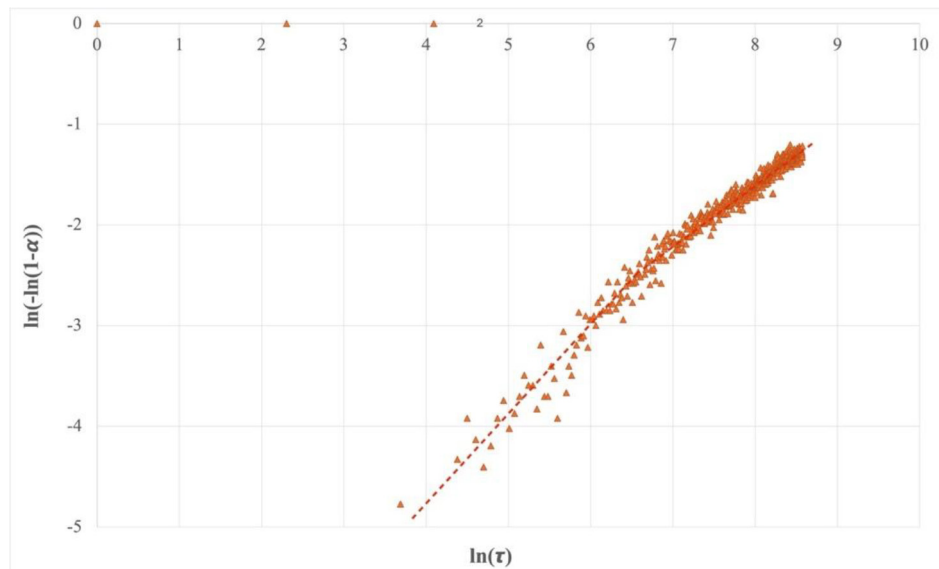


Рис. 3. Лінеаризація для температурного впливу в 90 °С

Крім того, з підвищенням температури різниця між константами швидкості окремих стадій зменшується. Це свідчить про зниження дифузійного впливу води на процес дегідратації завдяки вищій рушійній силі.

До того ж кількість молекул кристалізаційної води в бішофіті можна прямо визначити за формулою 3:

$$n = 6 \left( 1 - \frac{\alpha}{100} \right), \quad (3)$$

де  $\alpha$  – ступінь дегідратації бішофіту, %.

Неціле числове значення  $n$  означає поступовий перехід до нижчого типу гідрату в загальній масі хлориду магнію.

Також варто зауважити, що пентагідрат і тригідрат можуть існувати як проміжні, але менш стабільні фази, а моногідрат вважається умовно стабільним і схильним до термічного гідролізу.

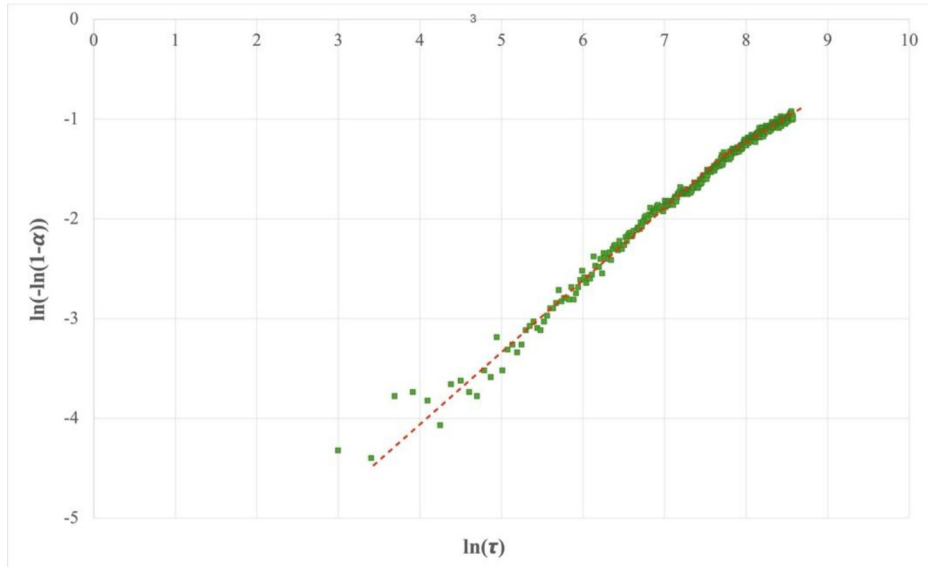


Рис. 4. Лінеаризація для температурного впливу в 100 °С

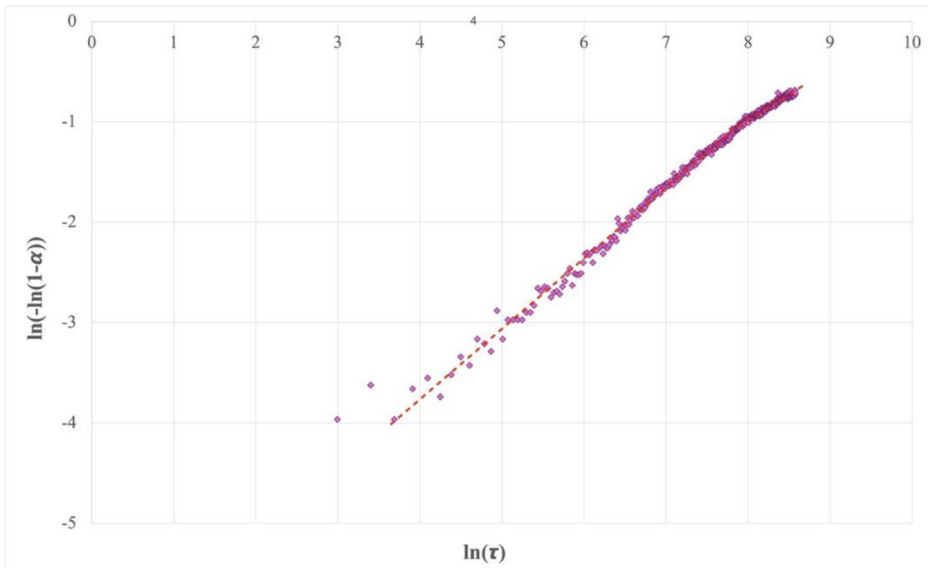


Рис. 5. Лінеаризація для температурного впливу в 110 °С

Таблиця 2

Константи швидкостей дегідратації за різних температур процесу

T	$k_1, \text{c}^{-1}$	$k_2, \text{c}^{-1}$	$k_1/k_2$
70 °C	$4,38 \cdot 10^{-5}$	$1,73 \cdot 10^{-5}$	2,5
90 °C	$5,18 \cdot 10^{-5}$	$2,12 \cdot 10^{-5}$	2,4
100 °C	$5,39 \cdot 10^{-5}$	$2,22 \cdot 10^{-5}$	2,4
110 °C	$8,21 \cdot 10^{-5}$	$4,3 \cdot 10^{-5}$	1,9

Теоретична кількість молекул кристалізаційної води в бішофіті згідно з поточним ступенем дегідратації показано в таблиці 3.

Таблиця 3

## Значення ступеня дегідратації при переході форми гідрату

Назва	Формула	Ступінь дегідратації $\alpha$ , %
Гексагідрат хлориду магнію	$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	0
Пентагідрат хлориду магнію	$MgCl_2 \cdot 5H_2O$	16,67
Тетрагідрат хлориду магнію	$MgCl_2 \cdot 4H_2O$	33,33
Тригідрат хлориду магнію	$MgCl_2 \cdot 3H_2O$	50
Дигідрат хлориду магнію	$MgCl_2 \cdot 2H_2O$	66,67
Моногідрат хлориду магнію	$MgCl_2 \cdot H_2O$	83,33
Хлорид магнію (безводний)	$MgCl_2$	100

Кінетику переходу форм гідрату хлориду магнію (бішофіту) зображено на рисунку 6.

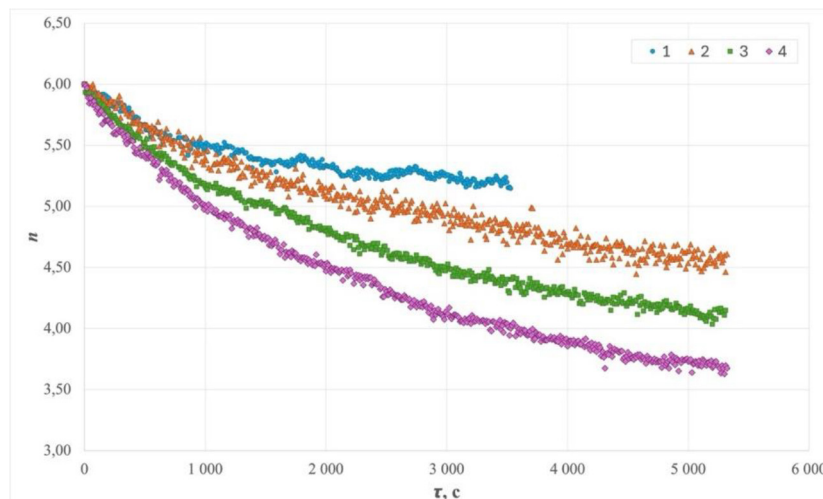


Рис. 6. Поточна кількість молекул води в гідраті:  
1 – 70 °C; 2 – 90 °C; 3 – 100 °C; 4 – 110 °C

Очевидно, що збільшення температурного впливу пришвидшує процес гідратації й дає можливість отримати гідрати більш низьких порядків.

За недостатнього температурного впливу швидкість дегідратації прямує до нуля без наступного пониження ступеня гідрату хлориду магнію. Так, за температури у 70 °C гексагідрат переходить у пентагідрат без подальшого переходу в тетрагідрат; за температур і 90 °C, і 100 °C є можливість отримати тетрагідрат. Якщо продовжувати процес дегідратації, увесь об'єм бішофіту дегідратує й у подальшому можна отримати гідрат більш низького порядку (тригідрат).

Кінцеві середні значення кількості молекул кристалічної води в молекулах бішофіту, згідно з наведеними графічними залежностями, подано в таблиці 4.

Отже, за наведений час дегідратації за температури 70 °C кристали сипучого бішофіту складаються з гексагідрату й пентагідрату; за температурних впливів у 90 °C та 100 °C – пентагідрату й тетрагідрату; за температури 110 °C сипучий бішофіт є сумішшю тетрагідрату й тригідрату хлориду магнію.

Оскільки пентагідрат хлориду магнію є досить нестійкою формою, досить поширеним є проведення дегідратації бішофіту до отримання саме тетрагідрату. При цьому бішофіт є достатньо зневоднений і на молекулярному рівні, має стабільну хімічну молекулярну форму, а загальні втрати маси бішофіту є меншими порівняно з отриманням гідратів нижчих порядків.

Таблиця 4

## Експериментальне кінцеве значення кількості молекул води в солі

Температура впливу, °С	Кількість молекул води в бішофіті	Склад сипучого бішофіту
70	5,15	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ та $\text{MgCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
90	4,54	$\text{MgCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ та $\text{MgCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
100	4,12	$\text{MgCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ та $\text{MgCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
110	3,67	$\text{MgCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ та $\text{MgCl}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$

На початку дегідратації бішофіту можна спостерігати, що навіть за вищого температурного впливу перехід до гідратів нижчих порядків (зокрема тригідрату й нижче) відбувається через деякий проміжок часу. Це дає змогу застосувати дегідратацію в декілька ступенів. На початку для швидкого прогріву й інтенсивності процесу дегідратації застосувати високотемпературний вплив у попередньо визначених температурних і часових межах. Коли ж структура бішофіту перейде до необхідного рівня гідрату – зменшити температурний вплив для мінімізації подальшого переходу, але для досягнення поточної структури бішофіту в усьому його об'ємі.

Проте цей спосіб вимагає чіткого керування з постійним моніторингом температури поверхні кристалів сипучого бішофіту, а також його перемішування для рівномірного температурного впливу.

Необхідно також зазначити, що багатоступінчастий температурний вплив на кристалічний бішофіт може бути доцільним для отримання гідратів найнижчих порядків і навіть безводного хлориду магнію, адже при досягненні ступеня дегідратації приблизно 50 % з отриманням тригідрату за подальшої високотемпературної дегідратації можливий гідроліз хлориду магнію. У результаті цього можуть утворюватися небажані гідроксид магнію та хлороводень.

*Висновки.* У роботі досліджено процес дегідратації бішофіту при температурах 70–110 °С з використанням лабораторної установки терморадіаційного типу. За результатами вимірювання зміни маси зразка в часі побудовано залежності ступеня дегідратації та кількості молекул кристалізаційної води від часу.

Показано, що зі зростанням температури процес відбувається швидше, а тривалість дегідратації зменшується. Аналіз графіків свідчить про стадійний характер процесу. Лінеаризація даних у координатах Аврамі-Єрофєєва дала змогу виділити дві ділянки, що відповідають різним умовам перебігу дегідратації: на початку процес визначається переважно температурним впливом, а на пізній стадії зростає роль внутрішнього опору перенесенню вологи.

Для кожної температури визначено константи швидкості окремих стадій. Отримані результати підтверджують, що дегідратація бішофіту є багатостадійним процесом, швидкість якого залежить як від температури, так і від зміни структури матеріалу під час нагрівання.

Кінетичні закономірності дегідратації бішофіту в гексагідратній формі терморадіаційним способом підведення теплоти подібні до інших способів, зокрема конвекційного. Особливості проведення процесу більшою мірою залежать від кількості підведеної теплоти, а не способу. Це твердження є правильним за умови виконання інших умов подібності, зокрема інтенсивності відведення утвореної пари над шаром бішофіту й ефективності оновлення площі поверхні з теплоносієм або випромінюванням.

**Список використаних джерел**

1. Марчевський В. М., Новохат О. А., Філіпов В. В. Кінетичні закономірності сушіння бішофіту інфрачервоним випромінюванням. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного*. 2025. № 25(1). С. 21–29. DOI: <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-1-3>

2. Du W., Sun Z., Lu G., Yu J. CFD aided design of integrated spray pyrolysis furnace for liquid ore exploitation. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2017. Vol. 122. P. 245–257. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2017.09.007>



3. Xu H., Cheng D., Zhao L., Yu Y., Dong H. Single bischofite precursor droplet evaporation: Modeling and simulation covering the effects of decomposition reactions and environmental variables. *International Journal of Thermal Sciences*. 2025. Vol. 208. Article 109527. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2024.109527>
4. Xuyong Liu, Xiangmei Cui. Research Progress in Dehydration Technology of Bischofite for Preparing Anhydrous Magnesium Chloride. *Proceedings of the 2016 5th International Conference on Civil, Architectural and Hydraulic Engineering (ICCAHE)*. 2016. P. 261–267. DOI: <https://doi.org/10.2991/iccahe-16.2016.45>
5. Xu, Jiaying & Li, T.X. & Yan, Taisen & Chao, Jingwei & Wang, Ruzhu. Dehydration kinetics and thermodynamics of magnesium chloride hexahydrate for thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2020. Vol. 219. Article 110819. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110819> Get rights and content
6. Huang Q., Lu G., Wang J., Yu J. Thermal decomposition mechanisms of  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{MgCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ . *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2011. Vol. 91, Iss. 1. P. 159–164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.02.005>
7. Zhang Z., Lu X., Wang T., Yan Y., Pan F. The dehydration of  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  in  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O-KCl-NH}_4\text{Cl}$  system. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2014. Vol. 110. P. 248–253. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.09.009>
8. Zhang Z., Lu X., Yan Y., Wang T. The dehydration of  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  by inhibition of hydrolysis and conversion of hydrolysate. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2019. Vol. 138. P. 114–119. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.12.014>
9. K. Sugimoto, R. E. Dinnebier and J. C. Hanson. Structures of three dehydration products of bischofite from in situ synchrotron powder diffraction data ( $\text{MgCl}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ;  $n = 1, 2, 4$ ). *Acta Crystallographica Section B: Structural Science, Crystal Engineering and Materials*. 2007. № 63. P. 235–242. DOI: <https://doi.org/10.1107/S0108768107002558>
10. Ushak S., Gutierrez A., Galleguillos H., Fernandez A. G., Cabeza L. F., Grágeda M. Thermophysical characterization of a by-product from the non-metallic industry as inorganic PCM. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2015. Vol. 132. P. 385–391. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.08.042>
11. Whiting G. T., Grondin D., Stosic D., Bennici S., Auroux A. Zeolite- $\text{MgCl}_2$  composites as potential long-term heat storage materials: Influence of zeolite properties on heats of water sorption. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2014. Vol. 128. P. 289–295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.05.016>
12. Palacios A. P. A., Navarro M. E., Barreneche C., Ding Y. Water sorption-based thermochemical storage materials: A review from material candidates to manufacturing routes. *Frontiers in Thermal Engineering*. 2022. Vol. 2. Article 1003863. DOI: <https://doi.org/10.3389/fther.2022.1003863>
13. Yan T., Zhang H. A critical review of salt hydrates as thermochemical sorption heat storage materials: *Thermophysical properties and reaction kinetics*. *Solar Energy*. 2022. Vol. 242. P. 157–183. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.07.002>
14. Марчевський В. М., Улітько Р. М., Галстян А. С. Дегідратація кристалічного бішофіту. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження»*. 2012. № 1(9). С. 34–36.
15. Karvatskii, A., Marchevsky, V., Novokhat, O. Numerical modeling 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. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.96741>

Дата першого надходження статті до видання: 23.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026

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



**O. Novokhat, V. Filipov***National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"***KINETIC REGULARITIES OF BISCHOFITE DEHYDRATION  
UNDER THERMORADIATIVE HEAT SUPPLY*****Summary***

This paper reports an experimental study of the isothermal dehydration kinetics of natural crushed bischofite in its initial hexahydrate form,  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , under thermoradiative (infrared) heating. The objective was to determine kinetic regularities and to evaluate whether lower hydrates can be obtained in a controlled way in a bulk bed. Experiments were performed on a laboratory thermogravimetric setup with a ceramic IR emitter ( $\approx 1$  kW). The heat flux was controlled by changing the emitter–bed distance. Steady surface temperatures of 70, 90, 100, and 110 °C were maintained. Continuous mass measurements were used to calculate the dehydration degree,  $\alpha(\tau)$ , and the current number of crystallization-water molecules in the hydrate,  $n(\tau)$ .

Raising the temperature accelerated dehydration and increased the final dehydration degree within the same process time from 14 % (70 °C) to 39 % (110 °C). This corresponds to a transition from a hexahydrate–pentahydrate mixture to a tetrahydrate–trihydrate mixture. Linearization of the experimental data with the Avrami–Erofeev equation revealed two kinetic stages. The stages are more pronounced at lower temperatures. Rate constants for stage 1 and stage 2 ( $k_1$ ,  $k_2$ ) were determined for each regime. The ratio  $k_1/k_2$  was 1.9–2.5 and decreased with temperature. Effective activation energies were estimated from the temperature dependence of the rate constants. The stage behavior is attributed to a change in the controlling factors. Early on, the process is governed mainly by heat input and bond breaking between water and the crystal lattice. Later, internal mass-transfer resistance becomes important due to a partially dehydrated layer that hinders diffusion of water from the crystal interior. The obtained kinetic parameters can support selection of temperature-time modes for partial dehydration (e.g., to tetrahydrate) and prediction of process rates under technological conditions.

**Keywords:** bischofite, magnesium chloride, hydrate, dehydration, infrared radiation.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-17>

УДК 631.234:635.64+578

Н. О. Паляничка, канд. техн. наук, доц.

ORCID: 0000-0001-8510-7146

В. Ф. Ялпачик, канд. техн. наук, проф.

ORCID: 0000-0002-0349-2448

О. П. Прокопенко, асистент

ORCID: 0009-0005-7304-923X

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*

e-mail: nadiia.palianychka@tsatu.edu.ua

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІННОВАЦІЙНОГО СПОСОБУ ЗАМОРОЖЕННЯ ТА ДЕФРОСТАЦІЇ ПЛОДООВОЧЕВОЇ СИРОВИНИ

*Анотація.* У роботі наведено результати експериментального дослідження процесів заморожування й дефростації плодоовочевої сировини в умовах підвищеного тиску. Установлено, що під час заморожування напружений стан клітинної стінки характеризується виникненням розтягувальних напруг, величина яких змінюється за гіперболічною залежністю по всій поверхні. З метою зниження максимальних розтягувальних напружень обґрунтовано необхідність створення зовнішнього навантаження на циліндричну оболонку, величина якого повинна відповідати гідростатичному тиску всередині клітини. За результатами проведеної роботи визначено оптимальні значення тиску, за яких доцільно здійснювати процеси заморожування та подальшої дефростації.

Отримані експериментальні дані засвідчують ефективність запропонованого способу й підтверджують обґрунтованість застосування процесів заморожування та дефростації в умовах підвищеного тиску.

*Ключові слова:* заморожування, дефростація, гідростатичний тиск, напруга, осмотичний тиск, клітина.

*Постановка проблеми.* Одним із дієвих способів мінімізації втрат сільськогосподарської продукції й, відповідно, нарощування продовольчих ресурсів є розвиток виробництва заморожених харчових продуктів [1, 2].

Застосування заморожування до свіжої сировини дає можливість максимально зберегти її біологічну та вітамінну цінність, а також природну активність компонентів як рослинного, так і тваринного походження. Крім того, така технологія забезпечує використання цієї сировини для виготовлення харчових продуктів упродовж осіннього, зимового й весняного періодів. Питання збереження природних характеристик і харчової цінності плодоовочевої продукції тісно пов'язане з правильним вибором способу її розморожування. Щоб мінімізувати небажані зміни, що виникають у заморожених продуктах під час дефростації, необхідно враховувати особливості перерозподілу вологи. Зокрема, важливо забезпечити поступове повернення води з міжклітинного простору до клітин, куди вона перемістилася в процесі заморожування. Саме контроль цього процесу сприяє збереженню структурної цілісності тканин і якості продукту. Разом із тим установлено, що наявні методи зберігання продукції в замороженому стані неповною мірою відповідають сучасним вимогам якості [3]. Після проведення дефростації спостерігається зморщування плодів, унаслідок чого вони втрачають привабливий товарний вигляд. У зв'язку з цим удосконалення технологічних підходів до процесів заморожування та подальшого розморожування набуває особливої актуальності.

*Аналіз останніх досліджень.* Упродовж останніх років у сфері заморожування та дефростації плодоовочевої сировини сформовано вагомий науковий доробок, що охоплює як теоретичні засади, так і практичні аспекти реалізації процесів [3; 4; 5; 6; 7].

Підбір оптимальних режимів заморожування визначається необхідністю створення таких умов, за яких мінімізується руйнівний вплив осмотичного тиску води. Важливим є обмеження



деформацій біологічного об'єкта, спричинених ростом кристалів льоду, а також забезпечення достатнього рівня зневоднення тканин. Саме такий ступінь дегідратації дає змогу запобігти внутрішньоклітинній кристалізації. Клітинні оболонки чинять вплив на воду, що проявляється у виникненні напруженого стану, зумовленого силами поверхневого натягу в системі «повітря – вода», а також силами адгезійної взаємодії в системі «тверда фаза – вода».

Якби клітинні стінки характеризувалися абсолютно пружними властивостями, то після процесу дефростації плід повністю відновлював би свою початкову форму. Однак у реальних умовах клітинна оболонка не є ідеально пружною, здатна до залишкових деформацій і розтягування, що призводить до зморщування ягід після відтаювання.

Таким чином, важливим науково-практичним завданням є раціональний вибір параметрів заморожування та дефростації плодів, овочів і ягід з урахуванням їхніх фізико-механічних і біохімічних характеристик. Оптимізація цих режимів має бути спрямована на отримання продукції з високими споживчими показниками та збереженою біологічною цінністю, придатною до безпосереднього споживання після розморожування.

*Формулювання мети статті (постановка завдання).* Метою дослідження є обґрунтування й експериментальне визначення раціонального способу заморожування та подальшої дефростації плодів, за якого забезпечується стан динамічної рівноваги. Такий підхід передбачає здійснення процесу в умовах гідростатичного тиску, величина якого відповідає внутрішньому тиску в тканинах плодів.

*Основна частина.* Специфіка поведінки плодоовочевої сировини під час заморожування визначається фазовим переходом води у твердий стан, що зумовлює зростання концентрації розчинених компонентів у залишковій рідкій фазі. Формування кристалів льоду спричиняє трансформацію теплофізичних параметрів плодів та овочів, унаслідок чого відбуваються зміни їх фізико-механічних, біохімічних і морфологічних характеристик [8].

Розглянемо явища, що виникають у клітині під час заморожування, на прикладі винограду [3] і проаналізуємо напружений стан його оболонки. Із цією метою в першому наближенні застосуємо окремий випадок розрахунку циліндричної оболонки – задачу Ляме [3] – за умови навантаження лише внутрішнім тиском (рис. 1):

$$\sigma_t = \frac{pr_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \left( 1 + \frac{r_2^2}{r^2} \right), \quad (1)$$

$$\sigma_r = \frac{pr_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \left( 1 - \frac{r_2^2}{r^2} \right), \quad (2)$$

де  $\sigma_t$  – тангенціальна (окружна) напруга;

$\sigma_r$  – радіальна напруга;

$p$  – величина внутрішнього тиску;

$r_1$  – радіус внутрішньої поверхні оболонки;

$r_2$  – радіус її зовнішньої поверхні;

$r$  – поточна відстань від осі симетрії до розглядуваної точки.

З аналізу співвідношень (1) і (2) випливає, що радіальні напруження  $\sigma_r$  в усіх точках стінки мають стискуючий характер, тоді як окружні напруження  $\sigma_t$  є розтягувальними.

Розподіл напружень по товщині оболонки відбувається за гіперболічною залежністю.

Згідно з даними [8], руйнування клітин рослинної сировини в процесі заморожування зумовлене виникненням внутрішніх напружень, що формуються під час фазового переходу рідини в твердий стан. Унаслідок наявності температурного градієнта в різних зонах продукту одночасно перебігають відмінні за характером процеси.

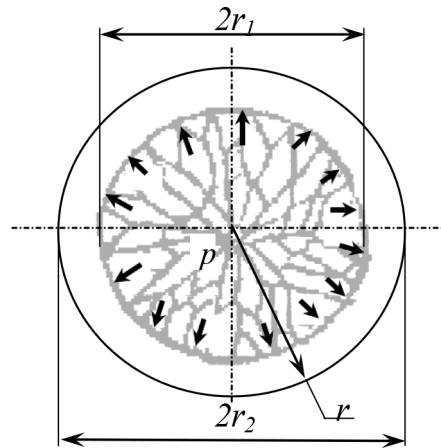


Рис. 1. Схема дії внутрішнього тиску на ягоду винограду

Поверхневі шари, температура яких опускається значно нижче за криоскопічну точку, зазнають стискання, тоді як внутрішні об'єми збільшуються (приблизно до 9 %) через кристалізацію води. Така різниця деформацій спричиняє розвиток внутрішнього тиску між шарами, який зростає зі збільшенням інтенсивності тепловідведення. Коли напруження в приповерхневих шарах перевищують межу міцності тканини, відбувається розтріскування продукту.

Для зниження максимальних окружних розтягувальних напружень  $\sigma_t$  доцільно створити додаткове навантаження на циліндричну оболонку у вигляді зовнішнього тиску.

Проаналізуємо, як змінюються напруження  $\sigma_t$  і  $\sigma_r$  за наявності зовнішнього тиску. У такому разі залежності для визначення напружень набувають вигляду:

$$\sigma_r = -\frac{r_2^2 \cdot p}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \left(1 - \frac{r_1^2}{r^2}\right); \quad (3)$$

$$\sigma_t = -\frac{r_2^2 \cdot p}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \left(1 + \frac{r_1^2}{r^2}\right). \quad (4)$$

У цьому випадку обидва напруження мають стискуючий характер, причому за абсолютним значенням  $\sigma_t$  перевищує  $\sigma_r$ .

На внутрішній поверхні циліндра отримаємо:

$$\begin{aligned} (\sigma_r)_{r=r_1} &= 0; \\ (\sigma_t)_{r=r_1} &= -\frac{2}{1-k^2} \cdot p. \end{aligned} \quad (5)$$

Таким чином, результати виконаного теоретичного аналізу свідчать про те, що процес заморожування ягід доцільно здійснювати за умови прикладання зовнішнього тиску, величина якого відповідає гідростатичному тиску всередині клітини.

Гідростатичний тиск відіграє важливу роль у збереженні форми плоду, а також впливає на процеси переміщення води й розчинення речовин у клітинному середовищі. Наявність такого тиску підтверджується тим, що при механічному пошкодженні плоду (зокрема проколюванні) з нього інтенсивно виділяється сік. За умови ідеальної пружності клітинних стінок після дефростації плід повністю відновлював би свій початковий стан. Однак у реальних умовах оболонка клітини не має абсолютно пружних властивостей, здатна до розтягування й залишкових деформацій, що зумовлює зморщування плодів після розморожування.

Отже, з метою запобігання зазначеним негативним явищам під час заморожування й подальшої дефростації плодів необхідно забезпечувати умови динамічної рівноваги. Це передбачає

здійснення процесу за такого гідростатичного тиску, величина якого відповідає внутрішньому тиску в тканинах плодів.

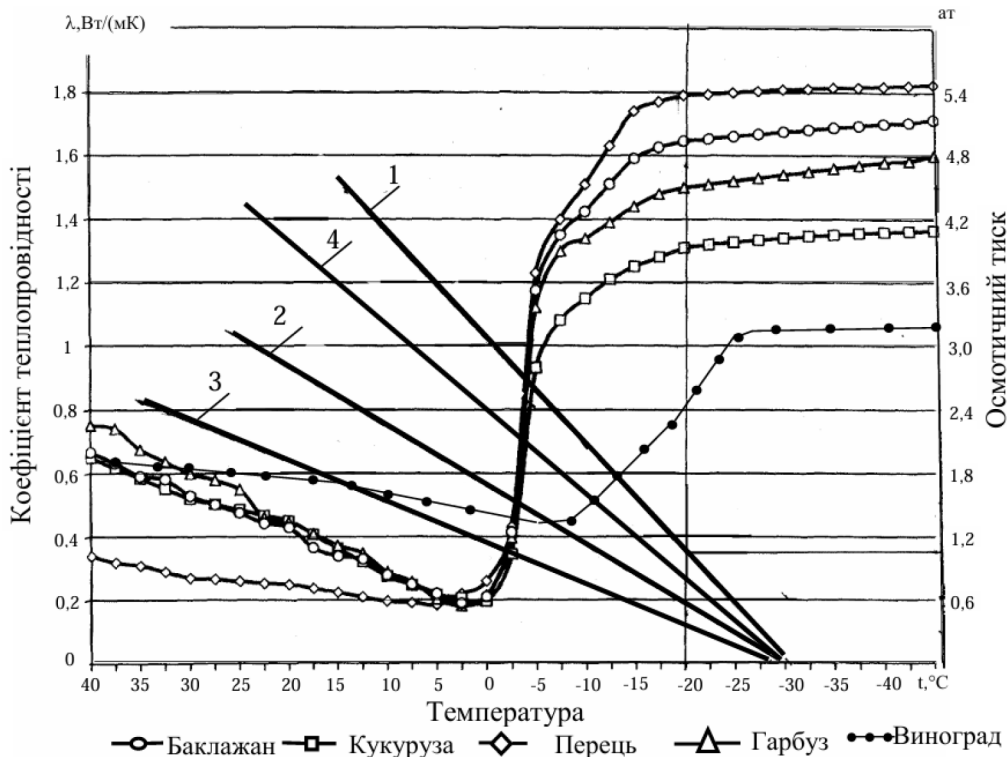
Для розрахунку гідростатичного тиску в плодовій сировині попередньо варто визначити значення осмотичного тиску.

Величина осмотичного тиску в плодах знаходиться в межах від 0,9 МПа (для томатів) до 3,8 МПа (для винограду) [3].

Осмотичні явища відіграють визначальну роль у перебігу біологічних процесів. Безперервний осмос усередині клітин сприяє формуванню підвищеного гідростатичного тиску в тканинах плодів, що забезпечує їхню міцність і пружність. Значення врівноваженого осмотичного тиску клітинного соку становить 405–2026 кПа [8].

Установлено, що величина осмотичного тиску в клітинах овочевої та плодової сировини, зокрема винограду, змінюється в діапазоні 0,08–0,49 МПа.

Також відомо, що оптимальне зберігання плодів і ягід здійснюється за температури  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Тому на графіку залежності коефіцієнта теплопровідності від температури з точки, що відповідає значенню  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , проводять перпендикуляр до перетину з кривою осмотичного тиску для конкретного виду сировини (рис. 2). Отримана точка перетину визначає величину гідростатичного тиску, тобто той тиск, за якого доцільно здійснювати процес заморожування продукції.



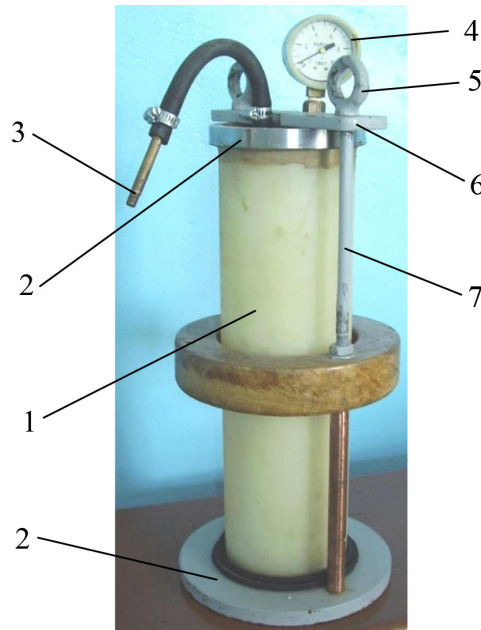
**Рис. 2.** Графік залежності коефіцієнта теплопровідності й осмотичного тиску від температури:  
1– гарбуз; 2 – кукурудза; 3 – баклажан; 4 – перець

З наведеного графічного матеріалу випливає, що процеси заморожування та подальшої дефростації доцільно здійснювати за таких значень тиску: для баклажанів – 0,03 МПа, для кукурудзи – 0,045 МПа, для перцю – 0,067 МПа, для винограду – 0,07 МПа.

З метою перевірки висунутої гіпотези виконано експериментальне дослідження процесу дефростації плодоовочевої сировини в умовах підвищеного тиску [9; 10]. Для реалізації дослідів сконструйовано та виготовлено спеціальну камеру (рис. 3). Конструкція установки включає пластмасовий циліндр, верхню й нижню кришки, золотниковий механізм і манометр. Нижня

кришка з ущільнювальним елементом герметично фіксується за допомогою шпильок. Верхня кришка виконана знімною; її притискання до циліндра здійснюється через ущільнювач за допомогою притискної пластини та гайок, що забезпечує герметичність системи під час роботи.

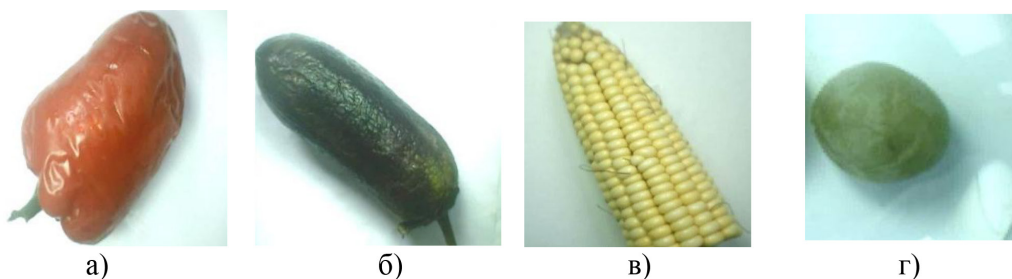
Процес дефростації в умовах підвищеного тиску здійснювали за такою методикою. У циліндр 1 заливали воду температурою 25–28 °С. Далі за допомогою насоса в камері створювали надлишковий тиск, величина якого відповідала внутрішньому гідростатичному тиску конкретного плоду. Заданий рівень тиску підтримували до моменту, коли температура в центральній частині зразка досягала 15 °С. Після цього тиск поступово знижували, демонтували верхню кришку камери та вилучали плоди для подальшого аналізу.



**Рис. 3. Експериментальна камера для дослідження процесу дефростації плодів під тиском:**  
1 – циліндр; 2 – верхня та нижня кришки; 3 – золотниковий механізм; 4 – манометр;  
5 – притискні гайки; 6 – притискна пластина; 7 – стяжна шпилька

*Результати експериментів засвідчили, що плоди, які піддавалися заморожуванню та подальшій дефростації в умовах підвищеного тиску, характеризуються суттєво кращими зовнішніми показниками (рис. 4) порівняно з тими зразками, які оброблялися за традиційних умов.*

Після проведення дефростації в умовах підвищеного тиску плодоовочева продукція зберегла характерне природне забарвлення й форму, а також відзначалася щільною консистенцією. Крім того, плоди перцю вирізнялися добре збереженим і чітко вираженим ароматом.



**Рис. 4. Плодоовочева сировина після проведення дефростації: а – перець; б – баклажан;  
в – кукурудза; г – виноград**



Отже, результати досліджень засвідчили, що застосування способу заморожування та подальшої дефростації за умови створення тиску, еквівалентного гідростатичному тиску в клітині, забезпечує отримання продукції високої якості. Така сировина навіть за тривалого зберігання демонструє мінімальні зміни фізико-механічних і біохімічних показників.

**Висновки.** Подовження терміну зберігання плодоовочевої продукції залишається важливим науково-практичним завданням, особливо коли йдеться про забезпечення її споживання від урожаю до врожаю, а в окремих випадках і протягом тривалішого періоду. Одним із найбільш перспективних шляхів розв'язання цього питання є застосування заморожування за умови максимального збереження маси та якісних показників продукції. Водночас аналіз свідчить, що кінцева якість продукту після заморожування значною мірою залежить від правильно обраного режиму дефростації. У разі недотримання оптимальних умов плоди та ягоди часто втрачають не лише привабливий зовнішній вигляд, а й смакові властивості. Дослідження засвідчило, що найбільш доцільним напрямом у цьому аспекті є застосування технології заморожування та подальшої дефростації плодів та овочів за умови створення тиску, еквівалентного гідростатичному тиску всередині клітини. За результатами експериментальної роботи визначено оптимальні значення тиску для здійснення цих процесів: для баклажанів – 0,03 МПа, для кукурудзи – 0,045 МПа, для перцю – 0,067 МПа, для винограду – 0,07 МПа. Експериментальні випробування засвідчили, що зразки, які піддавалися заморожуванню й подальшій дефростації за умов прикладення тиску, суттєво перевищують за зовнішніми показниками продукцію, оброблену традиційним способом. Такі плоди зберегли природне забарвлення та форму, характеризувалися щільною консистенцією, а перець, окрім цього, мав виразний, притаманний йому аромат. Таким чином, застосування технології заморожування й розморожування за тиску, еквівалентного гідростатичному тиску в клітині, забезпечує отримання високоякісної продукції, яка навіть у разі тривалого зберігання зазнає мінімальних змін фізико-механічних і біохімічних властивостей.

У подальшій роботі передбачається здійснення досліджень запропонованої технології заморожування та дефростації в промислових умовах. Метою таких випробувань є оцінювання її ефективності й надійності при переробці значних обсягів продукції, а також перевірка стабільності показників якості за тривалих строків зберігання.

#### Список використаних джерел

1. Grover Y. Recent developments in freezing of fruits and vegetables. *Journal of Food Science*. 2023. DOI: 10.1111/1750-3841.16810
2. Кюрчев С. В., Верхованцева В. О., Паляничка Н. О. Дослідження холоду при зберіганні ягід. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету* : наукове фахове видання / ТДАТУ ; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. Запоріжжя : ТДАТУ, 2023. Вип. 23, Т. 2. С. 46–53.
3. Ялпачик В. Ф. Розвиток наукових основ енергозберігаючих технологій заморожування та низькотемпературного зберігання плодоовочевої сировини : автореф. дис. ... докт. техн. наук : 05.18.13 / Одес. держ. акад. холоду. Одеса, 2012. 32 с.
4. Koç G. Ç., Karabacak A. Ö., Süfer Ö. Adal S., Çelebi Y., Kiyak B.D., Öztekin S. Thawing frozen foods: a comparative review of traditional and innovative methods. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2025. P. 1–30.
5. Neri L., Faieta M., Mattia C. D., Sacchetti G., Mastrocola D., Pittia P. Antioxidant Activity in Frozen Plant Foods: Effect of Cryoprotectants, Freezing Process and Frozen Storage. *Foods*. 2020. Dec 17. № 9(12). P. 1886. DOI: 10.3390/foods9121886
6. Li T., Chen W., Huang P. Impact of on-site cold storage on post-harvest losses in fruit supply chains. *International Journal of Refrigeration*. 2025. 146420.
7. Ivanova I., Serdiuk M., Malkina V., Tonkha O., Tsyž O., Shkinder-Barmina A., Verkholtantseva V., Palianychka N., Mushtruk M., Rozbytska T. Factorial analysis of taste quality and technological properties of cherry fruits depending on weather factors. *Potravinárstvo Slovak Journal of Food Sciences. Slovakia*. 2022. Vol. 16. P. 341–355.



8. Otero L. Application of high pressure processing in freezing and thawing processes. *Non-thermal Food Processing Operations*. 2023. P. 359–405. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818717-3.00005-6>
9. Тарасенко В. Г. Вдосконалення обладнання для заморожування харчових продуктів. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету / ТДАТУ імені Дмитра Моторного*. Мелітополь : ТДАТУ імені Дмитра Моторного, 2019. Вип. 19, Т. 2. С. 130–136. DOI: 10.31388/2078-0877-19-2-130-136
10. Ялпачик В. Ф. Нові методи контролю якості плодів при зберіганні холодом. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь, 2013. Вип. 13. Т. 7. С. 3–10.

*Дата першого надходження статті до видання: 19.01.2026*

*Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.02.2026*

*Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026*

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



**N. Palianychka, V. Yalpachyk, O. Prokopenko**

*Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University*

## **EFFICIENCY OF AN INNOVATIVE FREEZING AND DEFROSTING METHOD FOR FRUITS AND VEGETABLES**

### ***Summary***

Extending the shelf life of fruit and vegetable products remains an important scientific and practical task, particularly in ensuring their consumption from harvest to harvest and, in some cases, over even longer periods. Freezing is considered one of the most promising approaches to addressing this issue. However, the final product quality after freezing largely depends on a properly selected defrosting regime and the conditions under which thawing is carried out. This study presents the results of an experimental investigation of the freezing and defrosting of fruit and vegetable raw materials under elevated pressure. The application of pressure improves product quality by minimizing cellular damage, preserving gases dissolved in the cell sap, and facilitating the recovery of the turgor state of plant tissues after thawing. It was established that during freezing the stress state of the cell wall is characterized by tensile stresses, whose magnitude changes according to a hyperbolic relationship over the entire cell surface. To reduce the maximum tensile stresses, the necessity of applying an external load to the cylindrical shell was substantiated; its value should correspond to the hydrostatic pressure inside the cell. Optimal pressure values for freezing and subsequent defrosting were determined: eggplants – 0.03 MPa, corn – 0.045 MPa, peppers – 0.067 MPa, and grapes – 0.07 MPa. Experimental tests showed that samples processed under applied pressure clearly outperformed those treated by conventional methods in external quality indicators, confirming the feasibility of freezing and thawing under elevated-pressure conditions. In particular, pressure-treated samples retained a more intact surface, firmer texture, and better overall appearance after defrosting too.

**Keywords:** freezing, defrosting, hydrostatic pressure, tension, osmotic pressure, temperature, cell, fruit and vegetable products.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-18>

УДК 621.225.001.4

А. І. Панченко<sup>1</sup>, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-1230-1463

А. А. Волошина<sup>1</sup>, д-р. техн. наук

ORCID: 0000-0003-4052-2674

І. А. Панченко<sup>1</sup>, асистент

ORCID: 0000-0003-2150-4278

С. О. Хованський<sup>2</sup>, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-2435-7787

А. А. Волошин<sup>3</sup>, викладач спецдисциплін<sup>1</sup> Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного<sup>2</sup> Сумський державний університет<sup>3</sup> ВСП «Мелітопольський фаховий коледж Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного»

e-mail: voloshinaa2012@gmail.com

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ЗМІНИ ВИХІДНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАНЕТАРНОГО ГІДРОМОТОРА ПРИ ЗНОСІ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ РОТОРІВ

*Анотація.* У статті досліджується вплив зносу робочих поверхонь роторів планетарного гідромотора на його вихідні характеристики. Знос призводить до збільшення діаметрального зазору між роторами, що впливає на крутний момент, частоту обертання та витрати витоків. При зазорі менше критичного відбувається самогерметизація, яка запобігає перетіканням, а при перевищенні – виникають перетікання, що знижують ефективність роботи планетарного гідромотора. Дослідження проведені на трьох рівнях: з ідеальним профілем роторів, з реальним профілем – наявністю похибки виготовлення зубчастого контуру й експериментальні дослідження. Збіг результатів експериментальних даних і результатів моделювання роботи планетарного гідромотора з реальними роторами свідчить про достовірність теоретичних передумов впливу зносу робочих поверхонь роторів планетарного гідромотора на динаміку зміни його вихідних характеристик. Однак необхідно відзначити значні відмінності результатів експериментальних даних і результатів моделювання роботи планетарного гідромотора з теоретичними роторами. Критичне значення діаметрального зазору для першого (теоретичного) рівня в 2,5 раза перевищує це значення для другого (реального) і третього (експериментального) рівнів, що, відповідно, дорівнює 0,4 мм і 0,16 мм. Ці відмінності показують, що технологія виготовлення зубчастих поверхонь роторів планетарного гідромотора значно впливає на динаміку зміни його вихідних характеристик. Тому вдосконалення технології виготовлення, а також модернізація конструкції зубчастої поверхні роторів планетарного гідромотора дасть змогу збільшити ресурс його роботи більше ніж удвічі.

*Ключові слова:* критичний зазор, витрата перетікань, крутний момент, структурно-функціональна схема, експлуатаційні умови.

*Постановка проблеми.* Планетарні (орбітальні) гідромотори сьогодні набувають усе більшого поширення та застосування в різних галузях народного господарства. Їх використовують у приводах роторних очисників дорожнього покриття комунальної та прибиральної техніки, у приводах транспортерів і роторних механізмах зернозбиральних машин, а також у системах рульового управління й ходових системах самохідної техніки. Крім того, планетарні гідромотори знаходять застосування в технологічних лініях різних видів промислових підприємств, що свідчить про їх універсальність і важливість у сучасному виробництві [1–3].

З технічної точки зору планетарні гідромотори займають [4; 5] проміжне положення між двома основними типами гідродвигунів – аксіально-поршневими [6] і радіально-поршневими [7]. Вони поєднують переваги обох типів, забезпечуючи високий стартовий крутний момент



і стабільну роботу при низьких частотах обертання вихідного валу. Завдяки цьому планетарні гідромотори здатні розвивати значний крутний момент у робочих режимах, що дає змогу використовувати їх безпосередньо для приводу різних виконавчих механізмів самоходних машин без необхідності застосування додаткових редукторів [8]. Така особливість значно спрощує конструкцію техніки, підвищує її надійність і знижує експлуатаційні витрати.

Однак при тривалій експлуатації планетарних гідромоторів виникає природний процес зносу робочих поверхонь їх роторів, що призводить до збільшення діаметрального зазору між внутрішнім і зовнішнім роторами. Цей процес є критичним для функціонування гідромотора, оскільки впливає на його вихідні характеристики й ефективність роботи. Відомо, що збільшення діаметрального зазору супроводжується двома основними фазами взаємодії роторів [4; 5]. Перша фаза характеризується явищем самогерметизації, коли внутрішній і зовнішній ротори взаємодіють таким чином, що забезпечується відокремлення зони високого тиску від зони низького тиску. Це дає змогу підтримувати необхідний рівень герметичності й зберігати ефективність роботи гідромотора навіть при певному ступені зносу. Проте, коли діаметральний зазор перевищує критичне значення, настає друга фаза взаємодії – функціональна розгерметизація роторів. У цій фазі порушується герметичність, тобто відбувається розгерметизація, що призводить до значного погіршення робочих параметрів гідромотора та зниження його продуктивності [5].

Теоретичні дослідження підтверджують [4; 5], що при значеннях зазору, менших за критичні, функціональні параметри гідромотора залишаються стабільними та їх залежності паралельні осі абсцис, що свідчить про відсутність суттєвих змін у роботі [4]. Однак при перевищенні критичного зазору спостерігається різке погіршення цих параметрів, що негативно впливає на динаміку вихідних характеристик планетарного гідромотора [5].

У зв'язку з цим, питання експериментального дослідження впливу зносу робочих поверхонь роторів планетарного гідромотора на динаміку зміни його вихідних характеристик є надзвичайно актуальним науковим напрямом. Такі дослідження дають змогу розробити методи контролю, діагностики та підвищення надійності планетарних гідромоторів. Вони сприяють оптимізації конструктивних рішень і режимів роботи, що в кінцевому результаті підвищує ефективність і довговічність планетарних гідромоторів у різних сферах застосування.

Таким чином, експериментальні дослідження, спрямовані на вивчення впливу зносу робочих поверхонь роторів на динаміку вихідних характеристик планетарного гідромотора, є ключовим етапом у розвитку сучасних гідравлічних приводів і мають велике практичне значення для промислового та сільськогосподарського машинобудування.

*Аналіз останніх досліджень.* Для проектування й оптимізації гідромашин із зубчастим зачепленням запропоновано імітаційні моделі, які дають змогу моделювати складні процеси взаємодії зубців ротора [9; 10]. Ці моделі є важливим інструментом для прогнозування поведінки зубчастих передач у різних режимах роботи. Крім того, проведено детальний кінематичний аналіз руху роторів, що дає змогу краще зрозуміти закономірності їх взаємодії та вплив геометричних параметрів на роботу системи [11]. Особлива увага приділяється врахуванню зазорів між зубцями та їх деформації при контакті, що є критичним фактором для точності передачі руху й довговічності зубчастих механізмів [12].

Теорія зачеплення роторів [13] дає розуміння процесів контакту між зубцями, що є основою для подальшого розвитку кінематичних [14] і геометричних [15] параметрів профілів зубчастих роторів. Важливим аспектом є дослідження впливу кута розмаху профілю зуба на розподіл контактних зусиль між внутрішнім і зовнішнім роторами [16]. Це дає змогу оптимізувати конструкцію зубців для зменшення локальних напружень і підвищення надійності. Розрахунки контактних напружень у зубцях ротора [17] і на обертових елементах [18] дають змогу оці-



нити потенційні зони зносу й пошкоджень, що є важливим для прогнозування ресурсу роботи машини. Запропоновані підходи для зниження цих напружень [19] спрямовані на підвищення довговічності й ефективності зубчастих передач.

Окремо проведено аналіз витіснення робочої рідини [20] і визначено миттєву витрату героторних насосів [21], що є ключовими параметрами для оцінки продуктивності гідравлічних машин. Запропоновано профіль ротора, який дає змогу збільшити витрату рідини при низьких швидкостях [22]. Проте варто зазначити, що такий профіль супроводжується пульсаціями тиску, які негативно впливають на стабільність роботи всієї системи [23]. Це свідчить про існування компромісу між продуктивністю і стабільністю, що є типовою проблемою при оптимізації гідравлічних машин.

У сучасних дослідженнях гідравлічних двигунів героторного типу значну увагу приділяють моделюванню процесів зносу та їх впливу на робочі характеристики машин. Зокрема, запропонована модель зносу в героторних гідродвигунах [24] дає змогу враховувати фізичні зміни контактних поверхонь роторів у процесі експлуатації, що є важливим для прогнозування довговічності й ефективності роботи цих машин. Аналіз зносу контактних поверхонь роторів [25] дає змогу виявити основні механізми, які впливають на герметичність і передачу крутного моменту.

Особливу увагу приділено моделюванню зазорів між зубцями й визначенню витоків у зубчастому зачепленні орбітального гідродвигуна [26], а також у гідромашинах з евольвентною і циклоїдальною зубчастою передачею [27]. Вивчення зазорів між зубцями роторів, пов'язаних із наявністю витоків [28], є ключовим для розуміння причин зниження ефективності гідромашин. Витоки рідини через зазори призводять до зниження робочого тиску, утрат потужності та, як наслідок, до погіршення вихідних характеристик.

У цьому контексті представлено підхід до аналізу витоків для різних типів гідравлічних насосів [29], що дає змогу систематизувати питання про механізми втрат і розробити методи їх мінімізації. Запропонована нова конструкція героторного насоса зі змінним зазором [30] є спробою адаптувати робочі параметри машини до умов експлуатації, зменшуючи втрати й підвищуючи ефективність. Водночас розроблена прогноуюча модель внутрішніх витоків з урахуванням фізичного зазору між роторами [31] і математична модель для прогнозування ефективності потоку й об'єму [32] дають змогу більш точно оцінювати робочі характеристики гідромашин у реальних умовах.

Обґрунтовані параметри системи роторів для прогнозування зміни вихідних характеристик планетарного гідромотора [33] і запропонована багатокритеріальна оптимізація зубчастого профілю роторів [34] відкривають нові можливості для підвищення продуктивності й надійності гідравлічних приводів. Оптимізація нерівномірності витрати й швидкості зносу [35] є важливим кроком для збалансування продуктивності й довговічності машин.

Проте, незважаючи на значний обсяг теоретичних і чисельних досліджень, вплив зносу робочих поверхонь роторів, а саме збільшення зазору між роторами планетарного гідромотора, на зміну його вихідних характеристик досі не був предметом експериментального вивчення. Це створює суттєву прогалину в розумінні реальних процесів, що відбуваються в робочих камерах гідромоторів під час експлуатації.

Критично оцінюючи наявні напрацювання, можна зазначити, що більшість моделей базується на ідеалізованих припущеннях, які не завжди адекватно відображають складність фізичних процесів, зокрема взаємодію поверхонь роторів при зносі й утворення зазорів. Відсутність експериментальних даних ускладнює верифікацію моделей і їх застосування для практичного проектування та діагностики.

Також варто звернути увагу на те, що зміна зазору між роторами не лише впливає на герметичність і втрати, а й може викликати зміну динамічних характеристик гідромотора, таких



як коливання тиску, нерівномірність обертання та вібрації, що негативно позначається на стабільності роботи всієї системи. Ці аспекти потребують комплексного експериментального вивчення з використанням сучасних методів вимірювання й аналізу.

Отже, дослідження спрямоване на заповнення цієї наукової прогалини шляхом проведення експериментальних досліджень впливу зносу робочих поверхонь роторів планетарного гідромотора на динаміку зміни його вихідних характеристик. Такий підхід дасть змогу не лише підтвердити або уточнити наявні теоретичні моделі, а й розробити практичні рекомендації щодо підвищення надійності й ефективності гідравлічних приводів у різних сферах застосування.

*Формулювання мети статті (постановка завдання).* Для експериментального визначення впливу зносу робочих поверхонь роторів планетарного гідромотора на динаміку зміни його вихідних характеристик при зміні діаметрального зазору між його роторами дослідженнями передбачена розробка математичного апарату й структурно-функціональної схеми моделювання динаміки зміни вихідних параметрів планетарного гідромотора при зміні зносу (діаметрального зазору); проведення теоретичних (шляхом моделювання) та експериментальних (стендових) досліджень динаміки зміни вихідних характеристик планетарного гідромотора при зміні діаметрального зазору між його роторами.

*Основна частина.* При аналізі змін параметрів, що визначають функціональні характеристики планетарного гідромотора, особливу увагу привертають три ключові параметри: крутний момент  $M_{кр}$ , частота обертання  $n$  вихідного валу гідромотора та витрата перетікань  $Q_{пер}$  [4, 5]. Саме зміни цих параметрів у планетарних гідромоторах, які залежать від ступеня зносу робочих поверхонь роторів, що проявляється в збільшенні діаметрального зазору, відбуваються принципово інакше, ніж у звичайних гідромашинах об'ємного типу [4; 5]. Це зумовлює необхідність детального вивчення їх поведінки з урахуванням особливостей конструкції та кінематики планетарних гідромоторів.

У зв'язку з цим у роботі проведено дослідження зміни функціональних параметрів ( $M_{кр}$ ,  $n$ ,  $Q_{пер}$ ) планетарного гідромотора залежно від діаметрального зазору, що є показником зносу робочих поверхонь роторів. Дослідження виконані на трьох рівнях, кожен із яких відображає різні ступені наближення до реальних умов роботи гідромотора.

Перший рівень передбачає теоретичні дослідження планетарного гідромотора, ротори якого мають ідеальний профіль циклоїдального зачеплення. Під ідеальним профілем розуміється зубчастий контур без будь-яких похибок виготовлення, тобто з абсолютно правильним геометричним контуром, що відповідає теоретичним параметрам циклоїдального профілю [36; 37]. Такий підхід дає змогу отримати базове уявлення про вплив діаметрального зазору на вихідні характеристики гідромотора без ускладнень, пов'язаних із виробничими дефектами.

Другий рівень досліджень стосується гідромотора з реальним профілем циклоїдального зачеплення роторів. Реальний профіль відрізняється наявністю похибок виготовлення, що призводить до непередбачуваних змін діаметрального зазору. Ці похибки можуть суттєво впливати на роботу гідромотора, викликаючи додаткові втрати, нерівномірність обертання та зниження ефективності. Аналіз такого рівня дає змогу врахувати виробничі особливості й наблизити результати до реальних умов експлуатації.

Третій рівень передбачає проведення експериментальних досліджень планетарного гідромотора, ротори якого мають похибки форми виготовлення. Цей рівень є найбільш наближеним до умов експлуатації, оскільки враховує реальні дефекти, що виникають у процесі виробництва й експлуатації, і дає змогу оцінити їх вплив на динаміку зміни вихідних параметрів гідромотора.

Для теоретичних досліджень першого та другого рівнів розроблено математичний апарат, який описує вплив діаметрального зазору (зносу) на динаміку зміни вихідних характеристик



планетарного гідромотора. Залежно від зміни діаметрального зазору теоретичне значення крутного моменту  $M_{кр}$  визначається добутком результуючої сили від дії тиску робочої рідини  $F$  на плече її застосування  $h$  [36; 37]:

$$\begin{aligned} M_{тор} &= F \cdot h; \\ F &= 2 \cdot \left( e \pm \frac{G}{2} \right) \cdot \Delta p \cdot b \cdot (z_1 + 1); \\ h &= e + R_1; \end{aligned} \quad (1)$$

де  $e$  – міжцентрова відстань між роторами;  $G$  – діаметральний зазор між роторами;  $\Delta p$  – різниця тисків рідини;  $b$  – ширина роторів;  $z_1$  – кількість зубів внутрішнього ротора;  $R_1$  – радіус розташування центрів зубів внутрішнього ротора [36, 37].

Реальне значення крутного моменту  $M_{кр}$  з урахуванням похибки форми виготовлення роторів, визначається зміною величини плеча  $h = h_i$  [5]:

$$h_i = e + R_1 - \left[ \left( e + R_{1i} \cdot \sin \frac{3\pi}{z_1} \right) \cdot \frac{R_2 \cdot \sin \frac{\pi}{z_2}}{r_1 + r_2} \pm \frac{G}{2} \right] \cdot C_{n,\phi}, \quad (2)$$

де  $z_2$  – кількість зубів зовнішнього ротора;  $R_2$  – радіус розташування центрів зубів зовнішнього ротора,  $C_{n,\phi}$  – коефіцієнт, що враховує похибку форми виготовлення роторів.

У процесі експлуатації планетарного гідромотора важливим параметром, що впливає на його робочі характеристики, є діаметральний зазор  $G$  між роторами. Цей зазор визначає ступінь герметичності робочих камер і, відповідно, наявність або відсутність перетікань робочої рідини всередині гідромотора.

При значенні діаметрального зазору  $G$ , менше за критичне значення ( $G < G_{кр}$ ) перетікання робочої рідини в планетарному гідромоторі відсутні. Це пояснюється явищем самогерметизації, коли зона нагнітання робочої рідини надійно відокремлена від зони зливу. Самогерметизація забезпечує підтримання необхідного тиску в робочих камерах і запобігає перетіканням, що дає гідромотору змогу працювати з високою ефективністю й стабільністю [4]. Такий режим є оптимальним для роботи гідромотора, оскільки мінімізує втрати енергії через витoki та забезпечує максимальний крутний момент і продуктивність.

Однак при збільшенні значення діаметрального зазору більше критичного значення ( $G > G_{кр}$ ) між роторами починають виникати перетікання робочої рідини. Це призводить до зниження герметичності, погіршення робочих характеристик і зменшення ефективності роботи планетарного гідромотора [5]. Перетікання робочої рідини через діаметральний зазор створює додаткові втрати, що негативно впливають на крутний момент, частоту обертання вихідного валу й загальну продуктивність.

Теоретичні значення витрат перетікань  $Q_{nep}$  залежать від діаметрального зазору й характеризуються витратою рідини через щілину висотою  $G'$ , яка утворюється циліндричними поверхнями зубців внутрішнього й зовнішнього роторів у зоні формування діаметрального зазору  $G$ . Проте реальні значення витрати перетікань  $Q_{nep}$  відрізняються від теоретичних через наявність додаткових перетікань робочої рідини через щілину висотою  $G''$ , у протилежній зоні діаметрального зазору  $G$ , у зв'язку зі зміною величини плеча  $h = h_i$  і визначаються залежністю:

$$Q_{nep} = \mu \cdot b \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \cdot (G' + G''), \quad (3)$$



де  $\mu$  – коефіцієнт, що характеризує геометрію проточної частини;  $\rho$  – кінематична в'язкість робочої рідини.

Теоретична частота обертання  $n$  валу планетарного гідромотора за наявності діаметрального зазору визначається виразом [5]:

$$n = \frac{n_T \cdot (\pi - 2 \cdot t_1 \cdot n_T \cdot z_1 \cdot z_2)}{\pi - t_1 \cdot n_T \cdot z_1 \cdot z_2};$$
$$t_1 = \frac{G \cdot R_1 \cdot b_1}{2 \cdot n_T \cdot V_0 \cdot \cos \delta};$$
(4)

де  $t_1$  – час «спливання» внутрішнього ротора;  $n_T$  – частота обертання валу гідромотора за відсутності діаметрального зазору  $G$ ;  $V_0$  – робочий об'єм гідромотора;  $\delta$  – кут нахилу нормалі «спливання» внутрішнього ротора.

При зміні величини плеча  $h = h_i$  плеча реальна частота  $n'$  обертання вала планетарного гідромотора визначається виразом:

$$n' = \frac{Q_0 - Q_{nep}}{V_0},$$
(5)

де  $Q_0$  – дійсна (задана) витрата робочої рідини.

У результаті досліджень розроблено математичний апарат, що дає змогу провести моделювання динаміки зміни вихідних параметрів планетарного гідромотора при зміні діаметрального зазору (знос).

Критично оцінюючи підхід, варто зазначити, що, хоча математичний апарат дає змогу теоретично описати вплив діаметрального зазору, реальні умови експлуатації гідромотора можуть бути значно складнішими. Зокрема, похибки виготовлення, нерівномірність зносу, температурні та динамічні впливи можуть викликати додаткові ефекти, які важко врахувати в спрощених моделях. Тому поєднання теоретичних досліджень з експериментальними є необхідним для отримання повної картини впливу зносу на вихідні характеристики планетарного гідромотора.

Дослідження зміни функціональних параметрів планетарного гідромотора ( $M_{кр}$ ,  $n$ ,  $Q_{nep}$ ), залежно від діаметрального зазору, виконувалися на трьох рівнях. На першому та другому рівнях проводилися теоретичні дослідження шляхом моделювання процесів експлуатації (зносу елементів) планетарних гідромашин за допомогою системи блочного моделювання VisSim. Вхідними параметрами при моделюванні приймалися такі: робочий об'єм гідромотора  $V_0 = 630 \text{ см}^3$ , перепад тиску  $\Delta p = 16 \text{ МПа}$ , кількість зубів внутрішнього ротора  $z_1 = 9$ , зовнішнього ротора –  $z_2 = 10$ .

Для моделювання експлуатаційних умов розроблено структурно-функціональну схему, що дає змогу визначити зміну вихідних параметрів планетарного гідромотора при зносі зубчастих поверхонь його роторів (рис. 1). Вихідними параметрами планетарного гідромотора прийнято крутний момент, який описаний рівнянням (1) і реалізується блоком 1, витрата перетікань, яка визначається рівнянням (3) та реалізується блоком 2, і частота обертання, що визначається рівняннями (4), (5) і реалізується блоком 3. Блок 4 дає змогу вивести залежність зміни вихідних параметрів планетарного гідромотора на екран.

Зміни функціональних параметрів планетарного гідромотора ( $M_{кр}$ ,  $Q_{nep}$ ,  $n$ ) для теоретичного циклоїдального зачеплення залежно від зміни діаметрального зазору  $G$  (рис. 2) характеризуються двома ділянками  $G < G_{кр}$  і  $G > G_{кр}$  (при значенні  $G_{кр} = 0,4 \text{ мм}$ ) [4; 5].

Теоретичний крутний момент  $M_{кр}$  у всьому діапазоні зміни діаметрального зазору  $G$  від 0 до 0,6 мм характеризується прямою лінією, має незначні відхилення (до 3,5 %) від свого номінального значення, змінюючись у діапазоні від 1450 Н · м до 1400 Н · м (рис. 2, крива 1).

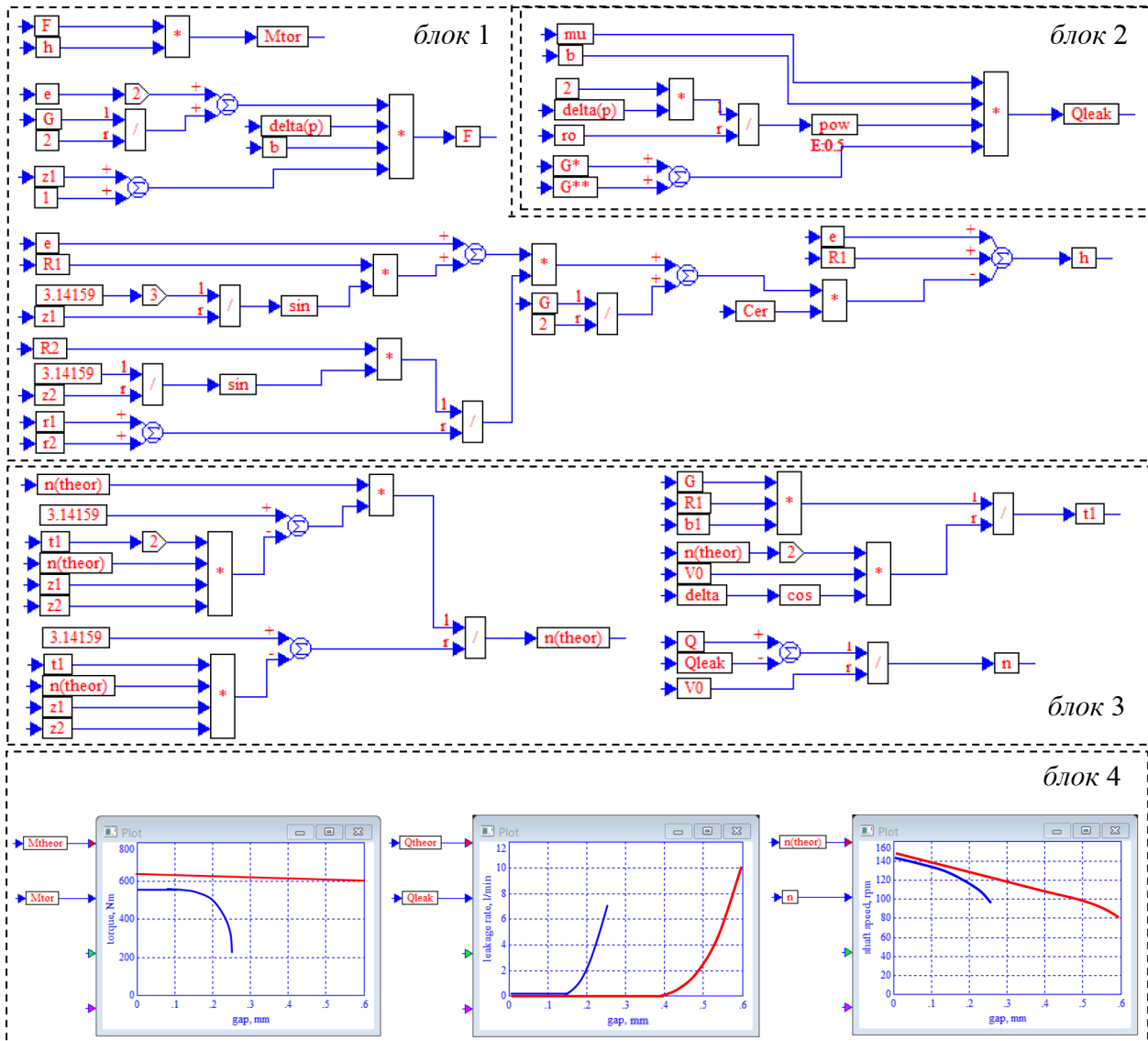
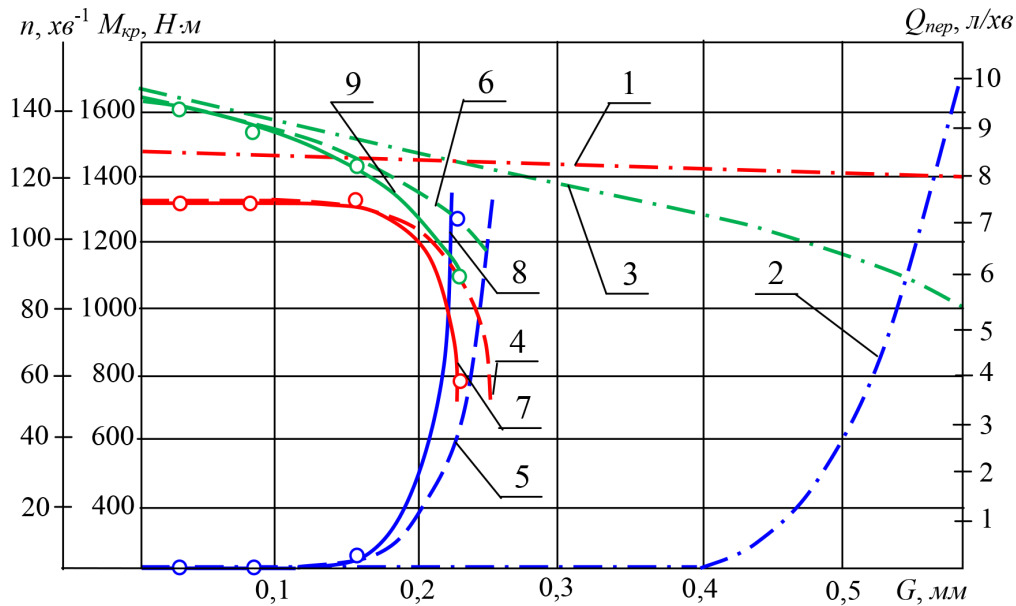


Рис. 1. Структурно-функціональна схема моделювання зміни вихідних параметрів планетарного гідромотора при зносі зубчастих поверхонь його роторів

Теоретична витрата перетікань  $Q_{пер}$  (рис. 2, крива 2) на першій ділянці при зміні діаметрального зазору  $G$  в діапазоні від 0 до 0,4 мм ( $G < G_{кр}$ ) відсутня, а на другій ділянці при збільшенні діаметрального зазору  $G$  від 0,4 до 0,6 мм відбувається «розгерметизація» роторів [5] і теоретична витрата перетікань  $Q_{пер}$  характеризується параболічною залежністю, різко зростаючи від 0 до 10 л/хв (рис. 1, крива 2).

Зміна теоретичної частоти обертання валу гідромотора  $n$  на першій ділянці (рис. 2, крива 3) при зміні діаметрального зазору  $G$  в діапазоні від 0 до 0,4 мм ( $G < G_{кр}$ ) має лінійний характер, при цьому значно зменшується (до 29 %) у діапазоні від 150 хв<sup>-1</sup> до 107 хв<sup>-1</sup>. Причиною такої зміни теоретичної частоти обертання є додаткові переміщення внутрішнього ротора [4]. На другій ділянці зі збільшенням діаметрального зазору від 0,4 до 0,6 мм виникають теоретичні витрати перетікань  $Q_{пер}$ , унаслідок «розгерметизації» роторів. У цьому випадку зміна теоретичної частоти обертання  $n$  відбувається за параболічним законом і тільки на цій ділянці зменшується (на 25,3 %) від 107 хв<sup>-1</sup> до 80 хв<sup>-1</sup> (рис. 2, крива 3).

Зміни функціональних параметрів для реального циклоїдального зачеплення залежно від зміни діаметрального зазору  $G$  також характеризуються двома ділянками (рис. 2, криві 4, 5



**Рис. 2.** Залежність зміни вихідних параметрів планетарного гідромотора від діаметрального зазору (зносу): 1, 2 і 3 – криві зміни теоретичного крутного моменту, теоретичної витрати перетікань і теоретичної частоти обертання відповідно [5]; 4, 5 і 6 – криві зміни реального крутного моменту, реальної витрати перетікань і реальної частоти обертання відповідно; 7, 8 і 9 – експериментальні криві зміни крутного моменту, витрати перетікань і частоти обертання відповідно

і 6). У реальному циклоїдальному зачепленні поділ ділянок відбувається за значення критичного зазору  $G_{кр} = 0,16$  мм. Це пояснюється тим, що при моделюванні процесів, які відбуваються в реальному циклоїдальному зачепленні, на відміну від теоретичного, урахувалася похибка форми зубчастого контуру роторів, зумовлена їх виготовленням. Наявність похибки форми виготовлення зубчастого профілю роторів викликає дискретне зменшення плеча  $h_i$  прикладення результуючої сили тиску робочої рідини, описане рівнянням (2). Цей процес на другій ділянці (при  $G > G_{кр}$ ) характеризується різкими змінами реальних значень функціональних параметрів ( $M_{кр}$ ,  $n$ ,  $Q_{пер}$ ).

Реальний крутний момент  $M_{кр}$ , діапазон зміни діаметрального зазору  $G$  від 0 до 0,16 мм, характеризується прямою лінією та практично не має відхилення від свого початкового значення. На першій ділянці крутний момент дорівнює  $M_{кр} = 1320$  Н · м (рис. 2, крива 4). На другій ділянці (при  $G > G_{кр}$ ) реальний крутний момент різко зменшується (на 42 %) до величини  $M_{кр} = 720$  Н · м, при максимальному значенні діаметрального зазору  $G_{max} = 0,25$  мм (рис. 2, крива 4).

Реальна витрата перетікань  $Q_{пер}$ , як і теоретична, при зміні діаметрального зазору  $G$  в діапазоні від 0 до 0,16 мм (на першій ділянці) відсутня (рис. 2, крива 5). На другій ділянці при збільшенні діаметрального зазору від критичного  $G_{кр} = 0,16$  мм до максимального  $G_{max} = 0,25$  мм, у результаті зменшення плеча  $h_i$  прикладення результуючої сили, реальна витрата перетікань  $Q_{пер}$  різко збільшується. При максимальному значенні діаметрального зазору  $G_{max} = 0,25$  мм, унаслідок «розгерметизації» роторів [5], значення реальної витрати перетікань  $Q_{пер}$  досягає 7,5 л/хв (рис. 2, крива 5).

Зменшення реальної частоти обертання  $n$  на першій і другій ділянках відбувається за параболічним законом без різких відхилень, але досить динамічно (рис 2, крива 6). При зміні діаметрального зазору в діапазоні від 0 до 0,25 мм, унаслідок «додаткових» переміщень внутрішнього ротора [5] і збільшення реальної витрати перетікань  $Q_{пер}$ , значення реальної частоти



обертання  $n$  зменшується на 65,5 %, змінюючись при цьому в діапазоні від  $145 \text{ хв}^{-1}$  до  $50 \text{ хв}^{-1}$  (рис 2, крива 6).

Необхідно відзначити, що результати моделювання першого (теоретичного) і другого (реального) рівнів за характером закономірностей досить близькі, а в кількісних (цифрових) показниках значно відрізняються. Критичне значення діаметрального зазору  $G_{кр}$  для першого (теоретичного) рівня у 2,5 раза перевищує це значення для другого (реального) рівня й, відповідно, дорівнює  $G_{кр} = 0,4 \text{ мм}$  і  $G_{кр} = 0,16 \text{ мм}$ . Це пояснюється тим, що в теоретичному циклоїдальному зачепленні (перший рівень), за умовою моделювання, відсутня похибка форми зубчастого контуру, а при моделюванні реального зачеплення (другий рівень) вона задається як результат похибки виготовлення.

Третій рівень передбачає проведення експериментальних досліджень планетарного гідромотора, ротори якого мають похибки форми виготовлення зубчастого профілю [36; 37]. Експериментальні дослідження проводилися з використанням планетарного гідромотора PRG-22, потужністю 22 кВт і робочим об'ємом  $V_0 = 630 \text{ см}^3$ . Номінальний перепад тиску  $\Delta p = 16 \text{ МПа}$  забезпечує крутний момент  $M_{кр} = 1300 \text{ Н} \cdot \text{м}$ , а дійсна витрата робочої рідини  $Q_0 = 96 \text{ л/хв}$  дає змогу отримати номінальну частоту обертання  $n = 145 \text{ хв}^{-1}$ . Кількість зубів внутрішнього та зовнішнього роторів, відповідно, дорівнюють  $z_1 = 9$  і  $z_2 = 10$ .

Експериментальний крутний момент  $M_{кр}$ , витрата перетікань  $Q_{пер}$  і частота обертання  $n$  (рис. 2, криві 7, 8, 9) на першій і другій ділянках змінюються аналогічно до реальних значень крутного моменту  $M_{кр}$ , витрати перетікань  $Q_{пер}$  і частоти обертання  $n$ , відповідно, маючи ті ж числові значення (рис. 2, криві 7 і 4). Однак граничне значення діаметрального зазору  $G_{max}$  для експериментальних значень крутного моменту  $M_{кр}$ , витрати перетікань  $Q_{пер}$  і частоти обертання  $n$  на 8 % менше цих же значень при реальних дослідженнях і, відповідно, дорівнюють  $G_{max} = 0,23 \text{ мм}$  та  $G_{max} = 0,25 \text{ мм}$  (рис. 2, криві 7 і 4).

Збіг результатів експериментальних даних і результатів моделювання роботи планетарного гідромотора з реальними роторами свідчить про достовірність теоретичних передумов впливу зносу робочих поверхонь роторів планетарного гідромотора на динаміку зміни його вихідних характеристик. Однак необхідно відзначити значні відмінності результатів експериментальних даних і результатів моделювання роботи планетарного гідромотора з теоретичними роторами. Критичне значення діаметрального зазору для першого (теоретичного) рівня у 2,5 раза перевищує це значення для другого (реального) і третього (експериментального) рівнів, що, відповідно, дорівнює  $0,4 \text{ мм}$  і  $0,16 \text{ мм}$ . Ці відмінності показують, що технологія виготовлення зубчастих поверхонь роторів планетарного гідромотора значно впливає на динаміку зміни його вихідних характеристик. Тому вдосконалення технології виготовлення, а також модернізація конструкції зубчастої поверхні роторів планетарного гідромотора дасть змогу збільшити ресурс його роботи більше ніж удвічі.

**Висновки.** У результаті досліджень розроблено математичний апарат і структурно-функціональну схему, що дають змогу моделювати динаміку зміни вихідних параметрів планетарного гідромотора від зносу робочих поверхонь його роторів.

Дослідження динаміки зміни вихідних характеристик планетарного гідромотора залежно від зносу (діаметрального зазору) показують, що теоретичний крутний момент і теоретична частота обертання при зміні діаметрального зазору від 0 до 0,6 мм, характеризуються прямою лінією. Теоретичний крутний момент має відхилення до 3,5 %, змінюючись від  $1450 \text{ Н} \cdot \text{м}$  до  $1400 \text{ Н} \cdot \text{м}$ , а теоретична частота обертання має значні відхилення до 47 %, змінюючись від  $150 \text{ хв}^{-1}$  до  $80 \text{ хв}^{-1}$ . Це пояснюється додатковими переміщеннями внутрішнього ротора. Теоретична витрата перетікання робочої рідини досягає  $10 \text{ л/хв}$  при критичному значенні діаметрального зазору  $0,4 \text{ мм}$ .



Динаміка зміни функціональних параметрів реального циклоїдального зачеплення характеризуються двома ділянками, при цьому поділ відбувається при значенні діаметрального зазору 0,16 мм. Це пояснюється наявністю похибки форми виготовлення зубчастого профілю роторів, що викликає дискретне зменшення плеча застосування результуючої сили тиску робочої рідини.

Реальний крутний момент і витрата перетікань у діапазоні зміни діаметрального зазору від 0 до 0,16 мм характеризується прямою лінією. На другій ділянці реальний крутний момент різко зменшується (на 42 %) до  $720 \text{ Н} \cdot \text{м}$ , а реальна витрата перетікань різко збільшується і досягає 7,5 л/хв при максимальному значенні діаметрального зазору 0,25 мм. Зменшення реальної частоти обертання на 65,5 % відбувається досить динамічно за параболічним законом, змінюючись у діапазоні від  $145 \text{ хв}^{-1}$  до  $50 \text{ хв}^{-1}$ . Така зміна реальної частоти обертання відбувається внаслідок «додаткових» переміщень внутрішнього ротора та збільшення реальної витрати перетікань.

Експериментальними дослідженнями планетарного гідромотора встановлено, що експериментальні крутний момент, витрата перетікань і частота обертання змінюються аналогічно реальним значенням, маючи такі ж числові значення. Граничне значення діаметрального зазору для експериментальних значень на 8 % менше цих значень при реальних дослідженнях і, відповідно, дорівнюють 0,23 мм і 0,25 мм.

Збіг результатів експериментальних даних і результатів моделювання роботи планетарного гідромотора з реальними роторами свідчить про достовірність теоретичних передумов впливу зносу робочих поверхонь роторів планетарного гідромотора на динаміку зміни його вихідних характеристик. Однак необхідно відзначити значні відмінності результатів експериментальних даних і результатів моделювання роботи планетарного гідромотора з теоретичними роторами. Критичне значення діаметрального зазору для першого (теоретичного) рівня у 2,5 раза перевищує це значення для другого (реального) і третього (експериментального) рівнів, що, відповідно, дорівнює 0,4 мм і 0,16 мм. Ці відмінності показують, що технологія виготовлення зубчастих поверхонь роторів планетарного гідромотора значно впливає на динаміку зміни його вихідних характеристик. Тому вдосконалення технології виготовлення, а також модернізація конструкції зубчастої поверхні роторів планетарного гідромотора дасть змогу збільшити ресурс його роботи більше ніж удвічі.

#### Список використаних джерел

1. Nadykto V., Kyurchev V., Chaplinskyi A., Ayubov A. Ways to increase the traction efficiency of modular draft device. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021. № 1021(1). 012043. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012043>
2. Bulgakov V., Aboltins A., Beloev H., Nadykto V., Kyurchev V., Adamchuk V., Kaminskiy V. Experimental investigation of plow-chopping unit. *Agriculture (Switzerland)*, 2021. № 11(1). P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture11010030>
3. Nadykto V., Kyurchev V., Bulgakov V., Findura P., Karaiev O. Influence of the Plough with Tekrone Mouldboards and Landsides on Ploughing Parameters. *Acta Technological Agriculture*. 2020. № 23(1). P. 40–45. DOI: <https://doi.org/10.2478/ata-2020-0007>
4. Panchenko A., Voloshina A., Luzan P., Panchenko I., Volkov S. Kinematics of motion of rotors of an orbital hydraulic machine. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. № 1021(1). 012045. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012045>
5. Панченко А. І., Волошина А. А., Панченко І. А., Волошин А. А. Вплив величини діаметрального зазору на кінематику руху внутрішнього ротора орбітального гідромотора. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2023. Вип. 13. Т. 1. DOI: <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2023-1-3>
6. Andrenko P., Rogovyi A., Hrechka I., Khovanskyi S., Svyarenko M. The Influence of the Gas Content in the Working Fluid on Parameters of the Hydraulic Motor's Axial Piston. *DSMIE 2021: Advances in Design, Simulation and Manufacturing VI*. LNME. Springer, Cham, 2021. P. 97–106. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-77823-1\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-77823-1_10)



7. Zhang X., Zhang J., Xu B., Yang Z., Zhao Q., Zhang H. The effect of slotted hole on minimum oil film thickness of piston in radial piston hydraulic motor. *Proceedings of ASME/BATH 2021: Symposium on Fluid Power and Motion Control*. 2021. 175622. DOI: <https://doi.org/10.1115/FPMC2021-69937>
8. Roquet P., Raush G., Berne L. J., Gamez-Montero P.-J., Codina E. Energy Key Performance Indicators for Mobile Machinery. *Energies*. 2022. № 15(4). P. 1364. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15041364>
9. Rundo M. Models for flow rate simulation in gear pumps: A review. *Energies*. 2017. № 10. P. 1261. DOI: <https://doi.org/10.3390/en10091261>
10. Paffoni B. Pressure and film thickness in a trochoidal hydrostatic gear pump. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers G*. 2003. № 217. P. 179–187. DOI: <https://doi.org/10.1243/095441003769700744>
11. Панченко А. І., Волошина А. А., Панченко І. А. Надійність конструкції роторів планетарного гідромотора. *Праці ТДАТУ*. 2020. Вип. 20. Т. 1. С. 82–92. DOI: <https://doi.org/10.31388/2078-0877-20-1-82-92>
12. Paffoni B., Progri R., Gras R. Teeth clearance effects upon pressure and film thickness in a trochoidal hydrostatic gear pump. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers G*. 2004. № 218. P. 247–256. DOI: <https://doi.org/10.1243/0954410041872799>
13. Bonandrini G., Mimmi G., Rottenbacher C. Theoretical analysis of internal epitrochoidal and hypotrochoidal machines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers C*. 2009. № 223. P. 1469–1480. DOI: <https://doi.org/10.1243/09544062JMES1163>
14. Bonandrini G., Mimmi G., Rottenbacher C. Theoretical Analysis of an Original Rotary Machine. *Journal of Mechanical Design*. 2010. № 132(2). 024501. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4000698>
15. Bonandrini G., Mimmi G., Rottenbacher C. Design and simulation of meshing of a particular internal rotary pump. *Mechanism and Machine Theory*. 2012. № 49. P. 104–116. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2011.11.001>
16. Hsieh C.F. Fluid and dynamics analyses of a gerotor pump using various span angle Designs. *Journal of Mechanical Design*. 2012. № 134(12). 121003. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4007703>
17. Kwon S.-M., Kim C.-H., Shin J.-H. Analytical wear model of a gerotor pump without hydrodynamic effect. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*. 2008. № 2. P. 230–237. DOI: <https://doi.org/10.1299/jamdsm.2.230>
18. Ivanovic' L., Rakic' B., Stojanovic' B., Matejic' M. Comparative analysis of analytical and numerical calculations of contact stresses at rotational elements of gerotor pumps. *Applied Engineering Letters*. 2016. № 1. P. 1–7.
19. Ivanovic' L. Reduction of the maximum contact stresses by changing geometric parameters of the trochoidal gearing teeth profile. *Meccanica*. 2016. № 51. P. 2243–2257.
20. Yang D. C. H., Yan J., Tong S.-H. Flowrate formulation and displacement analyses for deviation function-based gerotor pumps. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers C*. 2011. № 225. P. 480–487. DOI: <https://doi.org/10.1243/09544062JMES2203>
21. Liu H., Lee J.-C., Yoon A., Kim S.-T. Profile design and numerical calculation of instantaneous flow rate of a gerotor pump. *Journal of Applied Mathematics and Physics*. 2015. № 3. P. 92–97. DOI: <https://doi.org/10.4236/jamp.2015.31013>
22. Hao C., Wenming Y., Guangming L. Design of gerotor oil pump with new rotor profile for improving performance. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers C*. 2016. № 230. P. 592–601. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954406215618228>
23. O'Shea C. Hydraulic Flow Ripple Cancellation Using the Primary Flow Source. *BATH/ASME 2016: Symposium on Fluid Power and Motion Control*. 2016. FPMC2016-1783, V001T01A044. 9 p. DOI: <https://doi.org/10.1115/FPMC2016-1783>
24. Furustig J., Larsson R., Almqvist A., Bates C.A., Ennemark P. A wear model for EHL contacts in gerotor type hydraulic motors. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers C*. 2015. № 229. P. 254–264. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954406214534204>
25. Ivanovic' L., Mackic' T., Stojanovic' B. Analysis of the instantaneous friction coefficient of the trochoidal gear pair. *Journal of the Balkan Tribological Association*. 2016. № 22. P. 281–293.



26. Bigliardi E., Francia M., Milani M., Montorsi L., Paltrinieri F., Stefani M. A combined methodology for studying the axial balancing mechanism of orbit annular hydraulic machines. *IFAC-PapersOnLine*. 2016. № 28. P. 427–432. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.05.110>
27. Maiti R., Das M. K., Sahoo V., Avula K. C., Anukaran A., Tolambia V. P., Nag A. Leakage Past Active Contacts in Involute and Cycloidal Gear Hydrostatic Units. In Proceedings of the 14th Scandinavian International Conference on Fluid Power, Tampere, Finland, 20–22 May 2015.
28. Gamez-Montero P. J., Garcia-Vilchez M., Raush G., Freire J., Codina E. Teeth Clearance and Relief Grooves Effects in a Trochoidal-Gear Pump Using New Modules of GeroLAB. *Journal of Mechanical Design*. 2012. № 134. 054502. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4006440>
29. Inaguma Y. A practical approach for analysis of leakage flow characteristics in hydraulic pumps. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers C*. 2013. № 227. P. 980–991. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954406212456933>
30. Hsieh C. F. Flow characteristics of gerotor pumps with novel variable clearance designs. *Journal of Fluids Engineering*. 2015. № 137(4). 041107. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4029274>
31. Harrison J., Aihara R., Eisele F. Modeling Gerotor Oil Pumps in 1D to Predict Performance with Known Operating Clearances. *SAE International Journal of Engines*. 2016. № 9. P. 1839–1846. DOI: <https://doi.org/10.4271/2016-01-1081>
32. Ivanovic' L. T., Velic'kovic' S. N., Stojanovic' B. Ž., Kandevo M., Jakimovska K. The selection of optimal parameters of gerotor pump by application of factorial experimental design. *FME Transport*. 2017. № 45. P. 159–164.
33. Voloshina A., Panchenko A., Titova O., Milaeva I., Pastushenko A. Prediction of Changes in the Output Characteristics of the Planetary Hydraulic Motor. InterPartner 2020: *Advanced Manufacturing Processes II*. LNME. Springer, Cham, 2021. P. 744–754. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-68014-5\\_72](https://doi.org/10.1007/978-3-030-68014-5_72)
34. Robison A., Vacca A. Multi-objective optimization of circular-toothed gerotors for kinematics and wear by genetic algorithm. *Mechanism and Machine Theory*. 2018. № 128. P. 150–168. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2018.05.011>
35. De Martin A., Jacazio G., Sorli M. Optimization of gerotor pumps with asymmetric profiles through evolutionary strategy algorithm. *Machines*. 2019. № 7. P. 17. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines7010017>
36. Панченко А. І., Волошина А. А., Панченко І. А., Пастушенко С. І. Дослідження впливу похибки форми виготовлення роторів на вихідні характеристики планетарних гідромоторів. *Праці ТДАТУ*. 2019. Вип. 19. Т. 4. С. 33–48. DOI: <https://doi.org/10.31388/2078-0877-19-4-33-48>
37. Панченко А. І., Волошина А. А., Панченко І. А., Холод І. М., Волошин А. А. Вплив похибки зубчастого профілю роторів планетарного гідромотора на його технічний стан. *Праці ТДАТУ*. 2025. Вип. 25. Т. 1. С. 36–44. DOI: <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-1-5>

Дата першого надходження статті до видання: 19.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026

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





**A. Panchenko<sup>1</sup>, A. Voloshina<sup>1</sup>, I. Panchenko<sup>1</sup>, S. Khovanskyi<sup>2</sup>, A. Voloshin<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University*

<sup>2</sup> *Sumy State University*

<sup>3</sup> *Separated Structural Subdivision "Melitopol Professional College of Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University"*

## **EXPERIMENTAL STUDIES OF THE DYNAMICS OF CHANGES IN THE OUTPUT CHARACTERISTICS OF A PLANETARY HYDRAULIC MOTOR DURING WEAR OF THE ROTOR WORKING SURFACES**

### *Summary*

The article deals with the influence of the wear of the working surfaces of the rotors of the planetary hydraulic motor on the change in its output characteristics. Planetary hydraulic motors are widely used in various industries, providing a high torque and a stable low frequency of rotation of the output shaft. However, during operation, wear of the rotors occurs, which leads to an increase in the diametrical gap between them. The increase of the gap is accompanied by two phases: when the gap is smaller than the critical one, self-sealing occurs, which prevents leaks of the working fluid, and when the critical gap is exceeded, the sealing is violated and leaks occur, which worsens the output characteristics of the planetary hydraulic motor and reduces its efficiency. Studies are conducted on three levels: with an ideal profile of rotors, a real profile – the presence of an error in the manufacturing of a toothed contour, and experimental studies. The coincidence of the results of experimental data and modeling of the work of the planetary hydraulic motor with real rotors testifies to the reliability of the theoretical assumptions of the influence of the wear of the working surfaces of the rotors of the planetary hydraulic motor on the dynamics of changes in its output characteristics. However, it is necessary to note significant differences between the results of experimental data and the results of modeling the operation of a planetary hydraulic motor with theoretical rotors. The critical value of the diametral gap for the first (theoretical) level is 2.5 times higher than this value for the second (real) and third (experimental) levels, which is 0.4 mm and 0.16 mm, respectively. These differences show that the technology of manufacturing toothed surfaces of rotors of a planetary hydraulic motor has a significant influence on the dynamics of changes in its output characteristics. Therefore, the improvement of the manufacturing technology, as well as the modernization of the design of the toothed surface of the rotors of the planetary hydraulic motor will allow to increase the resource of its work more than twice. The obtained results have practical significance for the development of control methods and optimization of planetary hydraulic motors, which will lead to an increase in their durability and productivity in various fields of application.

**Keywords:** critical clearance; flow rate; torque; structural-functional diagram; operating conditions.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-19>

УДК 629.113.066 (075)

А. В. Рябовол, аспірант

ORCID: 0009-0001-9704-3116

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*e-mail: [oleksandr78596482@gmail.com](mailto:oleksandr78596482@gmail.com)

## МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ПРОЄКТУВАННЯ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ АКТИВАТОРІВ ДВОРЕЖИМНИХ СТРУМИННИХ АПАРАТІВ

*Анотація.* Мета дослідження полягає у визначенні методичних засад проектування п'єзоелектричних активаторів дворежимних струминних апаратів на основі аналізу їх функціональних принципів, конструктивних параметрів і режимів роботи. Наукова новизна полягає у формуванні узагальненої чисельної моделі процесу формування струменя з урахуванням квазістатичного й динамічного режимів та у визначенні системи критеріїв ефективності активатора. Практична цінність дослідження зумовлена можливістю використання отриманих рекомендацій для параметризації й налаштування активаторів у струминних апаратах. Основними результатами є встановлення залежностей між електричними параметрами, механічною реакцією п'єзоперетворювача та динамікою формування струменя, а також виявлення умов, що мінімізують утрати енергетичної ефективності за перемикання режимів. Висновки підтверджують доцільність застосування принципів адаптивної оптимізації для забезпечення стабільного дворежимного функціонування й підвищення продуктивності струминних апаратів.

*Ключові слова:* п'єзоелектричний активатор, дворежимний струминний апарат, математичне моделювання, формування струменя, динамічний режим, критерії ефективності, синтез активатора.

*Постановка проблеми.* П'єзоелектричні активатори сьогодні відіграють ключову роль у формуванні керованих потоків у струминних апаратах, що застосовуються в системах точного дозування, охолодження, розпилення та мікрофлюїдного управління [1–3]. Розвиток сучасних технологій створює підвищені вимоги до їх функціональної гнучкості, енергоефективності й здатності працювати в різних режимах роботи, зокрема в статичному та динамічному [3–5]. Значна кількість досліджень, присвячених окремим аспектам математичного опису п'єзоперетворювачів і формування струменя, без узагальнення особливостей їх синтезу в контексті дворежимного функціонування поєднує моделі електромеханічного перетворення та гідродинаміки. Таким чином, систематизація підходів і формування єдиної методології проектування п'єзоелектричних активаторів дворежимних струминних апаратів можуть бути визначені як актуальні складники наукового завдання.

*Аналіз останніх досліджень,* присвячених проблемам проектування п'єзоелектричних активаторів для струминних апаратів [1–6], свідчить про наявність двох основних напрямів:

- дослідження електромеханічних властивостей п'єзоперетворювачів як окремих елементів;
- математичне моделювання гідродинамічних процесів у струминних каналах.

У більшості робіт акцент зроблено на відтворенні поведінки активатора в статичному режимі, де втрачаються ефекти, пов'язані з частотною залежністю механічного збурення та динамічним впливом на формування струменя [6–8]. Водночас можна вказати на численні дослідження, присвячені аналізу динамічного режиму функціонування [9–12], однак у більшості з них не розглядається узгодженість п'єзоперетворювача з гідродинамічною моделлю

струминного каналу й не дається оцінка межі перемикання між режимами. Автори дослідження [13] звертають увагу на необхідність урахування конструктивних параметрів активатора, проте в практичній частині пропонують емпіричні рекомендації без узагальнення у вигляді єдиної системи критеріїв оцінювання ефективності активаторів.

Таким чином, аналіз дає підстави стверджувати, що розроблення узагальненої методології синтезу п'єзоелектричного активатора з урахуванням дворежимного формування струменя та визначенням чітких параметрів переходу між режимами може надалі розглядатися як невирішена частина загального дослідження.

*Формулювання мети статті (постановка завдання).* Отже, метою дослідження є розроблення узагальненої методології синтезу п'єзоелектричного активатора для дворежимного струминного апарату, яка забезпечує узгоджене функціонування електромеханічного перетворювача з гідродинамічними процесами формування струменя, а також передбачає визначення параметрів перемикання між статичним і динамічним режимами з урахуванням критеріїв ефективності роботи системи.

*Основна частина.*

### 1. Визначення функціональних принципів дії п'єзоелектричних активаторів у струминних апаратах

Після формулювання загальної методологічної мети дослідження логічним є зосередження уваги на аналізі фундаментальних аспектів функціонування п'єзоелектричних активаторів у складі струминних апаратів, оскільки саме ці компоненти визначають характер перетворення електричної енергії в задані параметри струменя. Ефективність синтезу активатора значною мірою залежить від типу реалізованого п'єзоперетворювача, механізму передачі механічного збурення до робочого середовища та відповідності режимів збудження вимогам до формування струменя [14–16].

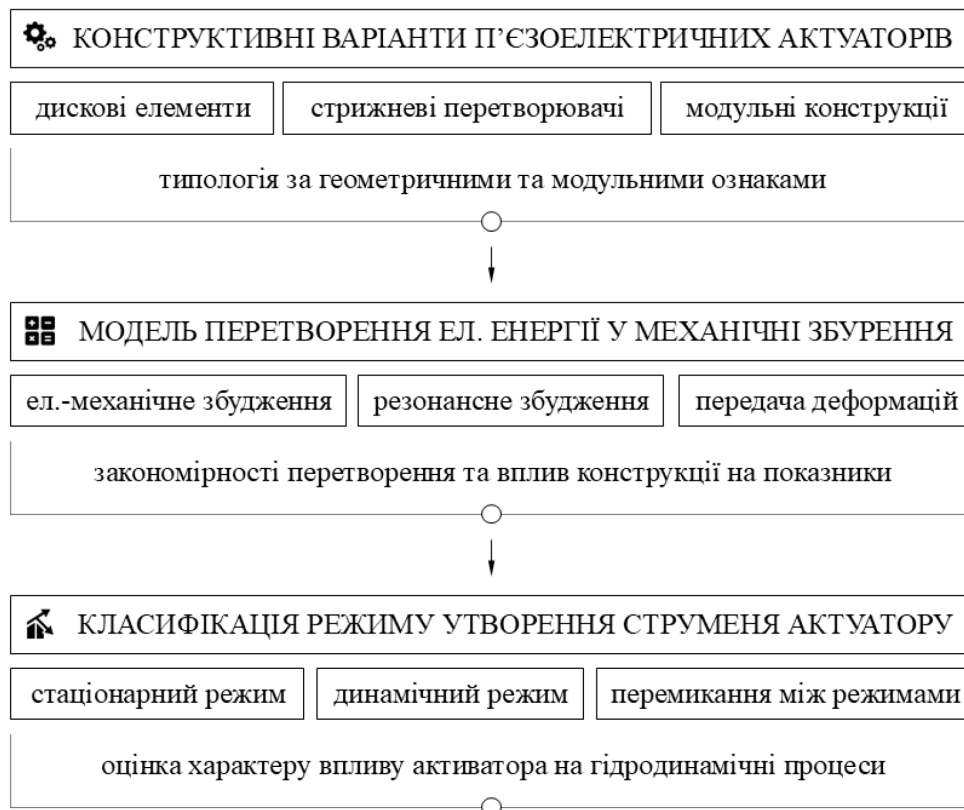


Рис. 1. Структурно-функціональна схема оцінки параметрів формування струменя в п'єзоелектричному активаторі



У цьому контексті особливого значення набуває системне вивчення конструктивних варіантів п'єзоелектричних перетворювачів, закономірностей електромеханічного перетворення та різних режимів формування струменя в дворезимних апаратах як вихідної основи для подальшого узгодженого моделювання (рис. 1).

Вихідні характеристики активатора значною мірою визначаються конструктивним виконанням п'єзоперетворювача, яке безпосередньо впливає на амплітуду деформацій, частотний діапазон роботи й спосіб передачі збурення до робочого середовища струминного каналу. На сучасному етапі розвитку технологій можна виокремити три базові групи п'єзоелектричних перетворювачів відповідно до їх геометричної конфігурації та принципу з'єднання активних елементів [14]:

1. Дискові елементи – характеризуються плоскою формою й використовуються для створення локального зсуву або розтягування, що передається через опорну площину на робоче середовище. Така конструкція забезпечує відносно просте узгодження з гідродинамічними каналами, однак обмежує частотний діапазон збудження через наявність власної резонансної частоти.

2. Стрижневі або циліндричні перетворювачі – мають більш спрямовану передачу деформації та здатні забезпечувати значну амплітуду осьового зсуву, що робить їх придатними для реалізації динамічних режимів формування струменя. Порівняно з дисковими елементами такі конструкції демонструють вищу механічну жорсткість і розширений частотний діапазон, що значно підвищує адаптивність активатора.

3. Модульні конструкції – поєднують кілька п'єзопластин у єдиний блок, формуючи багаточасову структуру з підвищеним рівнем електромеханічної взаємодії. Це дає змогу отримати більшу вихідну силу за відносно незначних керівних напруг, а також забезпечує гнучкість у параметризації активатора. Важливою властивістю таких конструкцій є можливість змінювати конфігурацію з'єднання шарів, що відкриває додаткові можливості для адаптації до вимог конкретного режиму роботи струминного апарата.

На рівні формування методологічних рекомендацій пропонується вибирати конструктивний варіант п'єзоелектричного перетворювача з урахуванням вимог до амплітуди й частотного діапазону механічного збурення, способу передачі деформацій і можливості інтеграції з гідродинамічною структурою дворезимного апарата.

Процес перетворення електричної енергії на механічне збурення в п'єзоелектричних активаторах описується сукупністю електромеханічних рівнянь, що враховують поляризаційні властивості матеріалу, деформаційний стан і характер прикладеної керівної напруги [15]. У загальному випадку зв'язок між електричною напругою  $U$ , механічним напруженням  $\sigma$  та деформацією  $\varepsilon$  можна подати у вигляді  $\sigma = c_E \cdot \varepsilon - e \cdot E$  та  $D = e \cdot \varepsilon - \varepsilon_T \cdot E$ , де  $c_E$  – модуль пружності за сталої напруги,  $e$  – п'єзоелектричний модуль,  $E$  – напруженість електричного поля,  $D$  – електричне зміщення,  $\varepsilon_T$  – діелектрична проникність. Ці рівняння під час побудови математичної моделі даватимуть можливість визначити зміну механічного стану активатора залежно від амплітуди та частоти прикладеної напруги. У квазістатичному режимі домінує електромеханічне збудження, за якого перехід електричної енергії до механічної відбувається в межах лінійної деформації без істотних інерційних ефектів. У цьому разі параметри роботи визначаються співвідношенням між напругою та деформацією, де максимальна амплітуда збурення досягається за умови поступового росту потенціалу  $\varepsilon = (e/c_E) \cdot E$ . Відповідний режим забезпечує достатню стабільність збурення, однак має обмеження щодо швидкості зміни параметрів струменя. Натомість у динамічному режимі виникає резонансне збудження, коли частота прикладеної напруги наближається до власної частоти п'єзоперетворювача. У цьому разі механічне збурення описується через гармонічне коливання  $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot \sin(\omega t)$ , причому  $\omega \rightarrow \omega_0$ ,



що є власною круговою частотою активатора. Резонансний режим дає змогу суттєво підвищити амплітуду збурення й реалізувати імпульсне формування струменя, проте супроводжується нестабільністю за відхилень від робочої частоти. У цьому контексті особливого значення набуває узгодження електричних параметрів перетворювача з механічними характеристиками струминного каналу. Також під час математичного моделювання необхідно врахувати механізм передачі деформації на робоче середовище. У загальному випадку механічну дію на математичному рівні можна формалізувати як функцію  $F(t) = S \cdot c_E \cdot \varepsilon(t)$ , де  $S$  – площа контакту між п'єзоелементом і гідродинамічним каналом. Ця залежність відображає пряму кореляцію між конструктивними параметрами активатора й вихідними характеристиками струменя, що є критично важливим для забезпечення коректного перемикання між режимами формування потоку. Таким чином, аналітичне описання процесу перетворення електричної енергії на механічне збурення дає змогу обґрунтувати вибір режиму збудження активатора та визначити параметри, що забезпечують ефективну взаємодію з гідродинамічною частиною дворежимного апарата.

У системах із п'єзоелектричним керуванням формування струменя може реалізовуватися в режимах, які відрізняються характером впливу активатора, динамікою зміни параметрів та вимогами до електромеханічного збудження [16]. З погляду організації дворежимного функціонування доцільно виділити статичний режим, динамічний режим, а також режим перемикання, який забезпечує адаптивний перехід між ними (таблиця 1). Статичний режим відзначається формуванням сталого потоку за відносно повільної зміни прикладеної напруги, що дає змогу створювати стабільні струмені з фіксованими параметрами. Динамічний режим базується на високочастотних коливаннях активатора, що призводить до імпульсного або кластерного формування потоку та забезпечує підвищення інтенсивності струменя. Режим перемикання характеризується комбінованим впливом і використовується для переходу між статичним і динамічним режимами з мінімальними втратами енергії.

Таблиця 1

Класифікація режимів формування струменя п'єзоелектричних апаратів [16]

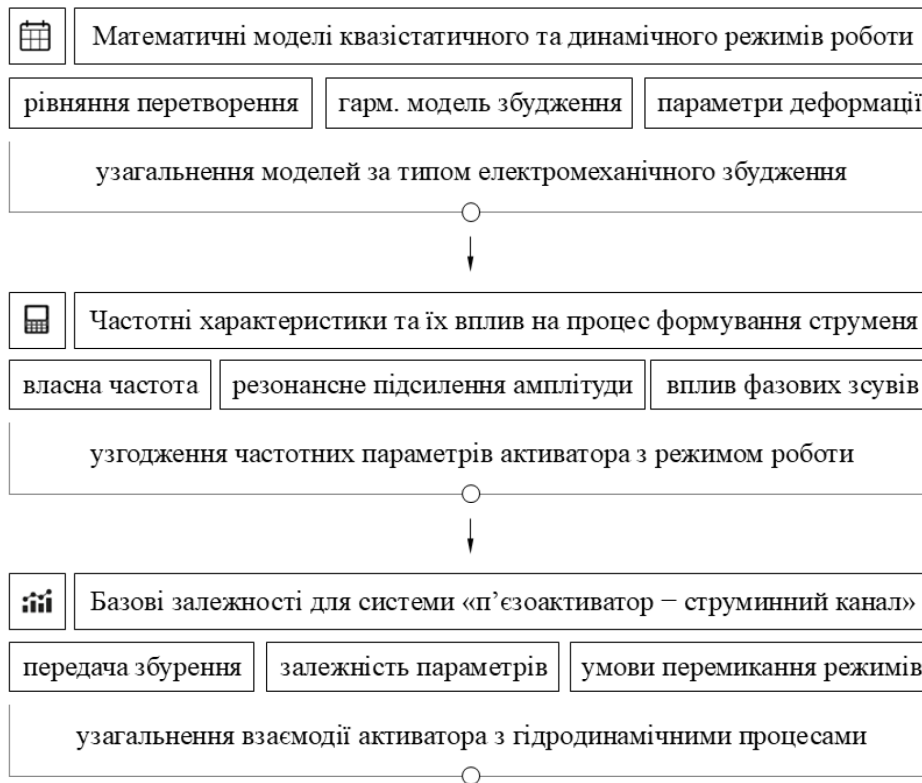
Режим	Вплив	Збудження	Динаміка	Особливості
Статичний режим	Постійне мех. збурення	Квазистатичне збудження	Рівномірний струмінь	Стабільна робота за фіксованих параметрів
Динамічний режим	Високочастотне змінне збурення	Резонансне збудження	Імпульсний струмінь	Висока інтенсивність і дозоване впорскування
Режим перемикання	Комбінований вплив	Адаптивне збудження	Перехідний режим	Узгодження параметрів за зміни режиму

Конструктивні особливості п'єзоелектричних перетворювачів, закономірності електромеханічного перетворення та характер режимів формування струменя визначають базові передумови для подальшого синтезу дворежимного активатора. Узгодженість конструктивної топології активатора з вибраним типом збудження й режимом формування струменя дає змогу забезпечити не лише необхідну інтенсивність і стабільність струменя, а й адаптивне перемикання між режимами без суттєвих утрат енергетичної ефективності.

## 2. Визначення функціональних принципів дії п'єзоелектричних активаторів у струминних апаратах

Необхідність теоретичного обґрунтування синтезу п'єзоелектричного активатора зумовлена необхідністю формалізованого опису процесів, що лежать в основі його взаємодії з гідродинамічним середовищем струминного апарата. Структурно-функціональний аналіз показав, що ефективність дворежимного функціонування визначається не лише конструктивними параметрами активатора, а й здатністю математичної моделі адекватно відтворювати електромеха-

нічне збудження, частотні властивості перетворювача та їх вплив на параметри формованого струменя. У цьому контексті особливого значення набуває застосування узгодженого математичного апарату, який дає змогу поєднати опис квазістатичних і динамічних режимів із передачею механічного збурення до струминного каналу та сформувати основу для постановки задачі синтезу активатора з визначенням закономірностей переходу між режимами [17–19], як це представлено на рис. 2.



**Рис. 2. Структурно-логічна схема обґрунтування синтезу п'єзоелектричного активатора для дворежимних струминних систем**

Для розвитку методології синтезу доцільно перейти від загальних рівнянь електромеханічного перетворення, розглянутих у попередньому розділі, безпосередньо до формалізації режимів збудження активатора. Відповідно до цього підходу, квазістатичний режим розглядається як режим лінійної пропорційності між прикладеною напругою та деформацією, коли зміна електричного сигналу відбувається з досить малою швидкістю й не призводить до появи фазових зсувів між електричною та механічною підсистемами. У такому разі механічне збурення задається як визначена функція напруги, яка залишається сталою в часі й забезпечує формування стабільного струменя. На відміну від цього, динамічний режим передбачає гармонічне збудження активатора, за якого частота прикладеної напруги наближається до власної частоти п'єзоперетворювача [17]. Зі зростанням частоти збудження проявляється резонансний ефект, у результаті чого деформація активатора значно зростає порівняно з квазістатичним режимом. Амплітуда механічного збурення в резонансному режимі визначається залежністю:

$$\varepsilon_0 = \frac{(e \cdot U_0) / (c_E \cdot h)}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot \zeta \cdot \omega}{\omega_0}\right)^2}}, \quad (1)$$



яка відображає вплив співвідношення між робочою частотою  $\omega$  та власною частотою  $\omega_0$  для п'єзоелемента товщиною  $h$ , а також утрат системи, що на математичному рівні формалізується через уведення коефіцієнта затухання  $\zeta$ . Аналіз наведеного рівняння вказує, що максимальне значення амплітуди досягається за  $\omega \rightarrow \omega_0$ , тоді як відхилення в одну або іншу сторону супроводжується різким зниженням збурення. Це зумовлює необхідність точного узгодження електричних параметрів активатора з динамічними параметрами апарата й визначення інтервалу безпечного переходу між режимами. Отримані залежності можуть бути використані для постановки задачі синтезу, де змінні параметри активатора мають бути вибрані так, щоб забезпечити стабільне функціонування у квазістатичному режимі та достатній імпульсний вплив у динамічному режимі за допустимої амплітуди фазового зсуву.

Аналіз виявив, що ключовими чинниками, які визначають ефективність роботи п'єзоелектричного активатора в умовах дворежимного функціонування, є частотні властивості електромеханічної системи. У загальному випадку активатор характеризується власною частотою  $\omega_0$ , яка залежить від геометричних параметрів п'єзоперетворювача, механічної жорсткості й маси навантаження. Якщо робоча частота прикладеної напруги  $\omega$  істотно відрізняється від  $\omega_0$ , механічне збурення буде формуватися з незначною амплітудою, що фактично обмежує можливість реалізації динамічного режиму. При цьому поблизу резонансної ділянки спостерігається суттєве підсилення амплітуди струсу, однак водночас зростає чутливість системи до фазових зсувів між електричним сигналом і механічною реакцією активатора. Це може призводити до нерівномірного формування струменя, коли активатор взаємодіє з рідиною з високою густиною або змінним гідродинамічним навантаженням, тому в процесі проєктування необхідно визначити допустимий частотний діапазон, у межах якого зберігається задана амплітуда механічного збурення та забезпечується стабільність функціонування. Фазові зсуви також відіграють важливу роль у процесі переходу між режимами, оскільки за зростання частоти збудження відносно відставання деформації від електричного сигналу збільшується. З позицій гідродинамічної взаємодії це може спровокувати зниження ефективності передачі збурення на робоче середовище та, як наслідок, зменшення інтенсивності струменя. Таким чином, частотна характеристика активатора повинна бути узгоджена з динамічними властивостями струминного каналу, що вимагає врахування не лише власної частоти п'єзоперетворювача, а й масо-інерційних властивостей рідинного середовища [18]. З урахуванням зазначеного подальший синтез активатора має базуватися на визначенні такого частотного інтервалу  $[\omega_{\min}; \omega_{\max}]$ , для якого одночасно забезпечуються такі умови:

- максимізація амплітуди механічного збурення;
- дотримання допустимого фазового зсуву  $\phi(\omega)$ ;
- стійкість параметрів струменя до змін зовнішніх гідродинамічних параметрів.

Визначення зазначеного інтервалу є основним етапом формування узагальненої моделі «активатор – струминний канал», що безпосередньо впливає на постановку задачі синтезу.

Взаємодія п'єзоелектричного активатора з гідродинамічним середовищем струминного апарата описується сукупністю залежностей, які пов'язують електромеханічні параметри активатора з параметрами формованого струменя. Основу таких залежностей становлять функції, що визначають амплітуду й форму механічного збурення, яке передається на робочу рідину, а також параметри струминного потоку, що виникає в результаті дії активатора [19]. У спрощеному вигляді взаємозв'язок між характеристиками активатора та струменя може бути подано через функцію  $v = f(\varepsilon_0, \omega, S, \rho)$ , де  $v$  – швидкість струменя,  $\varepsilon_0$  – амплітуда деформації п'єзоперетворювача,  $\rho$  – густина робочого середовища. Для статичного режиму функція  $f(\varepsilon_0, \omega, S, \rho)$  має лінійний характер, тоді як для динамічного режиму функція  $f(\varepsilon_0, \omega, S, \rho)$  залежить від співвідношення  $\omega/\omega_0$  та містить резонансний множник. Разом із тим має бути врахована



залежність тиску струменя  $p = (\rho \cdot v^2)/2$ , що в поєднанні з функцією  $f(\varepsilon_0, \omega, S, \rho)$  дає змогу визначати зміну енергетичної потужності струменя залежно від електромеханічних параметрів активатора. Таким чином, можна сформулювати узагальнену функцію відповідності  $\Phi: (\varepsilon_0, \omega, S) \rightarrow (v, p, P)$ , де  $P$  – питомий енергетичний вплив на струминний канал. У рамках синтезу активатора метою є визначення такого набору параметрів  $(\varepsilon_0, \omega, S)$ , який забезпечує необхідне значення вихідної функції  $\Phi$  у сталому (квазістатичному) й імпульсному (динамічному) режимах, а також гарантує плавний перехід між ними без втрати стабільності струменя. Відповідно, постановка задачі синтезу запишеться у вигляді:

$$\left[ \begin{array}{l} \Phi(\varepsilon_0, \omega, S) \geq \Phi_{\text{стат}} \text{ для квазістатистичного режиму} \\ \Phi(\varepsilon_0, \omega, S) \geq \Phi_{\text{дин}} \text{ для динамічного режиму} \\ \Phi(\varepsilon_0, \omega, S) \text{ стабільна при } \omega \in [\omega_{\text{min}}; \omega_{\text{max}}] \text{ для перемикання} \end{array} \right. \quad (2)$$

Таким чином, наведені залежності формують основу функціонально-параметричної моделі, яка дає змогу за заданими вимогами до параметрів струменя визначити оптимальні значення електромеханічних характеристик активатора за синтезу дворежимної системи.

### 3. Моделювання процесу формування струменя з урахуванням дворежимного функціонування

Обґрунтування методології синтезу п'єзоелектричного активатора та визначення основних закономірностей переходу між квазістатичним і динамічним режимами є підґрунтям для проведення формалізованого опису процесу формування струменя у дворежимній системі. На цьому етапі дослідження особливого значення набуває застосування математичного апарату гідродинаміки нестисливих середовищ, який дає змогу визначити залежності між електромеханічними параметрами активатора й характеристиками струминного потоку. Урахування параметрів режиму збудження, а також впливу частотних властивостей п'єзоперетворювача на параметри потоку створює підґрунтя для подальшої побудови чисельної моделі, здатної адекватно відтворювати як усталене, так й імпульсне формування струменя [20–22]. У цьому зв'язку найбільш доцільним на цьому етапі дослідження є детальний аналіз базових рівнянь руху робочого середовища в умовах статичної дії активатора з подальшим переходом до опису сценаріїв динамічного впливу, що забезпечує цілісне представлення процесу формування струменя та дає змогу сформулювати критерії переходу між режимами (рис. 3).

У рамках статичного режиму формування струменя основу математичного опису становить уявлення про робоче середовище як про нестисливу рідину, для якої виконується умова збереження об'єму потоку. Це дає змогу представити вплив п'єзоперетворювача через зміну швидкості руху робочого середовища, що, своєю чергою, лінійно залежить від величини прикладеної напруги. У цьому режимі процес формування струменя описується усталеним співвідношенням між тиском і кінетичною енергією струменя, яке безпосередньо визначає швидкість потоку  $v = \sqrt{(p_0 - p)/\rho}$ , де  $p$  – тиск у робочому середовищі,  $v$  – швидкість струменя,  $p_0$  – початковий тиск на вході, причому збільшення різниці  $(p_0 - p)$  відбувається внаслідок деформації активатора. На методологічному рівні це означає, що статичний режим може бути сформульовано як лінійну передатну залежність між електричними параметрами ( $U$ ), механічним збуренням ( $\varepsilon$ ) та параметрами струменя ( $v, p$ ). Такий підхід дає змогу виконати низку актуальних задач, як-то:

- визначити базову калібрувальну залежність між деформацією активатора і швидкісними характеристиками потоку;
- сформулювати початкові параметри, які будуть використані для порівняння під час переходу до динамічного режиму;

- задати умову усталеності, яка в подальшому виконує роль критерію стійкості за адаптивного перемикавання режимів.

Отже, статичний режим формує вихідну модель переходу між категоріями «п'єзозбурення», «тиск» і «швидкість», яка в подальшому використовується як еталонна лінія для оцінювання ефективності динамічних сценаріїв.

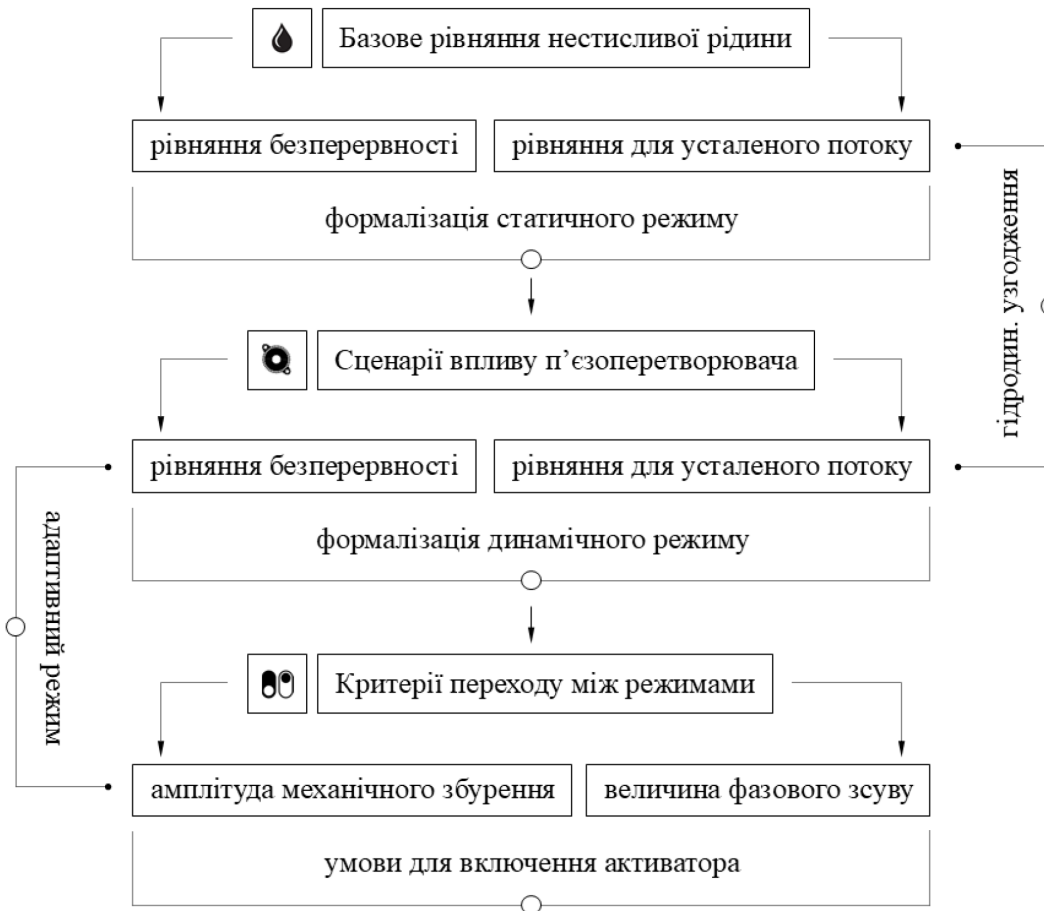


Рис. 3. Структурно-логічна схема узгодження гідродинамічної моделі з електромеханічним збудженням

На відміну від статичного режиму, у якому електромеханічне збурення передається у вигляді лінійної детермінованої дії, динамічний режим характеризується частотно-залежною реакцією п'єзоперетворювача та появою гармонічних або імпульсних компонент у структурі збурення. У межах запропонованої методології це зумовлює необхідність розгляду кількох сценаріїв впливу, які відрізняються за характером передачі енергії до робочого середовища:

1. Гармонічний вплив. Під час наближення частоти керівного сигналу до власної частоти п'єзоелемента  $\omega \rightarrow \omega_0$  спостерігається різке зростання амплітуди деформації, що спричиняє суттєве підсилення швидкості й імпульсності струменя. Як зазначено вище, у цьому разі струминний канал працює в режимі резонансного підсилення, а параметри потоку описуються через залежність  $v = f(\epsilon_0, \omega, \rho)$ , де функція  $f$  містить резонансний множник, що підвищує чутливість до змін  $\omega$ . Методологічно цей сценарій є доцільним для підвищення інтенсивності струменя, але вимагає суворого контролю стабільності частоти.

2. Імпульсно-кластерний вплив. У разі коротких високочастотних імпульсів формування збурення відбувається у вигляді кластерів, між якими зберігається інтервал стабілізації. Це



дає змогу формувати вимірювані порції робочої рідини без повного переходу в резонанс, що є актуальним для дозувальних режимів. У цьому сценарії важливою є узгодженість тривалості імпульсу з інерційними характеристиками рідинного середовища.

3. Комбінований вплив передбачає поступове введення високочастотного складника на тлі базового статичного збурення. Такий підхід застосовується для плавного переходу між режимами без різкого зниження енергоефективності й дає змогу оновлювати амплітуду деформації залежно від гідродинамічного навантаження у струминному каналі.

З методологічної позиції наведені сценарії утворюють багатокомпонентну модель динамічного збурення, де змінними керування виступають не лише напруга та частота, а й форма сигналу й тривалість збудження. На цій основі в подальшому визначаються межі допустимого переходу між режимами, що є предметом наступного дослідження.

У межах дворежимного функціонування ефективність роботи п'єзоелектричного активатора визначається не лише коректністю реалізації окремих режимів, а й здатністю системи здійснювати стабільний та адаптивний перехід між ними. З огляду на це, формування критеріїв перемикання є ключовим завданням для математичного опису межі включення активатора в динамічний режим. На основі цього критеріального набору здійснюється оцінка межі включення активатора, яка задається не лише порогом частоти, а й конфігурацією вхідного сигналу, топологією каналу та властивостями робочого середовища. Методологічно система критеріїв переходу дає змогу реалізувати адаптивну логіку перемикання, що враховує змінність гідродинамічного навантаження, модель зворотного контролю частотної відповіді активатора, а також дизайн межових сценаріїв, у яких система перебуває на межі статичного й динамічного режимів, не втрачаючи ефективності. Таким чином, блок критеріїв переходу відіграє роль перехідного фільтра, що забезпечує узгодженість між електромеханічним збудженням і реакцією рідинного середовища, створюючи передумови для реалізації адаптивної оптимізації у синтезі дворежимних струминних систем.

#### **4. Методологія оцінювання ефективності п'єзоелектричного активатора**

Моделювання процесу формування струменя з урахуванням дворежимного функціонування дало змогу визначити як характер впливу п'єзоперетворювача на параметри потоку, так і критичні умови переключення між режимами. Однак для забезпечення практичної реалізації синтезу активатора цього недостатньо, оскільки вибір конструктивних та електричних параметрів має базуватися на кількісній оцінці фактичної результативності роботи системи. У цьому контексті наступним етапом дослідження є формування методики оцінювання ефективності п'єзоелектричного активатора, яка дає змогу встановити залежності між параметрами збудження, геометричними характеристиками перетворювача та кінцевими показниками якості струменя. Такий підхід забезпечує можливість не лише порівняння різних структур і режимів формування, а й виявлення ділянки параметрів, що гарантують стабільну роботу активатора та підвищення енергоефективності за адаптивного перемикання (рис. 4).

Оцінювання результативності роботи п'єзоелектричного активатора в умовах дворежимного формування струменя вимагає виокремлення узгодженого набору функціональних критеріїв, які характеризують як якісні, так і кількісні параметри процесу. Із методологічного погляду доцільно розглядати ефективність не як окремий показник, а як систему взаємопов'язаних характеристик, що відображають здатність активатора реалізувати керований вплив на робоче середовище за збереження стабільності режиму. Інтеграція цих критеріїв у єдину систему дає змогу формувати узагальнений показник ефективності, на основі якого здійснюється порівняння різних конструктивних рішень. У подальшому саме цей набір критеріїв використовується як цільова функція під час визначення оптимальних значень електричних і конструктивних параметрів активатора. Після визначення критеріїв функціональної ефективності

подальше дослідження має бути спрямоване на встановлення зв'язків між параметрами активатора та значеннями сформованих показників ефективності. У цьому контексті конструктивні й електричні змінні виступають як керовані параметри, від яких залежить динаміка взаємодії електромеханічного збурення з гідродинамічним середовищем.



**Рис. 4. Структурно-логічна схема формування критеріїв і параметризації п'єзоелектричного активатора для дворежимного функціонування**

З позицій практичної реалізації комплексу до ключових електричних параметрів належать:

- амплітуда й частота прикладеної напруги, які безпосередньо визначають інтенсивність збудження та здатність системи до переходу в резонансний режим;
- форма керівного сигналу, що впливає на характер передачі збурення.

Серед конструктивних параметрів найбільш суттєвими в рамках виконання завдання дослідження є:

- геометричні характеристики п'єзоперетворювача, які визначають власну частоту системи й максимальну амплітуду деформації;
- спосіб передачі механічного збурення, що впливає на ефективність взаємодії з робочим середовищем.

Аналіз комбінацій цих параметрів показує, що нерівномірність впливу різних чинників вимагає використання узгодженої оцінювальної моделі, у якій кожний параметр має власну зону впливу на інтегральний критерій ефективності:

- електричні параметри найбільш суттєво впливають на інтенсивність і швидкість перемикання;
- конструктивні параметри – на стабільність роботи й розширення робочого діапазону.

Така диференціація дає змогу сформувати багатовимірне поле ефективності, яке буде використано під час синтезу оптимальної конфігурації активатора на наступному етапі.



Синтез отриманих залежностей дає можливість сформулювати низку узагальнених рекомендацій щодо параметризації п'єзоелектричного активатора, орієнтованої на забезпечення ефективного дворежимного функціонування. Амплітуда та частота керівного сигналу повинні визначатися з урахуванням допустимого діапазону, у межах якого реалізується як достатній рівень збурення, так і стійкість відносно фазових відхилень. Вибір геометричної конфігурації перетворювача має відбуватися з огляду на необхідну максимальну амплітуду деформації в динамічному режимі та забезпечувати можливість лінійного керування в статичному режимі. Окрім того, доцільним є застосування адаптивних схем збудження, які передбачають зміну амплітуди або форми сигналу залежно від поточного гідродинамічного навантаження, що забезпечує плавний перехід між режимами без утрати енергоефективності. Застосування цих принципів дає змогу підвищити продуктивність дворежимних струминних апаратів, зберігаючи стабільність формування потоку та скорочуючи перехідні втрати під час перемикання.

*Висновки.* У результаті дослідження розроблено узагальнену методологію синтезу п'єзоелектричного активатора для дворежимного струминного апарата з урахуванням взаємодії електромеханічного збудження й гідродинамічних процесів формування струменя. Особливу увагу приділено визначенню параметрів переходу між статичним і динамічним режимами, а також формуванню системи критеріїв оцінювання ефективності активатора. У результаті аналізу:

- систематизовано конструктивні варіанти п'єзоперетворювачів і визначено їх придатність до функціонування у квазістатичному та резонансному режимах;
- обґрунтовано принцип узгодження електромеханічного збудження з гідродинамічною моделлю нестисливої рідини як основу для побудови функціонально-параметричної моделі «активатор – струминний канал»;
- встановлено критичний діапазон робочих частот, у межах якого забезпечується максимальна амплітуда механічного збурення за допустимого фазового зсуву;
- розроблено узгоджену систему критеріїв функціональної ефективності, що дала змогу сформулювати узагальнений показник ефективності активатора;
- визначено вплив електричних параметрів і конструктивних характеристик на рівень ефективності дворежимного формування струменя;
- сформульовано рекомендації щодо параметризації активатора, які передбачають поєднання частотного узгодження, адаптивної зміни електричних режимів і конструктивної гнучкості.

Отримані результати мають практичне значення для проєктування й оптимізації п'єзоелектричних активаторів струминних апаратів, що працюють у змінних режимах. Використання запропонованої методики дає змогу підвищити енергоефективність систем керування струменем, забезпечити стабільне перемикання між режимами роботи та розширити функціональні можливості прецизійних технологічних пристроїв на основі п'єзоелектричного керування.

#### Список використаних джерел

1. Bußmann A., Thalhofer T., Hoffmann S., Daum L., Surendran N., Hayden O., Hubbuch J., Richter M. Microfluidic cell transport with piezoelectric micro diaphragm pumps. *Micromachines*. 2021. № 12(12). Article 1459. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi12121459>
2. Parsi B. Design and optimization of piezoelectric actuators for micropumps. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing – Green Technology, Advance online publication*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1177/16878132231158983>
3. Zhang J. Piezoelectric inkjet printing: The principles, fluid dynamics and numerical analysis. *Materials Today Communication*. 2024. № 41. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sdx.2024.XXX>



4. Luo Z., Peng J., Cao J., Yin R., Zou B., Tan Y., Yan J. Demand Flexibility of Residential Buildings: Definitions, Flexible Loads, and Quantification Methods. *Engineering*. 2022. № 16(9). P. 123–140. DOI: 10.1016/j.eng. 2022.01.010
5. Hao J., Gou X., Wang S., Chen Q., Gao K. Dynamic Modeling and Flexibility Analysis of an Integrated Electrical and Thermal Energy System With the Heat Pump–Thermal Storage. *Frontiers in Energy Research*. 2022. № 10. Article 817503. DOI: 10.3389/fenrg.2022.817503
6. Wan J. Dynamic Skin: A Systematic Review of Energy-Saving Technologies. *Buildings*. 2025. № 15(14). P. 2572. URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/15/14/2572>
7. Ho H. H. Synthetic jet actuators for active flow control: A review. *Fluids*. 2024. № 9(12). P. 290. 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/fluids9120290>
8. Arafa N. Jet velocity and acoustic excitation characteristics of a synthetic jet actuator. *Fluids*. 2022. № 7(12). P. 387. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/fluids7120387>
9. Jung J., Moon J., Kim D. Dynamics of a Lorentz force–activated oscillating jet. *Physical Review Fluids*. 2025. № 10. 023701. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.10.023701>
10. Lu Z., Dupuis E.D., Patel V.K., Momen A.M., Shahab S. Ultrasonic oscillatory two-phase flow in microchannels. 2020. *arXiv*. URL: <https://arxiv.org/abs/2012.03406>
11. Oosterhuis J. P., Bühler S., Wilcox D., van der Meer T. H. Jet pumps for thermoacoustic applications: Design guidelines based on a numerical parameter study. 2015. *arXiv*. URL: <https://arxiv.org/abs/1508.05119>
12. Deng G., et al. A simplified analysis method for the piezo jet dispenser. *Sensors*. 2018. № 18(7). URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/7/2115>
13. Várhegyi G. Empirical models with constant and variable activation parameters. *Energy & Fuels*. 2019. № 33(3). DOI: 10.1021/acs.energyfuels.9b00040
14. Zhou X., Wu S., Wang X., Wang Z., Zhu Q., Sun J., Huang P., Wang X., Huang W., Lu Q. Review on piezoelectric actuators: materials, classifications, applications, and recent trends. *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2024. № 19(1). P. 6. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11465-023-0772-0>
15. Mane P. Piezoelectric actuators as synthetic jets: Cavity dimension effects. *Journal of Propulsion and Power*, 2007. № 18(11). DOI: <https://doi.org/10.1177/1045389X06075658>
16. Ghaemi A., Ebrahimi A., Hajipour M. Integrated multiphysics modeling of a piezoelectric micropump. 2025. *arXiv*. URL: <https://arxiv.org/abs/2502.06413>
17. Mamba S., Zoueshtiag F., Baudoin M. Pressure-driven dynamics of liquid plugs in rectangular microchannels: Influence of the transition between quasi-static and dynamic film deposition regimes. *Journal of Fluid Mechanics*. 2018. № 853. R4. URL: <https://arxiv.org/abs/1802.02489>
18. Ho H. H., Shirinzad A., Essel E. E., Sullivan P. E. Synthetic Jet Actuators for Active Flow Control: A Review. *Fluids*. 2024. № 9(12). Article 290. DOI: <https://doi.org/10.3390/fluids9120290>
19. Holman R., Utturkar Y., Mittal R., Smith B.L., Cattafesta L. Formation criterion for synthetic jets. *AIAA Journal*. 2005. № 43(10). P. 2110–2116
20. Silva R. E., Franco M. A. R., Bartelt H., Pohl A. A. Numerical characterization of piezoelectric resonant transducer modes for acoustic wave excitation in optical fibers. *Measurement Science and Technology*. 2013. № 24(9). 094020. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/24/9/094020>
21. Lu Y., Qiu Y. Research on inherent frequency and vibration characteristics of sandwich piezoelectric ceramic transducer. *Sensors*. 2022. № 22(23). P. 9431. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/23/9431>
22. Li W. Design and analysis method of piezoelectric liquid driving device considering coupling effects of elastic force and liquid parameters. *PMC NCBI*. 2024. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC11052154>

Дата першого надходження статті до видання: 25.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026

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



**A. Riabovol***National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"***METHODOLOGICAL FOUNDATIONS FOR DESIGNING PIEZOELECTRIC ACTUATORS OF DUAL-MODE JET DEVICES*****Summary***

A comprehensive analysis of modern approaches to the design of piezoelectric actuators for dual-mode jet devices is carried out, covering the functional principles of converting electrical energy into mechanical excitation, the structural features of piezoelectric transducers, and the classification of jet-forming regimes in devices with piezoelectric control. The differences between static and dynamic operating modes are detailed, particularly regarding their areas of application, requirements for the electrical parameters of the actuator, and the types of deformation transmitted to the jet channel. It is shown that a key prerequisite for synthesizing an effective actuator is the consistency of the mathematical models describing the interaction between the piezoelectric element and the internal hydrodynamic environment of the jet channel, as well as the consideration of the frequency characteristics of the piezoelectric transducer that determine the response speed to the control signal. The parameters of the mechanical response of the piezoelectric actuator affecting the dynamics of jet formation – including the waveform of the applied voltage, the disturbance amplitude, the geometric dimensions of the transducer, and the physical–mechanical properties of the working medium – are generalized. A generalized numerical model of the jet formation process is presented, which makes it possible to evaluate the influence of piezo-excitation in both quasi-static and dynamic operating modes. A comparative analysis of jet-forming regimes is performed, and the switching limits of the piezoelectric transducer are determined – ensuring minimization of energy efficiency losses and improving the stability of the jet device when switching between operating modes. The influence of design parameters of the actuator on the amplitude and shape of the flow is analyzed, which makes it possible to formulate general recommendations for achieving stable dual-mode operation over a wide range of working frequencies. Based on the obtained relations, a system of criteria for evaluating the effectiveness of the piezoelectric actuator is formulated, including jet intensity and stability, response speed to the control signal, consistency of mechanical loading with the electrical characteristics of the actuator, and the resistance of the jet formation process to changes in external conditions. Practical recommendations are substantiated for the parameterization and tuning of piezoelectric actuators based on the principle of adaptive optimization, which makes it possible to increase the dynamic performance of jet devices and ensure their stable operation.

**Keywords:** piezoelectric actuator, dual-mode jet device, mathematical modeling, jet formation, dynamic mode, performance criteria, actuator synthesis.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-20>

УДК 637.134

К. О. Самойчук, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-3423-3510

Є. Р. Прісс, аспірант

ORCID: 0009-0000-4376-0198

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*

e-mail: kyrylo.samoichuk@tsatu.edu.ua

## АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОТОРНОГО ДИСПЕРГАТОРА ДЛЯ СТВОРЕННЯ ГОМОГЕННИХ БІЛКОВИХ СТРУКТУР

*Анотація.* У машинобудівній галузі харчового обладнання операція надання гомогенної структури після ферментації кисломолочних продуктів є новітнім та перспективним процесом у виробництві кисломолочних продуктів. Для її реалізації запропонована конструкція роторного диспергатора з ротором, що регулюється, який здійснює синусоїдальні коливання вздовж вісі. Наведена кінематична схема та принцип дії машини. Обґрунтовано створення динамічної математичної моделі процесу диспергування в роторному апараті з регульованим ротором, в основі якої лежить класична гідродинаміка. Розроблені алгоритми визначення градієнту швидкості та тиску, напір роторного диспергатора та його конструктивно-кінематичні параметри. Миттєві значення швидкостей і тиску будуть визначати ступінь впливу на білкові структури. Значення швидкостей та тиску можна розрахувати за розробленою у статті аналітичною моделлю. Але ступінь впливу на продукт (що буде визначатись реологічними змінами кисломолочних продуктів) можна буде встановити лише експериментально.

*Ключові слова:* роторний диспергатор, обробка білкових структур, консистенція кисломолочних продуктів, гідродинаміка.

*Постановка проблеми.* У сучасних харчових технологіях перспективним напрямом є формування гомогенізованих білкових структур, тобто кероване розтягнення й деформування білкових молекул на мікро- та молекулярному рівнях у процесі виробництва кисломолочних продуктів [1; 2]. Реалізація такої операції здійснюється за допомогою роторних диспергаторів [3; 4]. Нині розроблено значну кількість конструктивних варіантів роторних диспергаторів-гомогенізаторів, що відрізняються типом робочих органів, наявністю або відсутністю насосного ефекту, інтенсивністю кавітаційних явищ та іншими особливостями. Одним із фундаментальних і найбільш перспективних підходів до створення нових і вдосконалення наявних способів оброблення сировини є математичне моделювання процесів на основі положень класичної гідродинаміки [5; 6]. Для роторного диспергатора, метою якого є створення пульсаційних гідродинамічних впливів на робоче середовище, яке призводить до покращення сенсорних характеристик кисломолочних продуктів, відсутнє аналітичне обґрунтування ефективної конструкції машини.

*Аналіз останніх досліджень.* Руйнація жирового шарика відбувається в зонах кавітації, де є надзвичайно високі тиски і швидкості, значні градієнти швидкостей, а також надзвичайно низькі тиски і температури [7; 8]. В основі запропонованої конструкції лежить гідродинамічний насосний агрегат [9; 10]. Традиційно розраховується течія рідини в елементах проточної частини (підводі, робочому колесі та відводі). З огляду на вищесказане можна зробити висновок, що у разі моделювання робочого процесу відцентрового агрегату доцільно розглядати його як систему взаємодіючих між собою елементів. Побудова математичних моделей елементів відцентрових агрегатів для комплексної моделі досить докладно розглянута в роботах [11; 12].

Течія у відцентровому колесі носить складний характер. При цьому основною інтегральною характеристикою процесу передачі рідині енергії в робочому колесі відцентрового агрегату є напір, значення якого розраховується за основним рівнянням гідромашин [13; 14].

Встановлено, що саме роторні апарати з регульованим ротором мають найбільший потенціал застосування у технологічних схемах виробництва кисломолочної продукції [15]. Такі апарати характеризуються широкими можливостями регулювання параметрів оброблення та цілеспрямованого впливу на білкові структури молочної сировини. Вони відзначаються низьким рівнем енерговитрат завдяки рівномірній дисипації енергії в усьому об'ємі оброблюваного середовища, а також забезпечують високу продуктивність технологічного процесу.

У роботі [4] запропоновано конструкцію диспергатора (рис. 1), що забезпечує реалізацію гіпотези перебігу процесу, рушійною силою якого є керований цикл деформацій дисперсної системи в робочій зоні машини, зумовлений гідродинамічними впливами [7; 8].

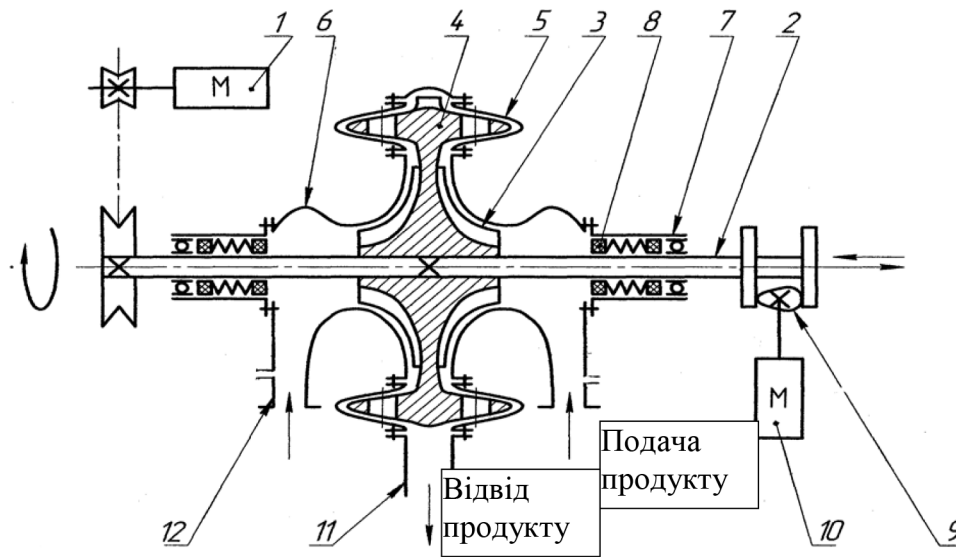


Рис. 1. Функціонально-кінематична схема апарата

Запропонований апарат містить корпус 6, вал 2 із закріпленим ротором 4 та статор 5, виконаний у вигляді двох конічних дисків із робочими поверхнями. Статор жорстко встановлений у корпусі. Вал із ротором змонтовано в корпусі статора на підшипниках 7 зі спеціальним ущільненням 8. Ротор з обох боків оснащений спіралеподібними ребрами жорсткості 3, які одночасно виконують функції лопатей. Між робочими поверхнями статора і робочою поверхнею ротора виставлений мінімальний зазор, що регулюється. До складу апарата також входять вхідний патрубок 12 і вихідний патрубок 11. Електродвигун 1 обертає вал з ротором, а електродвигун 9 за допомогою ексцентрика 9 створює вібраційні коливання.

Оброблюване середовище через вхідний патрубок надходить у центральну частину пристрою із двох сторін і під дією відцентрових сил проходить у зазор між ротором і статором, де і відбувається диспергуючий процес.

*Формулювання мети дослідження.* Основною метою цієї статті є створення математичної моделі процесу диспергування в роторному диспергаторі з регульованим ротором, яка б враховувала основні гідродинамічні процеси, які протікають до входу в робочу зону, а також безпосередньо у самій зоні.

*Основна частина.* Розглянемо характер обертових та осьових рухів роторного диспергатора. При осьових переміщеннях (пульсаціях) ротор, переміщуючись вліво, буде утворювати зліва мінімальну  $h_{\min}$ , а справа максимальну відстань до стінки  $h_{\max}$ , а потім, повертаючись,



буде переміщатися в інший бік, повторюючи свої рухи. Зрозуміло, що гідродинаміка процесу буде змінюватись.

Основний технологічний вплив на продукт здійснюється у разі мікрогідродинамічних високоінтенсивних збурювань у рідині, які викликані диспергуванням, або гомогенізацією. Саме тому в якості прототипу вибрано роторний диспергатор. Рушійною силою диспергування в машинах, де реалізується принцип проштовхування рідини через зазор [1; 2], є градієнт тиску:

$$\frac{dP}{dr} = 2\rho v \frac{G t_g^2 \varphi}{\pi r_0^3 8B^3}, \quad (1)$$

та градієнт швидкості:

$$\frac{dV_r}{dr} = -\frac{G t_g \varphi}{\pi r_0} \frac{1}{4B^2}, \quad (2)$$

де  $B = \frac{G}{4\pi r \eta \sqrt{2g \frac{\Delta P}{\gamma}}}$ , – висота робочої щілини;

$G$  – витрати рідини через робочу щілину;

$r$  – внутрішній радіус робочої щілини;

$\eta$  – коефіцієнт витрат рідини,  $\eta = 0,9$ ;

$\Delta P$  – тиск подачі рідини;

$\gamma$  – питома вага рідини;

$\varphi$  – кут входу рідини в робочу щілину;

$\rho$  – щільність рідини;

$V_r$  – радіальна швидкість потоку;

$\mu$  – кінематична в'язкість.

Аналізуючи наведені залежності, видно, що підвищення градієнту швидкості та тиску можливе, головним чином, підвищуючи надлишковий тиск та зменшуючи зазор на довжині шляху руху рідини (рідкого продукту).

Якщо вимушені осьові переміщення валу ротора робити механічним шляхом за допомогою колового ексцентрика з ексцентриситетом  $a$ , то величину осьового переміщення можна визначити таким чином:

$$h = a \left( 1 - \sin \pi \left( \frac{n_1 t}{30} - \frac{1}{2} \right) \right), \quad (3)$$

де  $n_1$  – частота осьових коливань ротора,  $c^{-1}$

$t$  – час обертання,

$a$  – амплітуда коливань.

Спочатку визначимо теоретичний напір для початкового положення  $B_{cep}$  ексцентрика. З урахуванням запропонованих доповнень [8] до основного рівняння гідромашин теоретичний напір будемо визначати за формулою:

$$H_T = \frac{\omega}{g} \cdot \left( r_2^2 \cdot \omega \cdot \left( 1 - \frac{\pi \cdot \sin(\beta_2 - \Delta\beta_2)}{z} \psi_2 \right) - \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot b_2 \cdot \psi_2 \cdot \operatorname{tg} \beta_2} - K_1 \right), \quad (4)$$

де  $H_T$  – теоретичний напір робочого колеса;

$u_2 = \omega r_2$  – колова швидкість обертання на виході з ротора;

$q$  – витратний параметр насоса;

$b_2$  – ширина виходу з робочого колеса;



$\omega = (\pi n)/30$  – кутова швидкість обертання ротора;  
 $n$  – частота обертання робочого колеса, об/хв.;  
 $g$  – нормальне прискорення падаючих тіл;  
 $r_2$  – радіус виходу з робочого колеса;  
 $\beta_2$  – кут нахилу лопаті на виході з ротора, град. ( $\beta_2 = 20-22$ );  
 $z$  – кількість лопатей;

$K_1 = m \cdot \sqrt[3]{q^2 \cdot n}$  – значення моменту швидкості, що створюється підводом;  
 $m$  – коефіцієнт підкрутки ( $m = 0,06$ ).

При цьому сумарний витратний параметр  $q$  загалом не зміниться, але буде складатися із  $q_{\text{лів}} = q(1 - \sin \pi(n_1 t/30 - 1/2))$  і  $q_{\text{пр}} = q - q_{\text{лів}}$ .

Напір на вході в робочу щілину буде відрізнятися від теоретичного втратами напору як у самому роторі, так і в пазухах – порожнинах між ротором та корпусом.

Втрати напору в роторі диспергатора визначимо з такої залежності:

$$h_{PK} = \zeta_{PK} \frac{w_1^2}{2g}, \quad (5)$$

де  $\zeta_{PK}$  – коефіцієнт гідравлічного опору робочого колеса;

$w_1$  – відносна швидкість потоку на вході в робоче колесо, яка визначається

$$w_1^2 = (u_1 - v_{u1})^2 + v_{m1}^2, \quad (6)$$

де  $u_1 = \omega r_1$  – колова швидкість обертання на вході.

Витратний складник швидкості потоку на вході в робоче колесо з урахуванням стиснення визначимо як

$$v_{m1} = \frac{q}{2\pi \cdot r_1 \cdot b_1 \cdot \left(1 - \frac{\delta_1 \cdot z}{2\pi \cdot r_1 \cdot \sin \beta_{1,l}}\right)}, \quad (7)$$

$v_{u1} = K_1/u_1$  – коловий складник швидкості потоку на вході в робоче колесо;

$r_1$  – радіус входу в робоче колесо;

$b_1$  – ширина входу в робоче колесо;

$\beta_{1,l}$  – кут нахилу лопаті на вході в робоче колесо;

$\delta_1$  – товщина лопаті на вході.

За розподілом тиску в пазусі визначимо втрати напору:

$$h_{\text{наз.}} = \frac{p_2}{\rho g}, \quad (8)$$

де  $p_2$  – тиск перед входом у робочу щілину.

Тиск будемо визначати за виразом

$$p_2 = \frac{H_T 10^{-4}}{\mu}, \quad (9)$$

де  $\mu$  – відносна щільність рідини.

Таким чином, маємо характеристику робочого колеса у вигляді:

$$H = H_T - h_{PK} - h_{\text{наз.}}$$

Щоб описати процеси, які протікають у самій щілині, нам необхідно визначити швидкість рідини. Під дією відцентрових сил рідина направляється в робочу зону диспергатора (робочий зазор між ротором і статором) зі швидкістю, яку визначимо за формулою

$$v_g = \frac{q}{F_g}, \quad (10)$$

де  $q$  – витрата на виході із ротора;

$F_g$  – площа робочої щілини між ротором і статором.

Характерне значення швидкості  $v_2$  визначимо за формулою:

$$v_2 = \sqrt{U_2^2 + \left[ \frac{(\omega + \omega_c) r_2}{2} \right]^2}, \quad (11)$$

де  $U_2 = \frac{q}{\pi D_2 s_{n2}}$  – середня швидкість, м/с;

$\omega$  і  $\omega_c$  – кутові швидкості ротора і стінки,  $c^{-1}$ .

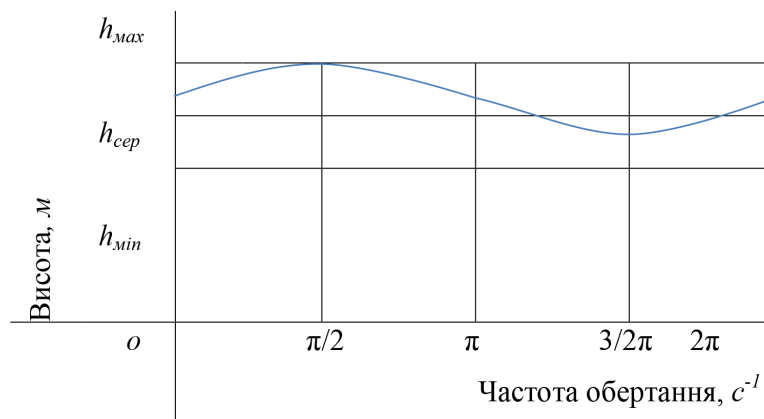
У нашому випадку висоту робочої щілини з урахуванням (1) можна визначити за виразом:

$$h_{\min} = B_{\text{сеп}} - S \cos \varphi/2, \quad (12)$$

$$h_{\max} = B_{\text{сеп}} + S \sin \varphi/2. \quad (13)$$

У разі створення динамічної моделі процесу обробки, де постійним параметром є час  $t$ , величина  $B$  буде змінюватись за один оберт ексцентрика за синусоїдальним законом (рис. 2).

Як показали дослідження [6; 9], мікробурюючі процеси в робочій щілині (кавітаційні ефекти, високі значення градієнтів тиску та швидкості) виникають тільки за наявності відповідних тисків, швидкостей і їх градієнтів, що і є обмеженнями для математичної моделі.



**Рис. 2. Графік зміни висоти робочої щілини роторного диспергатора у часі за один оберт ексцентрика**

Таким чином, із синусоїдальними змінами висоти щілини, крізь яку проходить продукт, що піддається диспергуванню, істотно (від максимуму до мінімуму) змінюється і вплив на білкові структури кисломолочних продуктів. З огляду на те, що частота обертання ротора буде постійною, то тиск, який створюється за рахунок відцентрового обертання ротора, буде постійним. Отже, головним чинником зміни швидкості руху продукту буде величина зазору. Швидкість буде максимальною у разі максимально відкритої щілини (за рахунок максимального коефіцієнта швидкості каналів у роторі) та мінімальною у разі мінімального значення  $h_{\min}$ . Водночас витрата рідкого продукту, що проходить крізь робочий зазор у роторі, буде максимальною у разі максимальної  $h_{\max}$ . Отже, при обертах ротора та особових рухах ротора будуть створюватись пульсації (швидкості та тиску) об'ємів продукту. Їх миттєві значення і будуть визначати ступінь впливу на білкові структури. Значення швидкостей та тиску можна розрахувати за наведе-



ною вище аналітичною моделлю. Але ступінь впливу на продукт (що буде визначатись реологічними змінами кисломолочних продуктів) можна буде встановити лише експериментально.

**Висновки.** У статті обґрунтовано створення динамічної математичної моделі процесу диспергування в роторному апараті з регульованим ротором, в основі якої лежить класична гідродинаміка. Розроблені алгоритми визначення градієнту швидкості та тиску, напір роторного диспергатора та його конструктивно-кінематичні параметри.

У майбутньому планується провести тестування аналітичної моделі на різних суспензіях, розробити і перевірити алгоритми вибору конструктивної схеми проточного тракту ротора, що знов створюється, і прогнозного розрахунку його енергетичних характеристик; забезпечити можливість широкого впровадження оптимізаційних розрахунків на перших етапах розробки диспергатора, що знов створюється, та проведенні експериментальних досліджень із можливим уточненням параметрів розробленої моделі.

#### Список використаних джерел

1. Dhankhar P. Homogenization fundamentals. *IOSR J. Eng.* 2014, 4, 1–8. DOI: <https://doi.org/10.9790/3021-04540108>
2. Huppertz T. Homogenization of Milk Other Types of Homogenizer (High-Speed Mixing, Ultrasonics, Microfluidizers, Membrane Emulsification). In *Encyclopedia of Dairy Sciences*. 2nd ed. Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2011, 761–764. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374407-4.00226-0>
3. Самойчук К. О., Прісс Є. Р. Покращення сенсорних властивостей кисломолочної продукції впливом на білкові структури. The XXI International scientific and practical conference “*Modern technologies and science: problems, new and relevant developments*”, May 26–28, 2025, Zaragoza, Spain. P. 282–284.
4. Самойчук К. О., Прісс Є. Р. Аналіз конструкцій роторних диспергаторів для створення гомогенних білкових структур. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного*, 25 (2). 2025, 212–219. DOI: <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-25>
5. Yong A., Islam M., Hasan N. The Effect of pH and High-Pressure Homogenization on Droplet Size. *Sigma J. Eng. Nat. Sci.* 2017, 35, 1–22. DOI: <https://doi.org/10.26776/IJEMM.02.04.2017.05>
6. Valencia-Flores D., Hernández-Herrero M., Guamis B., Ferragut V. Comparing the Effects of Ultra-High-Pressure Homogenization and Conventional Thermal Treatments on the Microbiological, Phys, and Chem Quality of Almond Beverages. *J. Food Sci.* 2013, 78, 199–205. DOI: [https://doi.org/10.1111/1750\\_3841.12029](https://doi.org/10.1111/1750_3841.12029)
7. Acharyaa S., Mishrab V., Patelc J. Enhancing the mixing process of two miscible fluids: A review. *AIP Conference Proceedings* 2021, 2341, 030025. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0051818>
8. Алексенко О. В. Розробка методів розрахунку та дослідження робочого процесу лопатевих насосів : автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук : спец. : 05.05.17. Суми. 2006. 20 с.
9. M. Rayner P. Dejmek, Engineering Aspects of Emulsification and Homogenization in the Food Industry. *CRC Press, Taylor & Francis Group*, 322. 2015. ISBN 9781466580435. DOI: 10.1201/b18436
10. Håkansson A., Fuchs L., Innings F., Revstedt J., Trägårdh C., Bergenståhl B. Velocity measurements of turbulent two-phase flow in a high-pressure homogenizer model. *Chem. Eng. Commun.* 2013, 200, 93–114. DOI: <https://doi.org/10.1080/00986445.2012.691921>
11. Samoichuk K., Yalpachyk V., Kholobtseva I., Dmytrevskyi D., Chervonyi V. Design Improvement of the Rotary-Pulsation Device by Resonance Phenomena. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII. DSMIE 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. Pp. 74–83.
12. Ciron C., Gee V., Kelly A., Auty M. Comparison of the effects of high-pressure microfluidization and conventional homogenization of milk on particle size, water retention and texture of non-fat and low-fat yoghurts. *Int. Dairy J.* 2010, 20, 314–320. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2009.11.018>
13. Wang X., Wang Y., Li F., Li L., Ge X., Zhang S., Qiu T. Scale-up of microreactor: Effects of hydrodynamic diameter on liquid–liquid flow and mass transfer. *Chem. Eng. Sci.* 2020, 226, 115838. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115838>
14. J. Morales A., Watts J. McConville. Mechanical particle-size reduction techniques. *AAPS Adv. Pharm. Sci.* 22, 2016. 165–213. DOI: 10.1007/978-3-319-42609-9\_4



15. Innings F., Trägårdh C. Visualization of the Drop Deformation and Break-Up Process in a High Pressure Homogenizer. *Chemical Engineering & Technology*. Vol. 28, Issue 8, 2005. 882–891.

*Дата першого надходження статті до видання: 18.01.2026*

*Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.02.2026*

*Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026*

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



**K. Samoichuk, Ye. Priss**

*Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University*

## **ANALYTICAL STUDIES OF ROTARY DISPERSER PARAMETERS FOR THE FORMATION OF HOMOGENEOUS PROTEIN STRUCTURES**

### ***Summary***

In modern food technologies, a promising direction is the formation of homogenized protein structures, i.e., the controlled stretching and deformation of protein molecules at the micro- and molecular levels during the production of fermented dairy products. In the field of food machinery engineering, the operation of imparting a homogeneous structure after fermentation of cultured dairy products is a novel and promising process in fermented dairy production. To implement this operation, a rotary disperser design with an adjustable rotor performing sinusoidal oscillations along the axis has been proposed. The kinematic scheme and operating principle of the machine are presented. The development of a dynamic mathematical model of the dispersion process in a rotary apparatus with an adjustable rotor is substantiated; the model is based on classical hydrodynamics. Due to sinusoidal variations in the gap height through which the product passes during dispersion, the impact on the protein structures of fermented dairy products changes significantly (from maximum to minimum). Considering that the rotor rotational speed is constant, the pressure generated by centrifugal rotation of the rotor is also constant. Therefore, the main factor governing the change in product flow velocity is the gap size. The velocity reaches its maximum at the maximum gap opening (due to the maximum flow coefficient of the rotor channels) and its minimum at the smallest gap value. At the same time, the flow rate of the liquid product passing through the working rotor gap is also maximal at the largest opening. Thus, rotor rotation combined with axial oscillatory motion produces pulsations of product volume (velocity and pressure). Their instantaneous values determine the degree of influence on protein structures. The velocity and pressure values can be calculated using the analytical model described above; however, the degree of product modification (determined by rheological changes in fermented dairy products) can only be established experimentally.

**Keywords:** rotary disperser, protein structure processing, consistency of fermented dairy products, hydrodynamics.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-21>

УДК 621.928:665.3:621.923.1:004.94

В. А. Самохвал<sup>1</sup>

ORCID: 0000-0001-5539-3647

І. М. Білоус<sup>2</sup>, д-р філософії

ORCID: 0000-0001-9635-6631

<sup>1</sup> Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного<sup>2</sup> Дніпровський державний аграрно-економічний університет

e-mail: samohvalvitaliy@gmail.com

## РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРЕСУВАННЯ БРИКЕТІВ І ВІДЖИМУ ОЛІЇ У ШНЕКОВОМУ ПРЕСІ

*Анотація.* У статті представлено комплексну методику чисельного моделювання процесу виготовлення паливних брикетів у шнековому пресі на основі інтегрованого підходу DEM–CFD. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення енергоефективності технологій переробки біомаси та вдосконалення конструктивно-технологічних параметрів брикетувального обладнання. Моделювання виконано в програмному середовищі STAR-CCM+ з урахуванням взаємодії твердих частинок рослинної сировини та міжчастинної рідкої фази, що дозволило відтворити реальну фізику процесів ущільнення, формування тиску та витиснення рідини. На основі повнофакторного чисельного експерименту побудовано регресійні моделі другого порядку для продуктивності преса, щільності сформованого брикету та кількості виділеної олії залежно від частоти обертання шнека, кроку завантажувального шнека та довжини формувального пристрою. Проведений аналіз показав нелінійний і багатокритеріальний характер процесу брикетування, наявність компромісу між показниками продуктивності, якості брикету та інтенсивності виділення рідкої фази. Отримані результати підтверджують адекватність застосованого DEM–CFD підходу та можуть бути використані для оптимізації режимів роботи й конструктивних параметрів шнекових пресів з метою підвищення ефективності виробництва твердого біопалива.

*Ключові слова:* біомаса, паливні брикети, шнековий прес, чисельне моделювання, DEM–CFD, продуктивність, щільність брикету, витиснення олії.

*Постановка проблеми.* Загальносвітова енергетична ситуація залишається критичною: нині понад 80 % первинної енергії забезпечується викопним паливом, що призводить до вичерпання запасів і зростання викидів парникових газів [1]. Водночас поновлювані джерела енергії, зокрема біомаса, набувають дедалі більшої ролі у сталому енергоспоживанні. За даними Всесвітньої асоціації біоенергетики, частка відновлюваної енергії у глобальному енергопостачанні становить ~15 %, а внесок твердого біопалива (біоенергії) досягає рекордних 56 ЕДж (~9 %) [1]. Біоенергію розглядають як невичерпне і довгострокове джерело, здатне пом'якшити проблеми вичерпання вуглецевих ресурсів [2]. Проте сировина біомаси (солота, лушпиння, деревні відходи тощо) зазвичай має низьку питому енергетичну щільність і великий вологовміст, що ускладнює її збір, транспортування та ефективне спалювання. Утворення компактних твердих брикетів із таких матеріалів суттєво підвищує їхню енергетичну цінність і покращує експлуатаційні властивості палива. Зокрема, брикетоване паливо характеризується значно вищою теплотворною здатністю і нижчим вмістом золи порівняно з вихідною сировиною чи вугіллям [2]. Таким чином, брикетування біомаси сприяє вирішенню проблеми низької щільності палива та є перспективним шляхом підвищення енергоефективності та зменшення екологічного впливу.

Попри очевидні переваги, технологія виробництва паливних брикетів вимагає ретельного налаштування обладнання та параметрів процесу. Шнекові екструдери широко застосовуються для ущільнення біомаси завдяки можливості безперервної роботи та ефективного витискання



вологи, проте їх конструкція та експлуатаційні режими потребують оптимізації. Наявні підходи до аналізу роботи брикетувальних машин часто покладаються на емпіричні спостереження або спрощені моделі, що не враховують комплексного характеру взаємодії твердої фази (частинок біомаси) з рідинною фазою (волога або інші компоненти). Відсутність детальних чисельних моделей, які б одночасно описували рух частинок і фільтрацію рідини під високим тиском, гальмує розвиток енергоефективних конструкцій екструдерів. Це визначає актуальність розробки і використання комплексних методів моделювання процесу брикетування з урахуванням усіх ключових фізичних явищ.

*Аналіз останніх досліджень.* У роботах останніх років числові методи дедалі активніше застосовують для моделювання процесів ущільнення біомаси. Так, Ning та співавт. зазначають, що використовують FEM, DEM або їх поєднання для імітації процесів брикетування біомаси, що дає змогу вивчати закономірності руху та деформації матеріалу й оптимізувати конструкцію прес-форм [3]. Зокрема, найраніші установки для формування палива – це шнекові преси з нагрівом матриці (150–300 °C), а також плоскі та кільцеві матричні преси. Нерівномірність контакту частинок із поверхнями пресу та їхня нелінійна деформація вимагають використання як неперервних (FEM), так і дискретних (DEM) моделей [3].

Bembenek та співавт. продемонстрували ефективність DEM-моделювання для роликів пресів. Використавши програму Altair EDEM, вони змоделювали процес ущільнення тонкодисперсного матеріалу між роликками, показавши, що DEM коректно відображає поля напружень і контакту в зоні деформації роликкового преса [4]. Результати дозволили врахувати характеристики частинок (розмір, фізично-механічні властивості) і визначити енергетичні параметри ущільнення. Автори робіт наголошують, що DEM-моделі допомагають прискорити розробку пресового обладнання та технологічних процесів брикетування шляхом ітеративного аналізу напружень і зносу поверхонь пресів [4].

Для шнекових пресів, які широко використовують для брикетування волокнистої біомаси, чисельних досліджень менше, проте окремі роботи відзначають важливість аналізу напружень у шнеку та матриці. Так, в огляді Ning та співавт. згадується, що шнекові преси формують брикети за рахунок поступово обертового нагрітого шнека [3]. Аналіз стресів та руху біомаси у шнековому екструдері показав, що максимальні напруження виникають у ділянках, де припадає найбільший знос матриці [5]. Ці результати свідчать, що DEM-моделювання, яке враховує дискретність частинок, може бути успішно застосоване і до шнекових систем для прогнозування силових навантажень, зносу та дефектів брикету в режимі реальної експлуатації [4–5].

Під час моделювання процесу брикетування важливі технологічні параметри. Adam та співавт. моделювали пресування вологої деревної біомаси у штемпельному пресі і виявили, що час витримки під тиском є ключовим фактором: у разі збільшення цього часу щільність брикету зростає, причому напір тиску по довжині матриці нерівномірний через тертя [6]. Моделювання показало також, що доцільно використовувати легкий конус на вході матриці для вирівнювання тиску. Крім того, експерименти підтверджують, що вологість сировини суттєво впливає на якість брикетів: дослідження на прикладі альфальфи показали, що низька вологість призводить до недостатнього ущільнення і погіршення якості, тоді як оптимальна вологість (~15–18 %) забезпечує підвищений тиск ущільнення та міцність брикету [5]. Загалом процес ущільнення знижує вміст вологи в брикеті та підвищує його енергетичну щільність і якість палива [7]. Такі результати і моделювання, і експериментів показують, що для вологої біомаси необхідно оптимізувати конструкцію пресів і режими роботи для ефективного відведення вологи та досягнення високої щільності готового палива [5; 7].

Останні дослідження підкреслюють користь комбінованих моделей. Наприклад, Gao та співавт. використали метод DEM–FEM для аналізу зносу матриці плоского pelletного преса



у разі різних співвідношень компонентів суміші. Поєднання DEM і FEM дозволило безпосередньо передавати сили від частинок до моделі конструкції пресу і точніше оцінювати розподіл напружень і знос матеріалу [8]. Таким чином, цей підхід інтегрує мікроскопічні взаємодії частинок і макроскопічну механіку прес-форм, що дає більш коректні прогнози параметрів ущільнення та зношування [8]. Використання DEM–FEM-моделей уже показало перспективність для оптимізації геометрії та режимів пресів: вони дають можливість варіювати кут конусності, співвідношення діаметру і довжини матриці тощо, щоб забезпечити рівномірніше ущільнення та мінімізувати енергоспоживання і знос деталей.

Огляд літератури свідчить, що за останні 5 років чисельне моделювання брикетування біомаси активно розвивається. DEM-моделювання застосовується для роликівих і шнекових пресів, дозволяючи виявляти зони концентрації напружень і зносу [4–5]. Параметри процесу (тиск, час утримки, вологість) демонструють сильний вплив на щільність і міцність брикету [5–6]. Зі свого боку, поєднання DEM з FEM (та потенційно CFD) відкриває нові можливості: перенесення даних частинкових моделей у глобальні розрахунки пресових конструкцій дає змогу оптимізувати дизайн матриць і режимів роботи для підвищення ефективності ущільнення [7–8]. Тобто сучасні дослідження показують, що комбіновані чисельні моделі можуть стати потужним інструментом для підвищення продуктивності та надійності брикетувального обладнання.

*Формулювання цілей статті.* Метою цього дослідження є розробка комплексної методики чисельного моделювання процесу виготовлення паливних брикетів у шнековому пресі з використанням інтегрованого підходу DEM–CFD. Зокрема, передбачається: побудувати детальну 3D-геометрію преса та сітки для моделювання; змодельовати динаміку переміщення і ущільнення твердих частинок біомаси разом із витисненням міжчастинної рідини (олії); проаналізувати вплив основних технологічних параметрів (частоту обертання шнеків, крок завантажувального шнеку, довжину формувального каналу) на ключові вихідні показники процесу (продуктивність преса, щільність сформованого брикету та вміст витиснутої рідини). Для кількісної оцінки зв'язків між факторами і результатами передбачено проведення повнофакторного експериментального плану з наступною побудовою квадратичних регресійних моделей з урахуванням взаємодій факторів [9]. Застосування таких моделей забезпечить обґрунтоване визначення оптимальних значень параметрів роботи преса та підвищить узгодженість моделювання з фізичною природою процесу.

*Основна частина.* Чисельне моделювання процесу виготовлення паливних брикетів у шнековому пресі проводилося із застосуванням комбінованого підходу DEM–CFD, реалізованого у програмному середовищі STAR-CCM+ [10]. Такий підхід дозволяє одночасно враховувати рух і взаємодію твердих частинок рослинної сировини, що розглядаються як дискретні елементи в межах методу DEM, та поведінку міжчастинної рідкої фази – олії, яка заповнює пори середовища та описується як неперервна фаза в рамках CFD-моделі, що є припущенням для симуляції. Інтеграція DEM та CFD у єдиному чисельному середовищі дає можливість відтворити реальну фізику процесу пресування: від завантаження сипучої суміші у зону захвату шнека до формування брикету у конічній насадці.

Першим етапом моделювання було створення точної тривимірної геометричної моделі шнекового пресу. 3D-модель виконано в 3D-CAD STAR-CCM+ (рис. 1), що дозволило з високою точністю відтворити всі елементи конструкції, зокрема: корпус пресу, завантажувальний бункер, секцію шнекового транспортера, активну зону ущільнення, перехідну конічну насадку та канал остаточного формування брикету. Геометрію шнека моделювали на основі попередніх аналітичних досліджень: довжина шнеків  $L_1 = 160$  мм,  $L_2 = 65$  мм,  $L_3 = 55$  мм,  $L_4 = 55$  мм,  $L_5 = 135$  мм; крок шнеків  $S_1 = S_2 = 50 \dots 90$  мм,  $S_2 = 50$  мм,  $S_3 = 40$  мм,  $S_4 = 40$  мм,  $S_5 = 35$  мм;

зовнішній діаметр шнеків  $D_1 = 105$  мм,  $D_2 = 105$  мм,  $D_3 = 105$  мм,  $D_4 = 105$  мм,  $D_5 = 60$  мм; діаметр валів шнеків  $d_0 = 75$  мм,  $d_1 = 77$  мм,  $d_2 = 78$  мм,  $d_3 = 79$ ,  $d_4 = 80$  мм,  $d_5 = 40$ ; розміри матриці  $D_m = 53$  мм,  $L_m = 80$  мм; довжина елемента дожимної камери  $L_d = 200$  мм; кількість елементів дожимної камери  $N_d = 1 \dots 11$ , загальна довжина дожимної камери  $L = L_d \cdot N_d = 200 \dots 2200$  мм; розмір завантажувального отвору  $L_z = 102$  мм,  $B_z = 80$  мм.

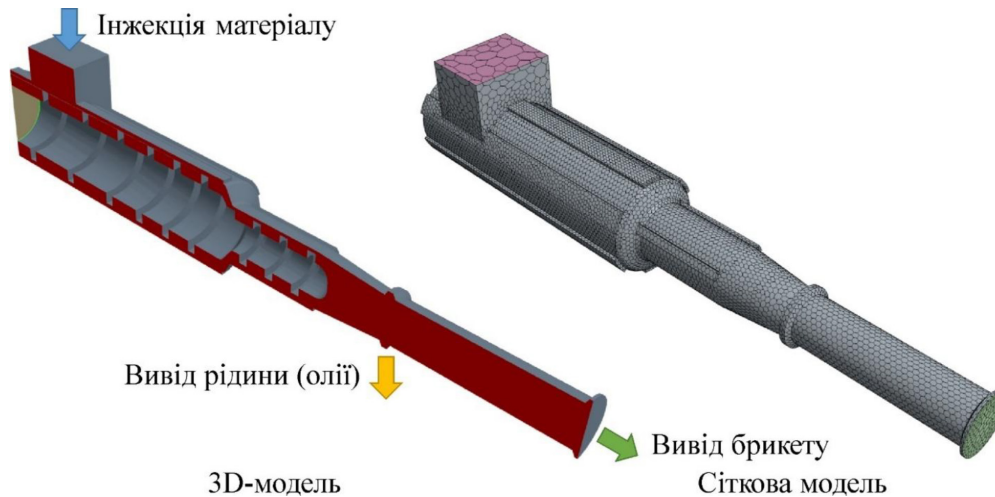


Рис. 1. 3D-модель і сіткова модель шнекового пресу

У STAR-CCM+ було створено дві взаємопов'язані сіткові області: сітку CFD та простір для дискретних елементів DEM (рис. 1). Важливим кроком було забезпечення достатньої деталізації сітки в місцях звужень та різких змін геометрії, зокрема в зоні формування брикету, де очікується найбільше зростання градієнтів тиску та швидкості потоку.

Для CFD-частини використовувалася багатогранна сітка, яка забезпечує високу точність за помірної кількості комірок. У критичних зонах виконували локальне згущення сітки за рахунок функції volumetric controls, що дозволило збільшити роздільність у місцях з очікуваними високими градієнтами.

Вибір розміру комірки DEM-решітки здійснювався з урахуванням середнього розміру частинок суміші (0,5–2 мм). Для коректної роботи DEM–CFD coupling кількість CFD-комірок у сфері впливу однієї частинки мала становити не менше 6–8. Такий підхід забезпечує баланс між точністю та обчислювальною ефективністю.

Після створення геометрії було сформовано обчислювальну область та створено фізичні моделі для опису процесу пресування. Оскільки матеріал являє собою багатокомпонентну систему, що складається з твердих частинок та рідини, було застосовано двофазну модель Euler–Lagrange, де рідина описується рівняннями неперервного середовища, а тверді частинки – моделлю DEM.

Система включала: модель руху твердих частинок на основі DEM, модель руху рідкої фази (олії) на основі CFD, модель взаємодії фаз DEM–CFD, модель обертального руху шнека, визначення зон інтерфейсної взаємодії.

Завдяки такій структурі STAR-CCM+ забезпечує послідовний розрахунок динаміки частинок і потоку рідини з урахуванням зворотного впливу.

Частинки суміші в DEM моделювалися як кульові елементи з еквівалентним діаметром. Використовувалася модель контактної взаємодії Герца–Міндліна (Hertz–Mindlin) з урахуванням тертя, пружності та демпфування. Для частинок були задані такі параметри, як: густина матеріалу, модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, коефіцієнт ковзного тертя, коефіцієнт кочення, коефіцієнт реституції.



Для моделювання зчеплення частинок у зоні високого тиску вводилася когезійна модель з лінійним законом злипання. Це дозволяло відтворити процес утворення щільної квазісуцільної структури брикету, характерної для реальних умов.

Рідина – олія, що виділяється під час пресування або присутня у початковій суміші, моделювалася як ньютонівська рідина з постійною динамічною в'язкістю. Для моделювання її руху застосовувалися рівняння Нав'є–Стокса у повній нестационарній постановці. Турбулентність моделювали за допомогою моделі  $k$ - $\omega$  SST як оптимальної для пристінних течій та зон зі значними деформаціями.

Особливе значення мала модель пористості, що виникає внаслідок наявності частинок DEM у кожній CFD-комірці. У STAR-CCM+ це реалізується через DEM–CFD coupling: поле пористості змінюється динамічно відповідно до розташування частинок, що дозволяє відтворювати реальний процес витиснення олії під час ущільнення суміші.

Початкові умови включали: початкове випадкове розташування частинок у зоні завантаження; початкову швидкість частинок – нульову; початковий вміст рідкої фази у вигляді рівномірно розподіленого поля пористості.

Граничні умови: на стінках пресу – no-slip для рідини та law of wall для частинок DEM; на вході – умова поповнення частинок із заданою інтенсивністю подачі; на виході – тиск 1 атм (101325 Па) або умова витиснення зі збереженням безперервності потоку.

Обертання шнека реалізовувалося двома способами: реальний твердотільний рух, коли шнек є рухомою частиною геометрії.

Фізико-механічні властивості частинок визначали на основі попередніх досліджень [11–13]: насипна густина сухої маси становила 620 кг/м<sup>3</sup>, дійсна густина – 1200 кг/м<sup>3</sup>, межа міцності частинок у разі стискання – 1,8 МПа, коефіцієнт внутрішнього тертя в нерухомому стані – 0,43, у рухомому стані – 0,35, адгезія у разі стискання – 0,30 Н/м.

Властивості рідкої фази включали [14–15]: динамічну в'язкість олії – 0,065 Па · с, густину – 920 кг/м<sup>3</sup>, поверхневий натяг – 0,032 Н/м, температурну залежність в'язкості  $d\eta/dT$  – 0,0045 Па · с/°С.

У ході моделювання формувалися такі графічні дані: скалярне поле тиску уздовж шнекового пресу (рис. 2), скалярне поле щільності уздовж шнекового пресу (рис. 3), векторне поле швидкостей уздовж шнекового пресу (рис. 4), розподіл рідини (олії) уздовж шнекового пресу (рис. 5). Отримані поля дозволили візуалізувати процеси ущільнення частинок, формування зони максимального тиску та інтенсивність переміщення матеріалу, а також оцінити ефективність віджиму рідкої фази. Таке графічне представлення дає можливість встановити взаємозв'язок між геометрією шнека, параметрами тертя та розвитком фільтраційних потоків, що є важливим для оптимізації конструктивно-технологічних параметрів пресового обладнання.

Ці результати дозволяли оцінити не тільки кінцеві параметри процесу, але й внутрішні механізми пресування: утворення зони ущільнення, витиснення олії, формування макроструктури брикету.

Для моделювання були вибрані такі фактори (вхідні параметри): частота обертання шнека  $n$  (50 об/хв, 75 об/хв, 100 об/хв,), крок завантажувального шнека  $S_z$  (50 мм, 70 мм, 90 мм), довжина пристрою остаточного формування  $L$  (200 мм, 1200 мм, 2200 мм). Зміна цих параметрів дозволяла оцінити їх вплив на рух частинок, ступінь ущільнення, формування тиску й інтенсивність видавлювання олії.

Критеріями якості процесу пресування були: продуктивність  $Q$  (т/год), густина сформованого брикету  $\rho$  (т/м<sup>3</sup>), вихід олії  $B_o$  (%). Саме ці показники визначають технологічну ефективність шнекового пресу та його енергетичну доцільність.

У ході дослідження результати повнофакторного плану  $3^3 = 27$  дослідів було піддано статистичній обробці [16] у середовищі Wolfram Cloud. Для побудови регресійних залежностей

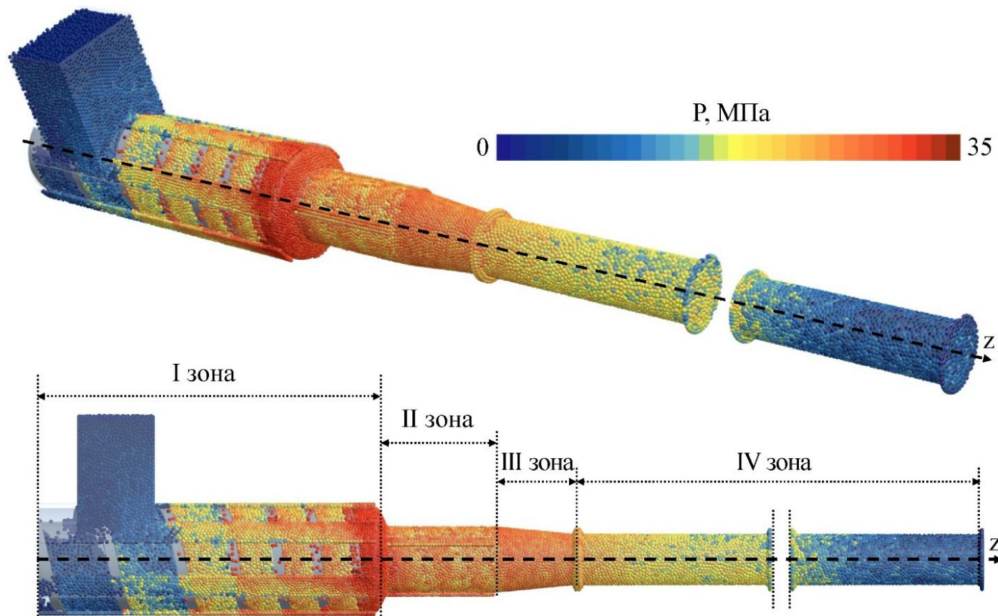


Рис. 2. Скалярне поле тиску уздовж шнекового пресу

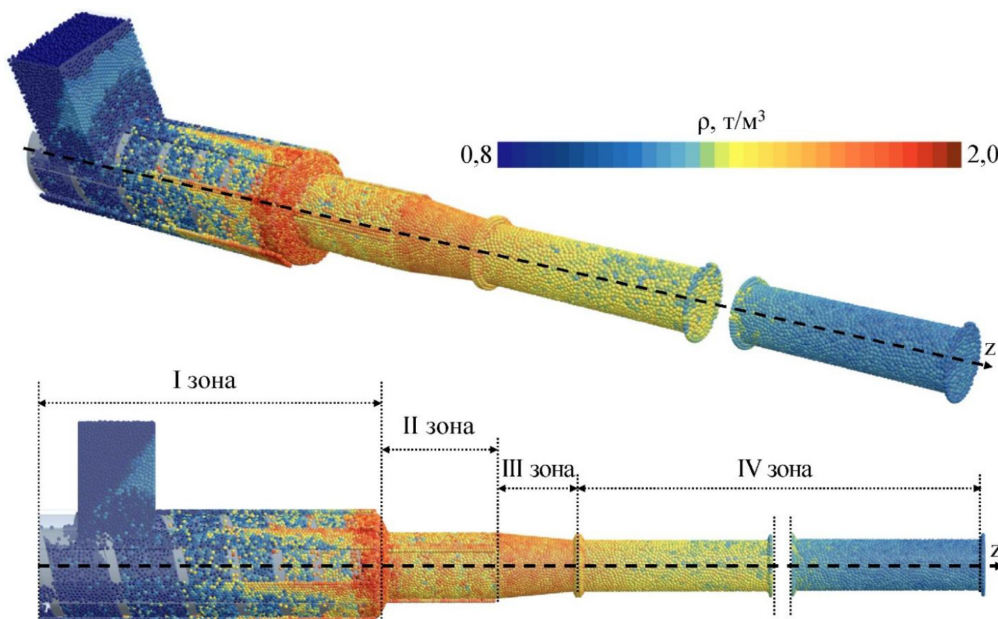


Рис. 3. Скалярне поле щільності уздовж шнекового пресу

другого порядку застосовано функцію `NonlinearModelFit`, що дозволила отримати модель із квадратичними та парними взаємодіями факторів. Оцінювання значущості коефіцієнтів виконували за допомогою `ParameterTable`, а перевірку адекватності та дисперсійний аналіз – через `ANOVATable`. Знайдення оптимальних значень цільових функцій здійснювали засобами `FindMinimum` та `FindMaximum` залежно від задачі оптимізації. Для наочного представлення просторової структури отриманих регресійних моделей і впливу трьох факторів на досліджуваний показник використовували функцію `Plot3D`, що дало змогу побудувати тривимірні поверхні відгуку та провести їх графічний аналіз.

У результаті обробки даних чисельного моделювання у середовищі `Wolfram Cloud` було отримано регресійну модель другого порядку для продуктивності  $Q$ , яка описує нелінійний характер впливу технологічних факторів та їх комбінованих взаємодій (рис. 6).

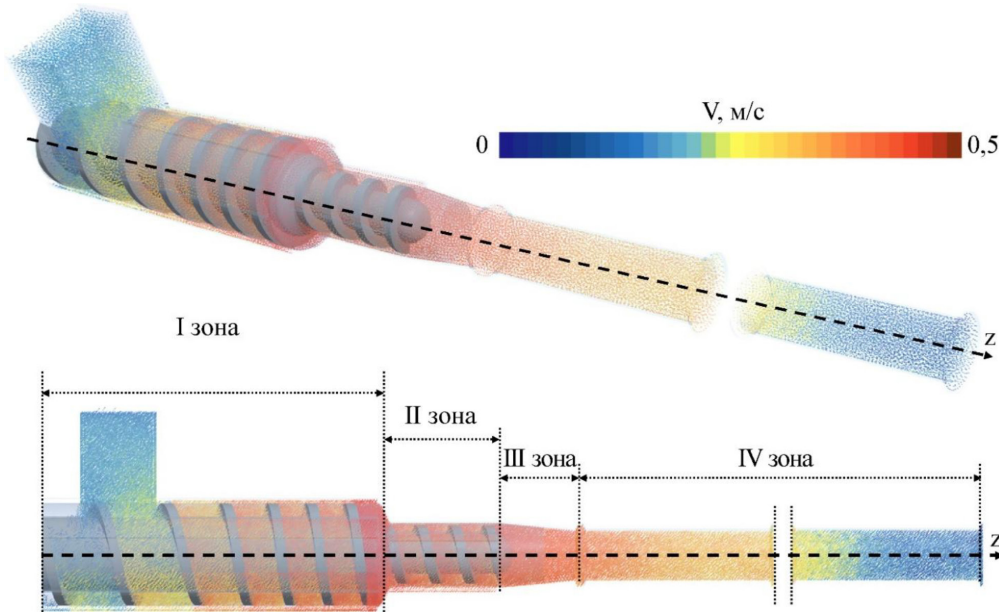


Рис. 4. Векторне поле швидкостей уздовж шнекового пресу

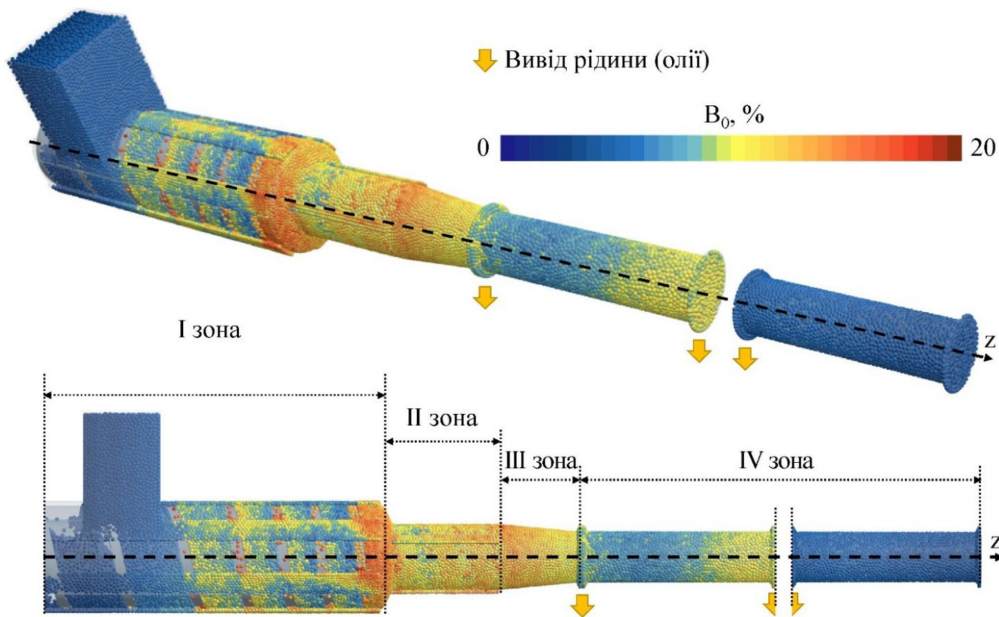


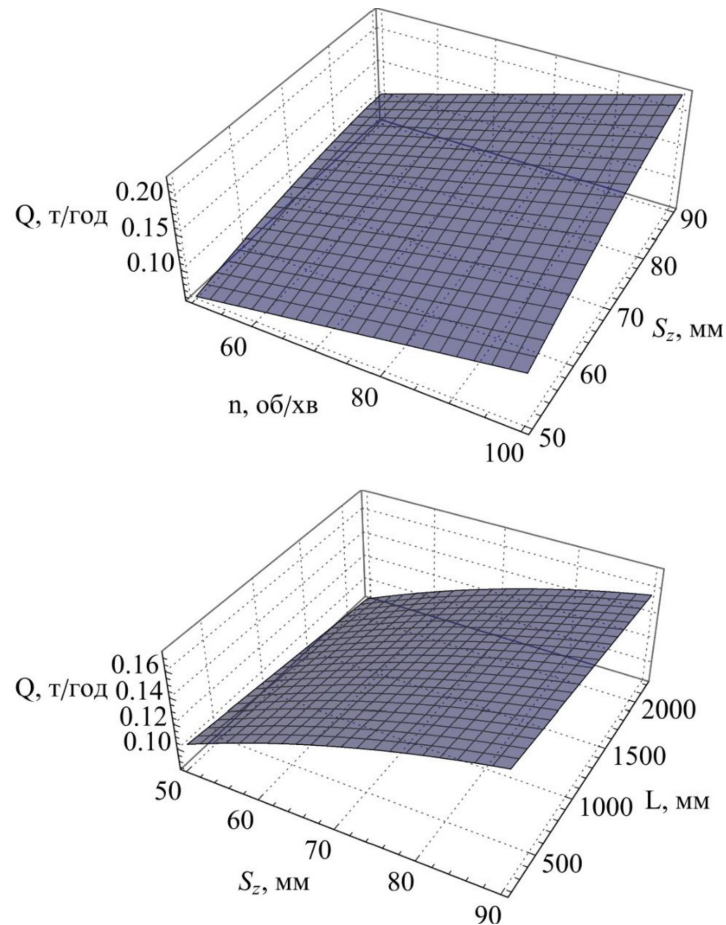
Рис. 5. Розподіл вмісту рідини (олії) уздовж шнекового пресу

$$Q = -0,074694 - 8,64444 \cdot 10^{-6} L + 0,00175833n + 0,00227458S_z + 0,00002525nS_z - 0,0000171389S_z^2. \quad (1)$$

Це рівняння дозволяє напряму оцінювати вплив кожного фактора на продуктивність у фізичних одиницях. Як видно, основні позитивні ефекти надають збільшення частоти обертання шнеків та кроку завантажувального шнеку, тоді як довжина формувального пристрою має незначний, але негативний вплив.

На основі моделі було визначено умови мінімальної та максимальної продуктивності:

$$\begin{aligned} Q_{\min} = 0,0491 \text{ т/год} &\Rightarrow n = 50,0 \text{ об/хв}, \quad S_z = 50,0 \text{ мм}, \quad L = 2200 \text{ мм}, \\ Q_{\max} = 0,2343 \text{ т/год} &\Rightarrow n = 100 \text{ об/хв}, \quad S_z = 90,0 \text{ мм}, \quad L = 200 \text{ мм}. \end{aligned} \quad (2)$$



**Рис. 6. Залежність продуктивності  $Q$  від частоти обертання шнеків  $n$ , кроку завантажувального шнеку  $S_z$ , довжини пристрою остаточного формування  $L$**

Отримані дані підтверджують, що для досягнення максимальної продуктивності необхідно використовувати високі частоти обертання шнеків, більший крок шнеку та мінімальну довжину формувального пристрою. Зменшення довжини  $L$  скорочує час перебування матеріалу в прес-формі, що дозволяє зменшити втрати енергії на тертя і збільшити швидкість формування брикету.

Особливу увагу приділено щільності брикету, оскільки саме цей критерій визначає якість та енергетичну цінність готового продукту, а також опосередковано впливає на стійкість брикетів у разі транспортування та зберігання. Структура моделювання включала отримання повної квадратичної регресійної моделі другого порядку, перевірку її статистичної значущості, оцінку параметрів моделі та визначення оптимальних технологічних параметрів для максимізації щільності. Отримане рівняння для щільності брикету  $\rho$  (рис. 7):

$$\rho = -3,46479 + 0,00121889L - 3,55833 \cdot 10^{-7} L^2 + 0,0609747n - 0,000317667n^2 + 0,0418446S_z - 0,000162083nS_z - 0,000241875S_z^2. \quad (3)$$

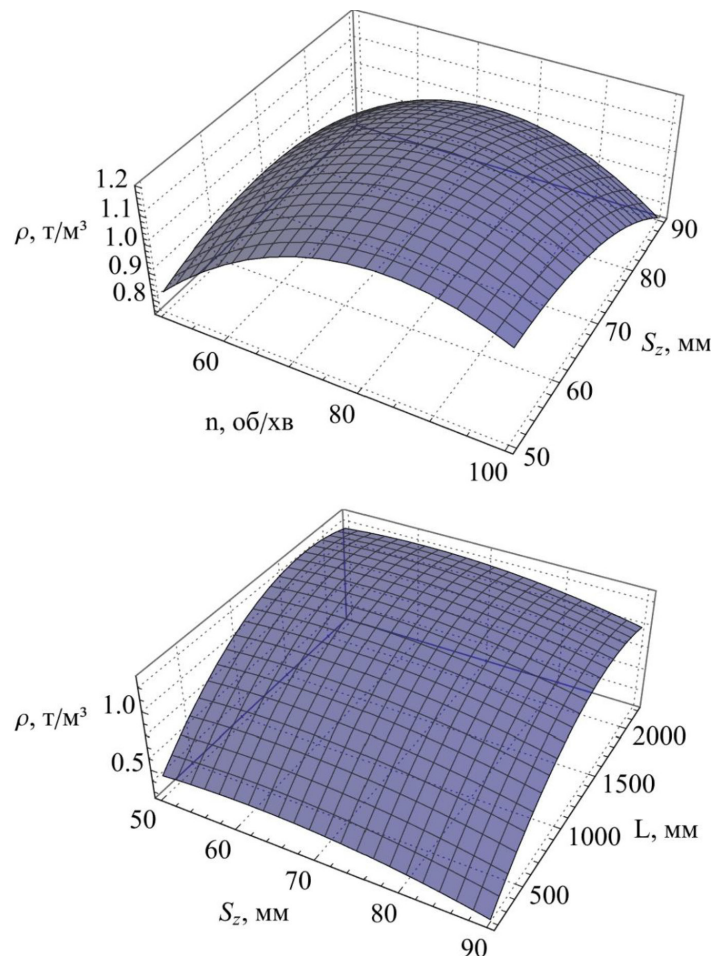
Збільшення  $L$  сприяє тривалішому перебуванню біомаси під тиском, що підвищує щільність. Проте надмірне збільшення довжини призводить до перевантаження преса і росту зворотного тиску, що відображено негативним коефіцієнтом при  $L^2$ . Зі збільшенням  $n$  інтенсивніше відбувається транспорт середовища та генерується більший тиск, проте після певної межі швидкість стає надмірною – ущільнення зменшується, а біомаса не встигає прогріватись та дегазуватись. Менший крок  $S_z$  забезпечує краще попереднє ущільнення і рівномірніше подавання до

пресуючої зони. Занадто великий крок зменшує тиск у початковій частині шнекового преса.

За допомогою аналізу поверхні відгуку встановлено граничні значення критерію:

$$\begin{aligned} \rho_{\min} = 0,0967734 \text{ т/м}^3 &\Rightarrow n = 50,0 \text{ об/хв}, \quad S_z = 90,0 \text{ мм}, \quad L = 200 \text{ мм}, \\ \rho_{\max} = 1,8607 \text{ т/м}^3 &\Rightarrow n = 80,8 \text{ об/хв}, \quad S_z = 59,4 \text{ мм}, \quad L = 1713 \text{ мм}. \end{aligned} \quad (4)$$

Зона найменш ефективної роботи преса, коли стискання біомаси є недостатнім, а тиск у каналі формування – мінімальний. Максимальна щільність відповідає режиму, коли: обертання шнеків досить інтенсивне для формування високого тиску; крок шнеку – середній, що забезпечує рівномірне попереднє ущільнення; довгий канал формування забезпечує тривале знаходження біомаси під тиском та видалення повітря і надлишкової вологи.



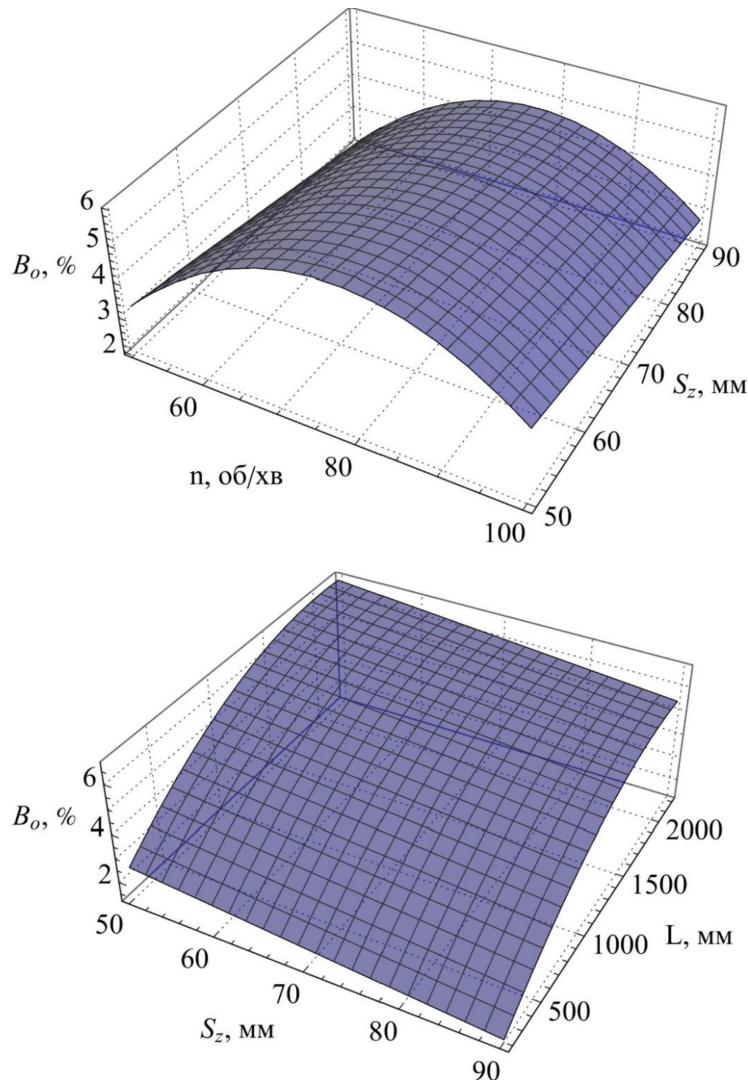
**Рис. 7. Залежність щільності брикету  $\rho$  від частоти обертання шнеків  $n$ , кроку завантажувального шнеку  $S_z$ , довжини пристрою остаточного формування  $L$**

У результаті обробки даних моделювання побудовано регресійні моделі другого порядку для всіх трьох критеріїв. Для кількості отриманої олії  $B_o$  модель має вигляд (рис. 8):

$$\begin{aligned} B_o = &-3,46479 + 0,00121889L - 3,558 \cdot 10^{-7}L^2 + 0,0609747n - \\ &- 0,000317667n^2 + 0,0418446S_z - 0,000162083nS_z - 0,000241875S_z^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Оптимізація рівняння показала, що мінімальна величина кількості олії становить:

$$\begin{aligned} B_{o_{\min}} = 0,012 \text{ т/м}^3 &\Rightarrow n = 50,0 \text{ об/хв}, \quad S_z = 90,0 \text{ мм}, \quad L = 200 \text{ мм}, \\ B_{o_{\max}} = 6,78597 \text{ т/м}^3 &\Rightarrow n = 77,1 \text{ об/хв}, \quad S_z = 50,0 \text{ мм}, \quad L = 2021 \text{ мм}. \end{aligned} \quad (6)$$



**Рис. 8. Залежність кількості отриманої олії  $B_o$  від частоти обертання шнеків  $n$ , кроку завантажувального шнеку  $S_z$ , довжини пристрою остаточного формування  $L$**

Максимальне значення ж досягається за умов високих обертів та максимальної довжини формувального каналу, що очікувано збільшує глибину фільтраційного виділення.

Поведінка моделі добре узгоджується з технологічною природою пресування: сильне ущільнення та довготривале утримання тиску – необхідні умови для прориву міжчасткового фільтраційного фронту. Додавання кроку шнека  $S_z$  у модель демонструє слабку участь цього параметра у формуванні олієвиділення, оскільки геометрія завантажувального шнека визначає лише первинні транспортні властивості, але не механічну роботу у зоні пресування.

Порівняння оптимальних точок для  $\rho$  та  $B_o$  показує, що максимальна щільність формується за дещо менших, ніж оптимальні для олієвиділення, значень довжини формувального пристрою. Це пояснюється різницею механізмів: для виділення олії важлива тривала дія тиску, тоді як для формування щільного брикету критичними є локальні піки тиску та інтенсивність зсуву у кінцевій зоні пресування. Тривале перебування матеріалу у каналі, навпаки, може спричинити термічну деградацію структури та появу мікротріщин, що зменшує щільність готового продукту.

Продуктивність  $Q$  має типову для шнекового обладнання поведінку: зростає зі збільшенням  $n$  і кроку  $S_z$ , але зменшується зі збільшенням  $L$ , оскільки надмірна довжина формувального каналу збільшує опір руху матеріалу та обмежує масовий витратний потік.



Отже, багатокритеріальна картина процесу у шнековому пресі має сідлоподібний характер: параметри, що збільшують продуктивність, не завжди максимізують щільність, а оптимальні умови для виділення олії передбачають певне зниження продуктивності через збільшення  $L$ . Компромісне налаштування повинно орієнтуватися на конкретну технологічну задачу – максимальний вихід палива, максимальна якість брикету або максимальний відбір олії.

Результати чисельного моделювання демонструють, що система реагує на зміну параметрів плавно, поверхні відгуку є гладкими, без різких розривів, а статистичні критерії підтверджують адекватність моделей. Це дозволяє розглядати отримані рівняння як придатний інструмент для подальшої оптимізації конструктивних і режимних параметрів шнекового преса, створення енергоефективних режимів та керування процесом у режимах компромісу « $Q$ – $\rho$ – $B_o$ ». Описані тенденції узгоджуються з фізичною природою деформації рослинної сировини, реологією пресування та механізмами фільтрації рідини у середовищах зі змінною щільністю пакування частинок.

**Висновки.** Методика чисельного моделювання виготовлення паливних брикетів у шнековому пресі, побудована на інтегрованому підході DEM–CFD у середовищі STAR–CCM+, дала змогу комплексно відтворити фізику процесу пресування багатофазної суміші та врахувати взаємодію твердих частинок рослинної сировини з рідкою фазою. Ретельне створення 3D-геометрії преса, побудова високоякісної CFD- та DEM-сіток, застосування моделей контактної взаємодії, когезії, турбулентності, пористості та обертального руху шнека забезпечили адекватне описання ключових явищ: ущільнення суміші, формування зони максимального тиску, інтенсивності переміщення матеріалу та процесу витиснення олії. Отримані поля тиску, щільності, швидкостей та розподілу рідини дозволили не лише оцінити роботу преса, а й розкрити внутрішні механізми формування брикету, що є основою для подальшої оптимізації конструктивно-технологічних параметрів шнекового обладнання та підвищення ефективності процесу брикетування.

У результаті обробки даних чисельного моделювання у середовищі Wolfram Cloud побудовано регресійні моделі другого порядку для продуктивності  $Q$ , щільності брикету  $\rho$  та кількості отриманої олії  $B_o$  від частоти обертання шнеків  $n$ , кроку завантажувального шнека  $S_z$ , довжини пристрою остаточного формування  $L$ . Аналіз коефіцієнтів та ANOVA показав високу статистичну значущість моделей і їхню адекватність даним чисельного моделювання. Для продуктивності визначальними факторами є частота обертання шнеків та крок завантажувального шнека, тоді як збільшення довжини формувального пристрою дещо знижує  $Q$ . Модель щільності підтверджує нелінійний характер ущільнення біомаси: максимальна  $\rho$  досягається за середніх значень  $S_z$ , підвищених  $n$  та збільшеній довжині  $L$ . Для виділення олії  $B_o$  найсильнішими впливовими параметрами є  $n$  та  $L$ , причому обидва чинники проявляють виразну квадратичну залежність. Порівняння критеріїв показує, що оптимальні умови для  $Q$ ,  $\rho$  та  $B_o$  не збігаються, а процес має сідлоподібний багатокритеріальний характер: параметри, що підвищують продуктивність, не завжди забезпечують максимальну щільність чи інтенсивне виділення олії.

#### Список використаних джерел

1. World Bioenergy Association. *Global bioenergy statistics report*: 12th edition. 2025. URL: <https://www.worldbioenergy.org/uploads/251118%20GBSR.pdf>
2. Bot B. V., Axaopoulos P. J., Sakellariou E. I., Sosso O. T. and Tamba J. G. Energetic and Economic Analysis of Biomass Briquettes Production from Agricultural Residues. *Applied Energy*, 321, Article 119430. 2022. DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.119430
3. Ning T., Zhang Y., Wang X. Application of Numerical Simulation Technology in the Biomass Densification and Molding Field: A Review. *BioResources*, 21(1). 2026. URL: <https://ojs.bioresources.com/index.php/BRJ/article/view/25031>

4. Bembenek M., Buczak M., Baiul K. Modelling of the Fine-Grained Materials Briquetting Process in a Roller Press with the Discrete Element Method. *Materials*, 2022. 15(14), 4901. DOI: 10.3390/ma15144901
5. Du H., Du H., Ma Y., Su H., Xuan C., Xue J. Research and Prediction of Wear Characteristics of Alfalfa Densification Die Based on the Discrete Element Method. *Agriculture*, 14(8), 2024. 1260. DOI: 10.3390/agriculture14081260
6. Adam R., Yiyang D., Kruggel-Emden H., Zeng T., Lenz V. Influence of pressure and retention time on briquette volume and raw density during biomass densification with an industrial stamp briquetting machine. *Renewable Energy*, 229, 2024. 120773. DOI: 10.1016/j.renene.2024.120773
7. Aal A. M. K. A., Ibrahim O. H. M., Al-Farga A., Saeidy E. a. E. Impact of Biomass Moisture Content on the Physical Properties of Briquettes Produced from Recycled Ficus nitida Pruning Residuals. *Sustainability*, 15(15), 2023. 11762. DOI: 10.3390/su151511762
8. Gao A., Dong Q., Sun W. Study on Flat Die Wear Characteristics in Flat Die Pelletizing with Different Material Ratios Based on DEM-FEM. *Agriculture*, 14(6), 2024. 894. DOI: 10.3390/agriculture14060894
9. Okpala I. F., Onyenanu I. U., Ezechukwu V. C., Iochonwu C. E. Performance optimization of a locally developed charcoal briquette machine using response surface methodology. *Scientific Journal of Engineering and Technology*, 2(1), 2025. 55–66. DOI: 10.69739/sjet.v2i1.486
10. Алієв Е. Б. Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва : підручник. Київ : Аграрна наука, 340 с. 2023. DOI: 10.31073/978-966-540-584-9
11. Malik M. A., Saini C. S., Yildiz F. Engineering properties of sunflower seed: Effect of dehulling and moisture content. *Cogent Food & Agriculture*, 2(1), 2016. Article 1145783. DOI: 10.1080/23311932.2016.1145783
12. Ali K. A. M., Zong W. Y., Yang L., El-Ghany H. M. A. Effect of Moisture Content on Sunflower Seed Physical and Mechanical Properties. In *International Journal of Engineering Research in Africa*, 2021. 57, 169–179. DOI: 10.4028/www.scientific.net/jera.57.169
13. Li Z., Xiang F., Huang X., Liang M., Ma S., Gafurov K., Gu F., Guo Q., Wang Q. Properties and Characterization of Sunflower Seeds from Different Varieties of Edible and Oil Sunflower Seeds. *Foods*, 13, Article 1188. 2024. DOI: 10.3390/foods13081188
14. Pawlicki L. T., Rostocki A. J., Tefelski D. B., Siegoczyński R. M., Ptasznik S. Mechanical properties of sunflower oil under pressure. *European Food Research and Technology*, 248(1), 2021. 283–287. DOI: 10.1007/s00217-021-03880-1
15. Guinda Á., Dobarganes M. C., Ruiz-Mendez M. V., Mancha M. Chemical and physical properties of a sunflower oil with high levels of oleic and palmitic acids. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 105(3–4), 2003. 130–137. DOI: 10.1002/ejlt.200390028
16. Кисельов О. В., Комарова І. Б., Мілько Д. О., Бакарджієв Р. О. Статистична обробка і оформлення результатів експериментальних досліджень (із досвіду написання дисертаційних робіт) : навчальний посібник. / За заг. ред. Д. О. Мілька. Інститут механізації тваринництва НААН. 2017. Запоріжжя : СТАТУС. 1181 с.

Дата першого надходження статті до видання: 29.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 26.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026

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



**V. Samokhval<sup>1</sup>, I. Bilous<sup>2</sup>**<sup>1</sup> *Dmytro Motornyi Tavria State Agrrotechnological University*<sup>2</sup> *Dnipro State Agrarian and Economic University***RESULTS OF NUMERICAL SIMULATION OF THE BRIQUETTING PRESSING PROCESS AND OIL EXTRACTION IN A SCREW PRESS*****Summary***

The article presents a comprehensive methodology for numerical modeling of the fuel briquette manufacturing process in a screw press based on an integrated DEM–CFD approach. The relevance of the study is driven by the need to improve the energy efficiency of biomass processing technologies and to refine the design and technological parameters of briquetting equipment. The modeling was performed in the STAR-CCM+ software environment, taking into account the interaction between solid particles of plant-based raw materials and the interparticle liquid phase, which made it possible to reproduce the real physics of compaction processes, pressure formation, and liquid extrusion. Based on a full-factorial numerical experiment of the 3<sup>3</sup> type, second-order regression models were developed for press productivity, density of the formed briquette, and the amount of expressed oil as functions of screw rotational speed, feeding screw pitch, and forming die length. The analysis revealed a nonlinear and multicriteria nature of the briquetting process, with the presence of trade-offs between productivity, briquette quality, and the intensity of liquid phase release. The obtained results confirm the adequacy of the applied DEM–CFD approach and can be used to optimize operating regimes and design parameters of screw presses in order to improve the efficiency of solid biofuel production.

**Keywords:** biomass, fuel briquettes, screw press, numerical modeling, DEM–CFD, productivity, briquette density, oil expression.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-22>

УДК 620.92:631.371

О. Г. Скляр<sup>1</sup>, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-0456-2479

Р. В. Скляр<sup>1</sup>, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-1547-5100

С. В. Сиротюк<sup>2</sup>, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-9966-6299

С. В. Коробка<sup>2</sup>, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-4717-509X

О. С. Пушка<sup>3</sup>, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-6481-8536

<sup>1</sup> Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного<sup>2</sup> Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького<sup>3</sup> Уманський національний університет

e-mail: radmila.skliar@tsatu.edu.ua

## АНАЛІЗ НАЙПОШИРЕНІШИХ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ У РОБОТІ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК

*Анотація.* У статті досліджено можливості впровадження енергозберігаючих технологій у біогазові установки, що переробляють органічні відходи аграрного сектору. Проаналізовано основні джерела енергетичних втрат та наведено практичні рішення, що здатні знизити власне енергоспоживання установок, зокрема системи рекуперації тепла, оптимізацію перемішування субстратів, покращення теплоізоляції, енергоефективні методи газоочищення та сучасні цифрові системи керування. Висвітлено практичні аспекти впровадження цих технологій і їх вплив на підвищення продуктивності, стабільності ферментаційних процесів і загальної рентабельності біогазових комплексів.

*Ключові слова:* біогаз, рекуперація, теплоізоляція, перемішування, дигестат, очищення, когенерація, субстрат.

*Постановка проблеми.* Біогазові установки, які посідають ключове місце у сучасній системі переробки органічних відходів агропромислового комплексу, водночас залишаються технологічно та енергетично вразливими об'єктами. Незважаючи на високий потенціал виробництва відновлюваної енергії, значна частина біогазових комплексів демонструє високий рівень власного енергоспоживання, що здебільшого сягає 20–30 % від виробленої електроенергії [1]. Такий дисбаланс суттєво знижує економічну ефективність, подовжує термін окупності проєктів, а інколи робить їх технологічно неефективними або навіть збитковими для аграрних підприємств.

Проблема ускладнюється тим, що більшість органічних субстратів тваринництва та птахівництва мають складні реологічні характеристики, високу вологість, схильність до піноутворення, нерівномірність складу та значний вміст інгібуючих компонентів. Це вимагає інтенсивного перемішування, стабілізації температури, корекції навантаження та застосування механізмів очищення біогазу – процесів, які споживають істотні обсяги енергоресурсів [2–5]. На практиці енергетичні втрати часто зумовлені також неефективною теплоізоляцією, відсутністю рекуперації тепла, використанням застарілого обладнання та недостатнім рівнем автоматизації й контролю [6].

В умовах зростання вартості енергоносіїв, посилення екологічних вимог та переходу до принципів циркулярної економіки проблема впровадження енергозберігаючих технологій у біогазові установки набуває стратегічного значення. Низька енергоефективність обмежує конкурентоспроможність біогазової галузі, стримує розвиток малих і середніх фермерських



станцій та знижує загальну результативність переробки органічних відходів [7]. Отже, актуальним є вивчення можливостей застосування сучасних енергозберігаючих технологій, їх практичне оцінювання з позиції експлуатаційного досвіду та формування рекомендацій щодо оптимізації роботи біогазових комплексів різного масштабу.

*Аналіз останніх досліджень.* Проблематика підвищення енергоефективності біогазових установок активно розглядається у світових наукових дослідженнях, особливо в контексті розвитку циркулярної економіки та декарбонізації сільського господарства. У фундаментальній роботі Weiland [8] підкреслено, що ефективність біогазових комплексів значною мірою визначається оптимізацією внутрішніх енергетичних потоків, зокрема перемішування, підігріву субстрату та очищення біогазу. Питання енергетичної політики та необхідності зниження власного енергоспоживання біогазових установок детально проаналізовано Budzianowski і Postawa [9], які наголошують, що енергоефективність є ключовою умовою життєздатності біоенергетичних проєктів у сучасних ринкових умовах.

Оцінку енергетичної продуктивності біогазових систем у повному життєвому циклі подано у роботах Berglund і Börjesson [10], де показано, що некоректна організація перемішування та теплового режиму може підвищувати витрати енергії на 20–35 %. Ґрунтовний техніко-науковий аналіз ефективності біогазових технологій наведено у звіті DBFZ [11], де особливо відзначено потенціал систем рекуперації тепла як одного з найрезультативніших інструментів зниження енергоспоживання ферментерів.

Дослідження Angelidaki і Sanders [12] акцентують увагу на впливі реологічних властивостей субстратів на енергетичні витрати, оскільки в'язкі органічні матеріали вимагають інтенсивнішого перемішування, що підвищує навантаження на електроприводи. Своєю чергою Scarlet, Dallemand і Fahl [13] відзначають значний прогрес у Європі щодо модернізації біогазових установок, зокрема завдяки впровадженню частотно-регульованих приводів, що забезпечують оптимізацію роботи мішалок і насосів.

Енергоефективні методи очищення та апгрейдингу біогазу отримали широке висвітлення в огляді T. Stanzin та співавт. [14], які доводять, що мембранні системи та біологічна десульфурізація демонструють найнижчі енергозатрати серед наявних технологій. Дослідження Zehnder та ін. [15] підкреслюють глобальні виклики анаеробної переробки, акцентуючи увагу на необхідності мінімізації енергоспоживання для забезпечення довгострокової стійкості біогазових проєктів.

У новітніх роботах Wageningen University & Research [16] розглянуто цифровізацію процесів ферментації, що відкриває можливість для впровадження адаптивного керування, прогнозування газопродуктивності та зниження енергетичних піків.

Українські наукові дослідження також наголошують на актуальності проблеми [17–21]. В них підкреслено, що низька енергоефективність національних біогазових станцій здебільшого пов'язана з недостатньою модернізацією обладнання, застарілими схемами перемішування та відсутністю сучасних систем контролю. Аналітичний огляд Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України підкреслює наявність значного резерву зменшення енергоспоживання через удосконалення теплоізоляції та впровадження систем рекуперації.

Узагальнення світового та вітчизняного досвіду свідчить, що сучасні енергозберігаючі технології – від рекуперації тепла до цифрового управління – мають високий потенціал для підвищення продуктивності біогазових установок. Проте більшість досліджень виходить з ідеальних або лабораторних умов, тоді як реальний виробничий контекст агропідприємств містить низку технічних та організаційних обмежень. Це зумовлює потребу у подальшому практичному вивченні енергоефективних технологій у реальних експлуатаційних умовах, що й визначає актуальність цієї статті.



*Формулювання мети статті.* Метою статті є комплексне дослідження можливостей підвищення енергоефективності біогазових установок шляхом упровадження сучасних енергозберігаючих технологій, а також оцінювання їхнього практичного впливу на роботу систем анаеробної переробки органічних відходів. Досягнення цієї мети передбачає аналіз технічних рішень, здатних зменшити власне енергоспоживання біогазових комплексів, підвищити стабільність ферментаційних процесів, оптимізувати баланс теплової та електричної енергії, а також обґрунтувати рекомендації щодо їх ефективного застосування з урахуванням реальних експлуатаційних умов аграрних підприємств.

*Основна частина. Рекуперація тепла.* Найбільш прямий і відчутний спосіб знизити енерговитрати – повертати тепло, що вже присутнє у системі: від відпрацьованого тепла двигунів когенераторів, від теплого дигестату, конденсату біогазу, теплої води системи охолодження. Типові рішення: пластинчаті або трубчасті теплообмінники для підігріву субстрату/підтримки температури ферментації; рекуперація теплоти генератора на 30–50 % від загальної потреби на підтримку мезофільного режиму. Необхідно насамперед проектувати контур рекуперації під час проектування БУ – «підтягнути» підігрів під наявні джерела тепла (двигун, вихлопні гази, дигестат). Важливо: теплообмінники повинні бути доступні для очищення. Часто помилка – закладати занадто малі гідравлічні запаси, через що рекуператор працює в неповному режимі. Кількісно: реальне економічне зниження витрат на підігрів за рахунок рекуперації – 25–45 % у середніх проектах; термін окупності на рівні 1–3 років у разі правильного розрахунку [20; 22].

*Теплоізоляція і мінімізація теплових втрат.* Облицювання ферментерів, газгольдерів, трубопроводів та резервуарів; ущільнення вузлів; контроль конвективних витоків – найменш дорогий захід. Часто недооцінюється, але дає швидкий ефект. Необхідно, по-перше, провести енергоаудит теплових втрат; по-друге, застосувати мінімум 200–300 мм якісного утеплювача для ферментера в холодних регіонах; по-третє, утеплити місця перетоку (під'їзди, люки). Кількісно: економія 10–30 % на опаленні реактора; дуже коротка окупність [23].

*Енергоефективне перемішування.* Перемішування – один із найбільших споживачів електроенергії в установках, особливо за високої в'язкості. Рішення: використання частотних перетворювачів (ЧП), періодичне/імпульсне перемішування замість безперервного, застосування енергоощадних конструкцій, гідравлічне перемішування і газліфт. На практиці найвигідніший шлях – перейти з постійного потоку на кероване перемішування з логікою: короткі потужні цикли + довгі паузи. Газліфт підходить для рідких субстратів, механічні мішалки – для більш густих [4]. Критична помилка – «перемішувати за інерцією»: багато проектів тримають мішалки постійно і витрачають від 0,5 до 1,0 кВт·год/м<sup>3</sup> реактора на добу зайвої енергії. Кількісно: економія від 15 % до 40 % залежно від початкової схеми; інвестиція у ЧП окупається за 6–24 місяці.

*Частотне (регульоване) електроприводне оснащення.* Використання ЧП для мішалок, насосів та транспортувального обладнання дає можливість зменшити споживання та пікові навантаження, а також зменшити механічний знос. Необхідно підключати через ЧП усю «рухому» групу: мішалки, шнеки, насоси подачі. Заощадження енергії залежить від профілю навантаження. Кількісно: економія 10–35 % на електроспоживанні рухомого обладнання.

*Попередня обробка та інтенсифікація.* Мета – підвищити біодоступність субстрату і скоротити час утримання (HRT) без надмірної витрати енергії. Методи: ферментні препарати (низька енергетика – висока біометрична віддача), кавітаційна обробка, механічне подрібнення, термохімічний гідроліз (енерговитратний), ультразвук (часто енергозатратний). На фермах краще почати з ферментів і механічного подрібнення до оптимальних розмірів часток (5–10 мм). Тепловий гідроліз дає великий приріст газу, але енергетично витратний і доцільний тільки у разі великого масштабу та доступу до дешевого джерела тепла [24]. Кавітація показала себе



як компроміс: дає ефект у разі помірних витрат, але потребує ретельного підбору обладнання. Кількісно: ферментативний підхід дає +10–30 % біогазу; термогідроліз – +20–60 % (але з великими енергозатратами).

*Оптимізація органічного навантаження і коферментація.* Збалансування C:N, поєднання «важкорозкладних» рослинних решток із високобілковими або жирними відходами підвищує вихід газу і стабілізує процес. Коферментація дозволяє уникнути піків інгібування (аміак, леткі жирні кислоти) і підвищує сукупну енергоефективність системи. Практично корисно мати базову «матрицю» субстратів і адаптивний рецепт подачі, що коригується залежно від аналізів (рН, аміак, леткі кислоти). Це знижує аварійні цикли і енергетичні втрати на «відновлення» реактора. Кількісно: стабілізація процесу дозволяє збільшити корисний час роботи установки і знизити енергетичні втрати на підтримання умов до 10–20 %.

*Енергоефективні когенераційні блоки (СНР) і оптимізація електричного навантаження.* Сучасні мотор-генераторні блоки з підвищеним ККД електродвигуна та оптимізацією камери згоряння працюють ефективніше і дають на 5–15 % більше корисної енергії. Оптимізація навантаження (уникання великих простоїв, регулювання під навантаження ферми) підвищує сумарну ефективність. Для малих станцій краще вибирати модульні когенерації із гнучким режимом; для великих – інвестувати в двигуни з високим ККД і системи рекуперації тепла [24; 25]. Важливо проводити регулярну сервісну діагностику двигуна та генератора для підтримки паспортних показників. Кількісно: підвищення електричного ККД установки на 5–12 % за правильного технічного обслуговування та оптимізації навантажень.

*Газова очистка і модернізація процесів апгрейдингу.* Очистка від  $H_2S$ ,  $CO_2$ , вологи та силосанів перед подачею у двигуни або мережу – критична. Мембранна сепарація та PSA системи енергоефективніші за криогенну, але потребують компресорів (енергія). Біологічна десульфурізація (біофільтри) може працювати з низькими витратами, але потребує контролю факторів (температура, рН,  $O_2$ ). Практична порада. Для когенерації й використання на місці оптимальний баланс – біофільтр + низькоенергетична мембранна доводка, тоді як для продажу біометану до мережі – багатоступінчасте мембранне/адсорбційне очищення. Важливо закладати енергетичний бюджет компресора і системи очищення під час економічних розрахунків. Кількісно: мембранне апгрейдинг-споживання 0,2–0,6 кВт·год/м<sup>3</sup> біометану; біофільтр – значно нижче, але залежить від швидкості газу і потреб у попередньому охолодженні.

*Сепарація дигестату і зменшення транспортувальних витрат.* Розділення рідкої та твердої фракцій дозволяє зменшити об'єм для транспортування, локально використовувати тверду фракцію як ґрунтоутворюючу або гранульовану, а рідку подавати на поля дрібними дозами. Це знижує енерговитрати на перекачування і транспортування. Впровадження простих декантерних центрифуг та пресувальних систем є дуже ефективним для великих ферм [24; 25]. Рекомендовано поєднувати сепарацію з локальним застосуванням добрив, щоб уникнути зайвих перевезень. Кількісно: скорочення транспортного навантаження до 40–70 % і відповідне зниження енерговитрат.

*Цифрові системи управління, моніторинг і аналітика (SCADA, ML).* Розумне управління дає змогу автоматично підтримувати оптимальні режими, прогнозувати деградацію обладнання й оптимізувати подачу субстратів. Сучасні системи дозволяють зменшити непланові простої, знизити час реакції на аварії та мінімізувати енергетичні втрати. Навіть базова система зі збором даних (температура, рН, споживання електроенергії по вузлах) уже дозволяє оптимізувати і досягати 5–15 % економії. Важливо навчити персонал інтерпретувати дані, а не просто збирати їх. Кількісно: загальне енергозбереження 5–20 % залежно від початкового рівня автоматизації.



Практичні пріоритети впровадження:

- 1) провести енергоаудит установки (швидкий вигляд: де втрачається тепло/електрика);
- 2) впровадити/покращити теплоізоляцію і герметизацію (низька вартість → швидкий ефект);
- 3) організувати рекуперацію тепла з когенератора/дигестату (великий потенціал економії);
- 4) модернізувати систему перемішування (ЧП + оптимальна логіка) – великий вплив на електроспоживання;
- 5) впровадити ферментативні препарати та оптимізувати рецепти коферментації (зростання виходу газу);
- 6) інтегрувати енергоефективні методи газоочищення (біофільтри + мембрани за необхідності);
- 7) розгорнути систему моніторингу й базову автоматизацію (SCADA) з аналітикою.

Типові помилки та перешкоди при цьому:

- проектування «під майбутню продуктивність» без тестової фази: багато систем переходять у стабільний режим лише після 6–12 місяців експлуатації;
- не регулярно проводити технічне обслуговування рекуператорів та теплообмінників → зниження ефективності через відкладення;
- надмірна інвестиція в енерговитратні передобробки (термогідроліз) без аналізу енергобалансу;
- відсутність плану локального використання тепла → втрата потенціалу рекуперації;
- недостатній контроль якості субстрату → часті «падіння» процесу та додаткові енергетичні витрати на відновлення.

*Практичні рекомендації.*

1. Найбільш перспективними заходами з точки зору витрат/ефекту є: теплоізоляція, рекуперація тепла, оптимізація перемішування з ЧП і базова автоматизація.
2. Попередня обробка субстратів має плануватись як низькоенергетичний шлях (ферменти, механічне подрібнення); енерговитратні методи (термо/кавітаційні) – тільки після ретельного енергетичного розрахунку.
3. Інвестування в енергоаудит та моніторинг: без точних даних оптимізацію провести неможливо.
4. Поєднання технологій: рекуперація тепла стає максимально ефективною в поєднанні з локальним використанням тепла (теплиці, сушильні установки), а мембранне очищення – з біофільтрами для мінімізації енергетичних витрат.
5. Робота з персоналом: інвестиція в навчання операторів та сервісне обслуговування часто дає кращий економічний ефект, ніж окремі технологічні оновлення.

*Висновки.* Проведене дослідження підтвердило, що енергоефективність є визначальним чинником продуктивності та економічної доцільності біогазових установок, а основні енергетичні втрати зумовлені нераціональним перемішуванням, низькою якістю теплоізоляції, застарілими системами очищення біогазу та відсутністю автоматизованого контролю. Найрезультативнішими технологіями зниження енергоспоживання є рекуперація тепла, використання частотно-регульованих приводів, оптимізовані режими перемішування, удосконалена теплоізоляція та енергоефективні методи газоочищення. Їх комплексне впровадження дозволяє скоротити власне енергоспоживання біогазових установок на 20–45 % і підвищити виробництво біогазу на 10–30 %. Практичний досвід експлуатації демонструє, що застосування цифрових систем моніторингу й керування забезпечує стабільність ферментації та мінімізує аварійні режими. Підвищення енергоефективності біогазових комплексів є стратегічним напрямом розвитку біоенергетики України та ЄС, оскільки підвищує рентабельність виробництва та зменшує залежність аграр-



ного сектору від традиційних енергоресурсів. Отримані результати можуть бути використані для модернізації діючих біогазових станцій та проектування нових вискоефективних енергетичних систем. Таким чином, енергоефективність слід розглядати не лише як технічний аспект, а як основу сталого розвитку системи переробки органічних відходів.

#### Список використаних джерел

1. Гелетуха Г. Г., Железна Т. А. Біоенергетика в Україні. *Матеріали для дебатів з питань енергозбереження*. Івано-Франківськ : Агентств. з розв. «Приватн. ініціативи», 2011. С. 18–23.
2. Ратушняк Г. С., Джеджула В. В. Інтенсифікація біоконверсії коливальним перемішуванням субстрату. Вінниця : УНІВЕРСУМ, 2008. 117 с.
3. Скляр Р. В. Аналіз методів визначення часу перебування та навантаження на метантенк. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка*. 2014. Вип. 148. С. 405–412.
4. Скляр Р. В., Скляр О. Г. Обґрунтування способу перемішування субстрату для експериментальної біогазової установки. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2020. Вип. 10, т. 1. URL: [http://elar.tsatu.edu.ua/bitstream/123456789/11287/1/06.80\\_2.pdf](http://elar.tsatu.edu.ua/bitstream/123456789/11287/1/06.80_2.pdf)
5. Скляр Р. В. Методи інтенсифікації процесів метанового зброджування. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2014. Вип. 4, т. 1. С. 3–9. URL: <http://nauka.tsatu.edu.ua/e-journals-tdatu/pdf4t1/3.pdf>
6. Акулов В. Д. Шляхи підвищення енергетичної ефективності біогазової установки. *Праці ТДАТУ : наукове фахове видання*. Запоріжжя : ТДАТУ, 2024. Вип. 24. Т. 2. С. 27–36. DOI: 10.32782/2078-0877-2024-24-2-3
7. Біотехнологія відходів тваринницьких підприємств : монографія / Захаренко М. О. та інш. Київ, 2015. 380 с.
8. Weiland P. Biogas production: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2010. Vol. 85(4). P. 849–860.
9. Budzianowski W. M., Postawa K. Renewable energy from biogas with reduced carbon footprint: Implications for policy and technology development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 54. P. 1032–1048.
10. Berglund M., Börjesson P. Assessment of energy performance in the life-cycle of biogas production. *Biomass and Bioenergy*. 2006. Vol. 30(3). P. 254–266.
11. Liebetrau J., et al. Biogas Production : Scientific and Technical Review. Leipzig : DBFZ (Deutsches Biomasseforschungszentrum), 2017. 128 p.
12. Angelidaki I., Sanders W. Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 2004. Vol. 3(2). P. 117–129.
13. Scarlat N., Dallemand J.-F., Fahl F. Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy*. 2018. Vol. 129. P. 457–472.
14. Stanzin T., et al. Evaluating the scientific contributions of biogas technology on rural development through scientometric analysis. *Environmental Technology & Innovation*. 2021. Vol. 24.
15. Zehnder A. J. B., et al. Modern anaerobic processes: Global needs and challenges. *Biotechnology Advances*. 2006. Vol. 24(3). P. 349–356.
16. Wageningen University & Research. Digitalization in Anaerobic Digestion Systems. Wageningen : WUR, 2020. 64 p.
17. Куріс Ю. В. Біоенергетичні установки. Обладнання та технології переробки органомісних енергоресурсів : підручник для наук., інжен.-техн. прац. та фахівців з альтерн. джерел енергії, навчальний посібник для студ. вищих навч. закл. Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 348 с.
18. Вербинський В. В., Земляний М. Г. Регіональна енергетична політика України та шляхи її реалізації. Дніпропетровськ, 2003. 64 с.
19. Скляр О. Г., Комар А. С. Теоретичні аспекти моделювання машинної технології утилізації органічних відходів. *Праці ТДАТУ : наукове фахове видання*. Запоріжжя : ТДАТУ, 2023. Вип. 23, т. 1. С. 104–114. DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-1-104-115
20. Комар А. С. Удосконалення конструкції біогазової установки з рекуперацією теплоти збродженої біомаси. *Праці ТДАТУ : наукове фахове видання*. Запоріжжя : ТДАТУ, 2024. Вип. 24. Т. 3. С. 62–70. DOI: 10.32782/2078-0877-2024-24-3-5



21. Комар А. С., Акулов В. Д. Технологічні аспекти оптимізації біогазових установок. *Науковий вісник ТДАТУ*. Запоріжжя, 2025. Вип. 15. Т. 1. С. 129–135. DOI: <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-25-1-15>
22. Болтянський Б. В. Аспекти вдосконалення технології виробництва біогазу. *Праці ТДАТУ* : наукове фахове видання. Запоріжжя : ТДАТУ, 2024. Вип. 24. Т. 1. С. 89–100. DOI: 10.32782/2078-0877-2024-24-1-6
23. Skliar A., Skliar R. Justification of conditions for research on a laboratory biogas plant. *MOTROL: Motoryzacja I Energetyka Rolnictwa*. Lublin, 2014. Vol.16. No. 2, b. Pp. 183–188.
24. Матеріали Біоенергетичної асоціації України. URL: <https://uabio.org/>
25. Перспективи використання біофільтрів у біогазових установках / О. Г. Скляр., Р. В. Скляр., Б. В. Болтянський., С. В. Сиротюк, С. В. Коробка. *Праці ТДАТУ. Технічні науки*. Запоріжжя : Видавничий дім «Гельветика». 2025. Вип. 25, т. 1. С. 45–53. DOI: 10.32782/2078-0877-2025-25-1-6

Дата першого надходження статті до видання: 28.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026

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



**O. Skliar<sup>1</sup>, R. Skliar<sup>1</sup>, S. Syrotyuk<sup>2</sup>, S. Korobka<sup>2</sup>, O. Pushka<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University

<sup>2</sup> Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies named after S. Z. Hzhyskyi

<sup>3</sup> Uman National University

## ANALYSIS OF THE MOST COMMON ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES IN THE OPERATION OF BIOGAS PLANTS

### Summary

This article examines the potential for implementing energy-saving technologies in biogas plants that process organic waste originating from the agricultural sector. The relevance of the study arises from the high share of internal energy consumption in many biogas facilities, which can reach 20–30 % of the electricity they produce, significantly diminishing their economic efficiency and overall performance. The paper provides an in-depth analysis of the most widely applied technological solutions aimed at reducing energy losses, including heat-recovery systems, advanced thermal insulation strategies, optimized substrate-mixing regimes using variable-frequency drives, low-energy gas purification methods, and digital monitoring and control systems. Special attention is given to practical aspects of their implementation from the perspective of an engineer with twenty years of hands-on experience in the operation and optimization of biogas plants. The study evaluates the contribution of each technology to improving the overall energy balance of anaerobic digestion systems, identifies common operational bottlenecks and challenges, and outlines typical errors that lead to excessive energy use or reduced biogas yield. Recommendations are proposed for optimizing fermentation processes, enhancing substrate preparation, stabilizing temperature regimes, and improving the utilization of recovered heat in agricultural enterprises. The findings indicate that a systematic and properly tailored approach to energy efficiency not only increases the productivity of biogas plants but also enhances process stability, reduces operational costs, and substantially improves the economic viability of organic waste management within a circular bioeconomy framework.

**Keywords:** biogas, recovery, thermal insulation, mixing, digestate, purification, cogeneration, substrate.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-23>

УДК 631.354.2

О. О. Шокарев, ст. викл.

ORCID: 0009-0008-5675-0376

М. М. Данченко, канд. техн. наук, доц.

ORCID: 0000-0001-7555-6511

І. В. Колокольчикова, д-р ек. наук, проф.

ORCID: 0000-0002-5692-0901

О. М. Шокарев, канд. техн. наук, доц.

ORCID: 0000-0001-8646-4524

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*

e-mail: alexandr.shokarev@gmail.com

## ФУНКЦІОНАЛЬНО-ВАРТІСНИЙ АНАЛІЗ ОБЧІСУВАЛЬНО-РІЗАЛЬНОГО МОДУЛЯ ЗЕРНОЗБИРАЛЬНОГО КОМБАЙНА

*Анотація.* До нових технологій комбайнового збирання зернових культур відноситься і метод обчисування рослин на корені. Однак основним стримуючим фактором широкого впровадження у виробництво нової зернозбиральної техніки залишається проблема зниження втрат врожаю при очесу та збиранні зерна з одночасним збиранням обчесаного на корені стеблом.

Процес обчисування колосків з мінімальними втратами зерна потребує на першому етапі досліджень проведення функціонально-вартісного аналізу. Дослідження процесу збирання незернової частини врожаю також починаємо з проведення функціонально-вартісного аналізу.

Наведено загальну методіку проведення функціонально-вартісного аналізу, який дозволив виявити не досконалі зони обчисувального модуля зернозбирального комбайну. Недосконалими є функції обчисування на корені та зрізання обчесаних стебел, а також транспортування стеблин в зону формування валка. На підставі результатів функціонально-вартісного аналізу запропоновані напрямки досліджень з метою підвищення ефективності роботи всього зернозбирального комбайну обчисувального типу. Це і обґрунтування конструктивних параметрів обчисувальних граблин і об'єднання двох функцій обчисувального модуля, таких як функції обчисування на корені та транспортування вороху до шнеку. Що стосується різального пристрою, так це об'єднання функцій очищення зони зрізання, переорієнтації стеблин, укладання стеблин на транспортер, при цьому слід обґрунтувати робочі органи пристрою, який виконує вказані функції, а також вдосконалення функцій транспортування стеблин в зону формування валка так і самого формування валка.

*Ключові слова:* обчисування рослин на корені; функціонально-вартісний аналіз; обчисувальний модуль; різальний пристрій.

*Постановка проблеми.* Найактуальнішими проблемами під час збирання врожаю є підвищення економічної ефективності комбайнового парку. А це і збільшення продуктивності, і зменшення втрат зерна під час проведення збиральних робіт. Водночас необхідно зменшувати енерго- і металоємність технологічного процесу збирання зернових культур.

Одним із напрямів вирішення наявної проблеми є підвищення пропускної здатності комбайнів. Це може бути досягнуто завдяки оснащенню їх модулями обчисувального типу.

Особливість цього способу полягає у тому, що обчисувальний пристрій, що прикріплений до комбайна замість жниварки, виконує обмолот зернових культур на корені з наступним збором та доопрацюванням обчесаного вороху у комбайні. Незернова частина врожаю (обчесані стеблини) у молотильно-сепаруючій пристрій комбайна не потрапляють, у результаті чого досягається істотне підвищення пропускної здатності комбайна [1; 4].

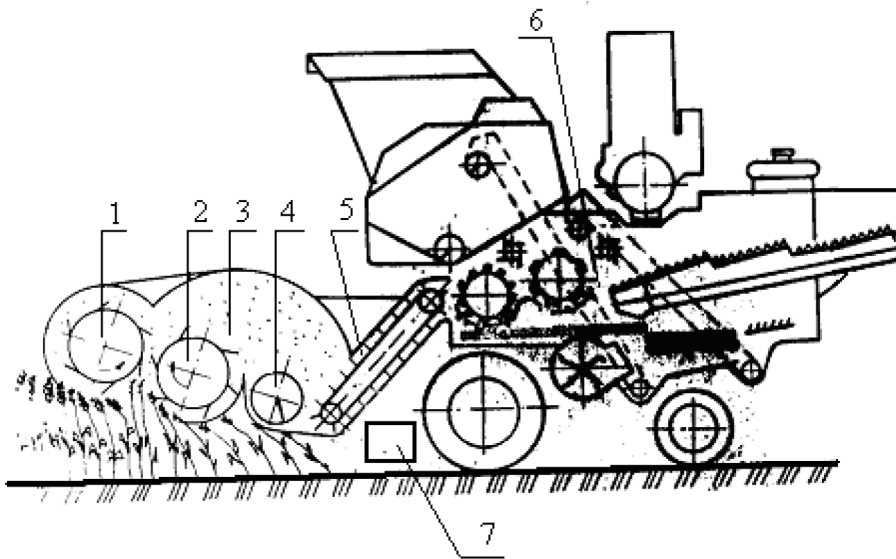
Переваги цього способу перед традиційним прямим комбайнуванням полягають у такому: підвищення продуктивності збирання зернових культур; зменшення втрат зерна та його трав-

мування; зменшення енергоємності комбайна; скорочення строків збирання та звільнення поля під врожай майбутнього року.

Однак проблема полягає в тому, що процес обчісування колосків з мінімальними втратами зерна, як і процес збирання незернової частини врожаю (обчесаних стеблин), не досить досліджено, а конструкція робочих органів потребує додаткових обстежень і обґрунтувань [2; 3].

*Аналіз останніх досліджень.* Обчісувальний пристрій за технологічними вимогами повинен забезпечити виконання таких функцій, як підвід стебел у зону обчісу, обчісування рослин на корені, транспортування вороху до шнеку, транспортування вороху до похилої камери. Наведені функції можуть виконувати як двобарабанні обчісувальні пристрої (рис. 1), так і однобарабанні пристрої (рис. 2).

Однак процес обчісування колосків з мінімальними втратами зерна не досить надійний і потребує на першому етапі досліджень проведення функціонально-вартісного аналізу.



**Рис. 1.** Технологічна схема зернозбирального комбайна обчісувального типу:  
1 – перший (передній) барабан; 2 – другий (задній) барабан; 3 – камера обчісування; 4 – шнек;  
5 – похила камера; 6 – молотильно-сепаруючий пристрій; 7 – різальний пристрій



**Рис. 2.** Обчісувальний пристрій конструкції УкрНІМЕСГ

Проблема збирання незернової частини врожаю у загальній технологічній схемі комбайнового збирання зернових культур методом обчісування рослин на корені зумовлена, з одного боку, обмеженим простором для здійснення технологічних операцій зрізання обчесаних стеблин, транспортування їх із зони різання та укладання у валок (невеликий виніс устаткування стосовно рушіїв комбайна, особливості конфігурації і розміри похилої площини), а з іншого боку, несприйнятною орієнтацією стеблин у зоні роботи різального устаткування (обчесані стеблини відхилені обчісувальним пристроєм вперед по ходу руху комбайна на кут  $30...50^\circ$  до горизонту) (рис. 3).

І вирішення цієї проблеми теж потребує застосування нових, нестандартних рішень, заснованих на функціональному підході [3]. І тому дослідження процесу збирання незернової частини врожаю також починаємо з проведення функціонально-вартісного аналізу.

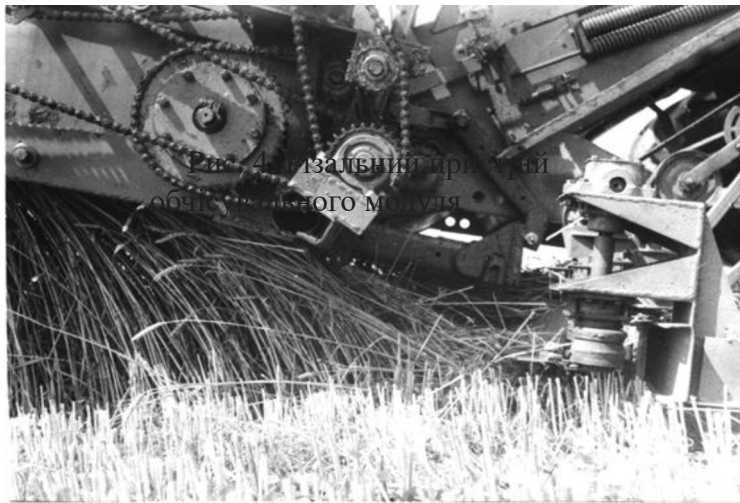


Рис. 3. Умови роботи різального пристрою в обчісувальному модулі



Рис. 4. Різальний пристрій обчісувального модуля

*Постановка завдання.* Ця стаття присвячена підвищенню надійності обчісувального модуля за рахунок дослідження систем у разі функціонально-вартісного аналізу (ФВА) і спирається на функціональний підхід, за якого система розглядається як сукупність функцій, що нею виконуються, і ведеться пошук кращого принципу реалізації цих функцій.

ФВА базується на системному дослідженні структури функцій об'єкта, співставленні їх корисності та вартості реалізації.



*Основна частина.* Специфічною процедурою ФВА є побудова функціонально-вартісних діаграм (ФВД), які є графічним зображенням співвідношення між значущістю (роллю) функцій і затратами на їх реалізацію. Побудова ФВД здійснюється з метою виявлення невідповідності затрат у відношенні до корисності функції.

ФВД будуються для групи функцій, що мають спільну вершину. В першому квадранті зображується корисність або значущість функцій, у другому – відносні затрати на функції.

В оцінці корисних функцій використовуємо метод розставлення пріоритетів. У разі попарного порівняння функцій у відповідних комірках матриці проставляють коефіцієнти переваг. Якщо функція в  $i$ -й стрічці має перевагу над функцією в  $j$ -у стовпчику, то коефіцієнт приймають рівним 1,5, за їх однакової значущості – 1,0, а за меншої – 0,5.

Коефіцієнти значущості  $\lambda_i$  і функції визначають за формулою:

$$\lambda_i = P_{ij} / \sum_{i=1}^n P_{ij}, \quad (1)$$

де  $P_{ij}$  – визначається як сума добутків кожного елементу  $i$ -ї стрічки на елементи вектор-стовпчика  $\sum k_{ij}$ , тобто

$$P_{ij} = \overline{k_{ij}} \cdot \left[ \sum k_i \right] \downarrow, \quad (2)$$

$$P_{1j} = 1,0 \cdot 5,5 + 0,5 \cdot 7,0 + 1,5 \cdot 5,0 + 1,5 \cdot 3,5 + 1,0 \cdot 4 = 25,75$$

$$P_{2j} = 1,5 \cdot 5,5 + 1,0 \cdot 7,0 + 1,5 \cdot 5,0 + 1,5 \cdot 3,5 + 1,5 \cdot 4 = 34$$

Витрати у разі ФВА виступають як плата за корисність і можуть бути виражені в грошових або енергетичних одиницях. Узагальнений критерій витрат враховує затрати на всіх етапах життєвого циклу системи (проектування, виготовлення, використання, ліквідація та утилізація).

Стосовно сфери машиновикористання і рослинництва основне значення для прийняття раціональних рішень мають переважно експлуатаційні витрати. Вони інколи можуть бути в десятки разів більшими від вартості технічних засобів. Наприклад, експлуатаційні витрати за весь строк служби можуть перевищувати їх балансову вартість більше ніж 30 разів.

Дані розрахунків заносимо до таблиці 1.

Таблиця 1

Матриця пріоритетів функцій

№ функції	Назва функції	Коефіцієнт переваг, $k_i$					$\sum_{j=1}^{j=5} k_i$	$P_{ij}$	$\lambda_i$	ранг
		1	2	3	4	5				
Ф1	Підвід стебел у зону обчїсу	1,0	0,5	1,5	1,5	1,0	5,5	25,75	0,219	2
Ф2	Обчїсування на коренї	1,5	1,0	1,5	1,5	1,5	7,0	34,00	0,289	1
Ф3	Транспортування вороху до шнеку	0,5	0,5	1,0	1,5	1,5	5,0	22,50	0,191	3
Ф4	Транспортування вороху до похилої камери	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	3,5	16,25	0,138	5
Ф5	Зрїзання обчїсаних стебел	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	4,0	19,00	0,162	4
	Всього:	–	–	–	–	–	–	117,5	1,000	–

Експлуатаційні витрати на проведення технологїчних операцій можуть бути визначенї як прямї або приведенї витрати коштів:

$$S_{\Pi} = S_A + S_{TO} + S_M + S_3 + S_D, \quad (3)$$

де  $S_{\Pi}$  – прямї витрати коштів на проведення операцій;

$S_A$  – амортизаційнї вїдрахування по всїх технїчних засобах, що задїянї на операції;

$S_{TO}$  – витрати на технїчне обслуговування і ремонт технїчних засобів;



$S_M$  – вартість ресурсів, що використані на операцію;  
 $S_3$  – заробітна плата виробничого персоналу;  
 $S_D$  – додаткові витрати коштів.

Приведені витрати ( $S_{Pr}$ ) визначаються за формулою:

$$S_{Pr} = S_{II} + K \cdot e, \quad (4)$$

де  $K$  – величина капіталовкладень;  
 $e$  – коефіцієнт ефективності капіталовкладень.

Під час побудови ФВД корисність і витрати бажано виражати в однакових одиницях: грошових або відносних.

Відносні (нормовані) значення корисності функцій і затрат на їх реалізацію у безрозмірному вигляді визначаються за формулами:

$$q_{\phi i} = \frac{Q_{\phi i} \cdot \lambda_i}{\sum_i^n Q_{\phi i} \cdot \lambda_i}, \quad (5)$$

$$s_{\phi i} = S_{\phi i} / S_0, \quad (6)$$

де  $q_{\phi i}$ ,  $Q_{\phi i}$  – відповідно відносне і абсолютне значення корисності  $i$ -ї функції;

$\lambda_i$  – коефіцієнт значущості (ваговий коефіцієнт)  $i$ -ї функції;

$s_{\phi i}$ ,  $S_{\phi i}$  – відповідно відносні та абсолютні затрати на  $i$ -ту функцію;

$S_0$  – загальні затрати на функцію, що є спільною вершиною для  $i$ -х функцій нижчого рівня ієрархії.

В оцінці долі витрат на реалізацію функцій використовуємо метод розставлення пріоритетів.

Дані розрахунків заносимо до таблиці 2 і будуємо діаграму (рис. 5).

Таблиця 2

Матриця долі витрат на реалізацію функції

№ функції	Назва функції	Коефіцієнт переваг, $k_i$					$\sum_{j=1}^{j=5} k_i$	$P_{ij}$	$S_i$	ранг
		1	2	3	4	5				
Ф1	Підвід стебел у зону обчісу	1,0	0,5	1,0	1,5	0,5	4,5	20,25	0,175	3
Ф2	Обчісування на корені	1,5	1,0	1,5	1,5	1,5	7,0	34,00	0,293	1
Ф3	Транспортування вороху до шнеку	1,0	0,5	1,0	1,0	0,5	4,0	18,50	0,158	4
Ф4	Транспортування вороху до похилої камери	0,5	0,5	1,0	1,0	0,5	3,5	16,25	0,138	5
Ф5	Зрізання обчесаних стебел	1,5	0,5	1,5	1,5	1,0	6,0	27,50	0,236	2
	Всього:	–	–	–	–	–	–	116,5	1,000	–

Співставлення витрат на одиницю корисності (значущості) дозволяє виявити недосконалі зони різального пристрою. Такими вважаються функції, для яких  $S_i/\lambda_i > 1$ . Серед усіх функцій ( $\Phi 1 = 0,80$ ;  $\Phi 2 = 1,01$ ;  $\Phi 3 = 0,83$ ;  $\Phi 4 = 1,00$ ;  $\Phi 5 = 1,46$ ) недосконалими є функції обчісування на корені та зрізання обчесаних стебел.

Стосовно функції обчісування на корені для вдосконалення треба у разі завданої величини критерію корисності мінімізувати сукупні витрати. Цього можна досягнути за рахунок зниження втрат зерна та зменшення металоємності пристрою, зменшивши габарити конструкції. Зниження втрат зерна можна досягнути за рахунок обґрунтування конструктивних параметрів обчісувальних граблин, які дозволять не тільки зменшити втрати зерна, а і об'єднати дві функції обчісувального модуля, це функції обчісування на корені та транспортування вороху до шнеку. Об'єднання цих функцій, своєю чергою, дозволяє збільшити корисність (вдосконалість) зони обчісування на корені.

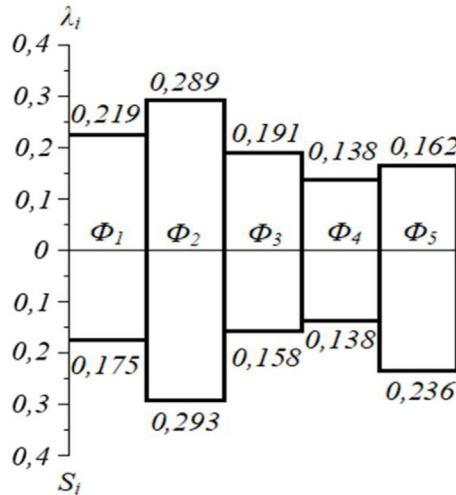


Рис. 5. Функціонально-вартісна діаграма аналізу обчисувального модуля

Для вдосконалення функції зрізання обчесаних стебел необхідно провести додаткові дослідження, які починаються з функціонально-вартісного аналізу різального пристрою зернозбирального комбайну обчисувального типу.

Насамперед необхідно визначитись з функціями, які повинен виконувати різальний пристрій в умовах, несприятливих для нормальної роботи відомих типів різальних апаратів. Для надійної роботи пристрій повинен переорієнтувати і подати обчесані стебла до різального апарату, при цьому постійно очищати зону різання, забезпечивши зрізання обчесаних стебел. У разі переорієнтації стебел необхідно не тільки забезпечити їх зрізання, але і укладання зрізаних стебел на транспортер. Різальний пристрій також повинен транспортувати стеблини до місця формування валка і здійснювати саме формування валка.

Дані розрахунків заносимо до таблиць 3 і 4 та будемо діаграму (рис. 6).

Таблиця 3

Матриця пріоритетів функцій

№ функції	Назва функції	Коефіцієнт переваг, $k_i$						$\sum_{j=1}^{j=5} k_i$	$P_{ij}$	$\lambda_i$	ранг
		1	2	3	4	5	6				
Ф1	Зрізання обчесаних стебел	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	8,5	49,00	0,247	1
Ф2	Очищення зони зрізання	0,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	6,5	36,00	0,182	2
Ф3	Переорієнтація стебел	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,5	5,5	30,00	0,151	4
Ф4	Укладання стебел на транспортер	0,5	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	5,0	28,00	0,141	5
Ф5	Транспортування стебел у зону формування валка	0,5	1,0	0,5	1,5	1,0	1,5	6,0	33,00	0,166	3
Ф6	Формування валка	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0	4,0	22,25	0,113	6
	Всього:	–	–	–	–	–	–	–	198,25	1,000	–

Визначаємо недосконалі функції. В нашому випадку це будуть функції Ф1 (зрізання обчесаних стебел); Ф5 (транспортування стебел у зону формування валка):  $\Phi 1 = 1,01$ ;  $\Phi 2 = 0,90$ ;  $\Phi 3 = 0,98$ ;  $\Phi 4 = 0,90$ ;  $\Phi 5 = 1,1$ ;  $\Phi 6 = 1,00$ .

Тому для першої функції (зрізання обчесаних стебел) треба у разі заданої величини критерію корисності мінімізувати сукупні витрати.

Другу функцію об'єднати з третьою і четвертою, які є вдосконаленими.

Таблиця 4

Матриця долі витрат на реалізацію функції

№ функції	Назва функції	Коефіцієнт переваг, $k_i$						$\sum_{j=1}^{j=5} k_i$	$P_{ij}$	$S_i$	ранг
		1	2	3	4	5	6				
Ф1	Зрізання обчесаних стеблин	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	8,5	49,00	0,249	1
Ф2	Очищення зони зрізання	0,5	1,0	1,5	1,0	0,5	1,5	6,0	32,50	0,165	3
Ф3	Переорієнтація стеблин	0,5	0,5	1,0	1,5	0,5	1,5	5,5	29,00	0,148	4
Ф4	Укладання стеблин на транспортер	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	4,5	25,00	0,127	5
Ф5	Транспортування стеблин у зону формування валка	0,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	7,0	39,00	0,198	2
Ф6	Формування валка	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0	4,0	22,00	0,113	6
Всього:		-	-	-	-	-	-	-	196,5	1,000	-

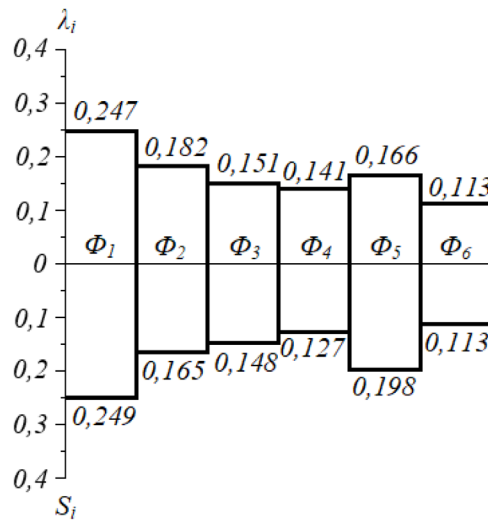


Рис. 6. Функціонально-вартісна діаграма аналізу різального пристрою

Функцію п'яту об'єднати з шостою і одночасно підвищити корисність функції і знизити сукупні витрати, тому що функція транспортування стеблин у зону формування валка є найбільш недосконалою функцією.

*Висновки.* Функціонально-вартісний аналіз, який проводився як для всього обчисувального модуля, так і окремо для різального пристрою, дозволив виявити недосконалі функції цього модуля зернозбирального комбайну. Недосконалими є функції обчисування на корені та зрізання обчесаних стебел, а також транспортування стеблин у зону формування валка.

На підставі результатів функціонально-вартісного аналізу запропоновані напрями досліджень з метою підвищення ефективності роботи всього зернозбирального комбайну обчисувального типу. Це і обґрунтування конструктивних параметрів обчисувальних граблин і об'єднання двох функцій обчисувального модуля, таких як функції обчисування на корені та транспортування вороху до шнеку.

Що стосується різального пристрою, так це об'єднання функцій очищення зони зрізання, переорієнтації стеблин, укладання стеблин на транспортер, при цьому слід обґрунтувати робочі органи пристрою, який виконує вказані функції. Також функціонально-вартісний аналіз дозволив встановити шляхи вдосконалення функцій як транспортування стеблин у зону формування валка, так і самого формування валка. Для цього необхідно провести дослідження з метою обґрунтування параметрів транспортуючого механізму, який дозволить підвищити якість його роботи та формувати валок з параметрами, необхідними для використання сучасної сільськогосподарської техніки.

**Список використаних джерел**

1. Данченко М. М., Шокарев О. М. Экономическая эффективность от внедрения в производство комбайна очесывающего типа. *Праці Таврійської державної агротехнічної академії*. Вип. 1. Т. 15. Мелітополь : ТДАТА, 2000.
2. Шокарев О. М., Данченко М. М. Технічні вимоги до різального пристрою рисозбирального комбайна очисувального типу та його польові дослідження. *Праці Таврійської державної агротехнічної академії*. Вип. 1. Т. 18. Мелітополь : ТДАТА, 2001.
3. Шокарев О. М. Збирання незернової частини врожаю комбайном очисувального типу. *Праці Таврійської державної агротехнічної академії*. Вип. 1. Т. 22. Мелітополь : ТДАТА, 2001.
4. А. С. 1601971 СССР. Режущее устройство сельскохозяйственных машин. / Шокарев А. Н. и др. *Б.И.* 1990. № 20.
5. А.С 1165278 СССР, Устройство для обмолота сельскохозяйственных культур на корню. / Голубев И. К., Гончаров Б. И. *Б.И.* 1985. № 25.
6. Sheheda K., Shokarev O., Kiurchev S., Danchenko M., Mykhailova L. Results of research of combine harvester cutterbar. *Engineering for Rural Development*. Vol. 20. 2021. P. 1632–1637. DOI: 10.22616/ERDev.2021.20.TF350
7. 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
8. Шегеда 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.
9. Шегеда 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.
10. Шегеда К. О., Шокарев О. М., Шегеда А. В. Критеріальний підхід до проблеми ефективності збирання незернової частини врожаю. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. Вип. 2. Т. 3. Мелітополь : ТДАТУ, 2012.
11. Різальний апарат сільськогосподарської збиральної машини. Патент України на корисну модель № 157103, опубл. 11.09.2024, бюл. № 37/2024 / Шокарев О. О., Шегеда К. О., Шокарев О. М., Кюрчев С. В., Шегеда А. В.
12. Ріжучий пристрій з активним валкоутворювачем. Патент України на корисну модель № 157108, опубл. 11.09.2024, бюл. № 37/2024 / Шокарев О. О., Шегеда К. О., Шокарев О. М., Кюрчев С. В., Данченко М. М.
13. Ріжучий пристрій сільськогосподарських машин. Патент України на корисну модель № 157088, опубл. 11.09.2024, бюл. № 37/2024 / Шокарев О. О., Шегеда К. О., Шокарев О. М., Кюрчев С. В.
14. Ріжучий пристрій сільськогосподарської збиральної машини. Патент України на корисну модель № 157084, опубл. 11.09.2024, бюл. № 37/2024 / Шокарев О. О., Шегеда К. О., Шокарев О. М., Кюрчев С. В., Шегеда А. В.

Дата першого надходження статті до видання: 28.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 26.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026

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





**O. Shokarev, M. Danchenko, I. Kolokolchykova, O. Shokarev**

*Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University*

## **FUNCTIONAL-COST ANALYSIS OF THE STRIPPER-CUTTING MODULE OF A GRAIN COMBINE HARVESTER**

### *Summary*

The method of stripping standing crops is among the new technologies for combine harvesting of grain. However, the main constraining factor for the wide implementation of new grain harvesting machinery remains the problem of reducing crop losses during stripping and grain harvesting, while simultaneously harvesting the stripped standing stems.

The process of stripping ears with minimal grain losses requires conducting a functional-cost analysis at the first stage of research. The research on the process of harvesting the non-grain part of the crop also begins with conducting a functional-cost analysis.

The paper presents a general methodology for conducting a functional-cost analysis, which allowed for the identification of imperfect zones in the stripper module of the grain combine harvester. The functions of stripping standing crops and cutting stripped stems, as well as transporting stems to the windrow formation zone, were found to be imperfect.

Based on the results of the functional-cost analysis, research directions are proposed to increase the efficiency of the entire stripper-type grain combine harvester. These include the substantiation of the design parameters of stripping fingers and the combination of two functions of the stripper module: the function of stripping standing crops and the function of transporting the heap to the auger.

Regarding the cutting device, this involves combining the functions of cleaning the cutting zone, reorienting the stems, and laying the stems onto the conveyor. In this context, it is necessary to substantiate the working bodies of the device performing these functions, as well as to improve the functions of transporting stems to the windrow formation zone and the windrow formation process itself.

**Keywords:** standing crop stripping, functional-cost analysis, stripper module, cutting device.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-24>

УДК 629.7.023.2:658.5

Ю. Б. Юніс, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-5693-6954

*Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»*

e-mail: docbasheer01@gmail.com

## **ФІНАНСОВА ДОЦІЛЬНІСТЬ, ЕКОЛОГІЧНИЙ ВПЛИВ ТА ВИБІР ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ВОЛОКНИСТО-АРМОВАНИХ АЕРОКОСМІЧНИХ КОНСТРУКЦІЙ**

*Анотація.* Незважаючи на добре задокументовані структурні переваги армованих волокном полімерних композитів в аерокосмічній галузі, їх фінансові та екологічні характеристики нині привертають дедалі більшу увагу авіакомпаній, регуляторів і ринків капіталу. У статті досліджуються конструкції з ВПВУ (вуглецево-волокнистого полімерного з'єднувача) та СВВУ (скловолокнистого полімерного з'єднувача) за трьома взаємопов'язаними напрямками: загальна вартість життєвого циклу, екологічне навантаження та ефективність виробничого процесу. Порівняльний аналіз витрат за 20-річним операційним горизонтом демонструє, що підвищені початкові витрати на ВПВУ – на закупівлю матеріалів і виробництво – повністю відшкодовуються завдяки економії палива внаслідок зменшення структурної маси, як правило, впродовж двох–п'яти років авіаексплуатації. З екологічного боку виробництво ВПВУ несе значне вбудоване енергетичне навантаження (близько 2 800 МДж на компонент), яке компенсується через дев'ять років служби. Неможливість утилізації вуглецевого волокна з термореактивних конструкцій ВПВУ наприкінці строку служби визначена як ключова невирішена проблема сталого розвитку. Структурована оцінка трьох виробничих процесів – ручного укладання, автоматичного укладання волокна (АУВ) та трансферного формування смоли (ТФС) – за шістьма критеріями надає практичні рекомендації щодо вибору процесу залежно від обсягу виробництва та геометричної складності.

*Ключові слова:* аналіз вартості життєвого циклу, екологічна оцінка ВПВУ, вуглецевий слід, автоматичне укладання волокна, трансферне формування смоли, багатоцільова оптимізація, утилізація наприкінці строку служби, аерокосмічні композити.

*Постановка проблеми.* Протягом більшої частини історії комерційної авіації основним обґрунтуванням застосування композиційних матеріалів у первинній конструкції літаків слугував єдиний критерій – структурні характеристики на одиницю маси. Аерокосмічна промисловість завжди прагнула до зменшення маси конструкцій, оскільки кожен заощаджений кілограм безпосередньо скорочує витрату палива протягом сотень тисяч льотних годин. Проте комерційне та регуляторне середовище, в якому нині проектуються, виготовляються і експлуатуються літаки, суттєво ускладнилося.

Авіакомпанії стикаються з волатильністю цін на паливо, розширенням систем вуглецевого ціноутворення та посиленою увагою зацікавлених сторін до сукупного екологічного впливу їхнього флоту. Виробники оригінального обладнання зазнають тиску з боку таких механізмів, як CORSIA та Європейський зелений курс, щодо необхідності підтверджувати скорочення викидів вуглецю протягом усього життєвого циклу, а не лише операційні показники витрати палива. Таким чином, обґрунтування будь-якого застосування конструкційних композитів більше не може спиратися виключно на показники економії маси: воно вимагає суворого повноланцюгового аналізу, що охоплює фінансові витрати, вбудовану енергію та долю матеріалів після закінчення строку служби – від першого виробництва волокна до остаточної утилізації.

*Аналіз останніх досліджень.* Питання повного оцінювання вартості життєвого циклу композиційних матеріалів у аерокосмічній галузі розглядалися в низці фундаментальних публікацій.



Y. S. Song, J. R. Youn та T. G. Gutowski [2] провели детальний аналіз енергії життєвого циклу армованих волокном композитів, встановивши базові показники для порівняння з металевими альтернативами. M. K. Hagnell та M. Åkermo [3] дослідили економічну ефективність і масову ефективність композитних та алюмінієвих конструкцій, показавши, що довгостроковий підхід змінює початкові висновки про перевагу металів. Проблематику переробки вуглецевих волокон у конструкційних застосуваннях системно висвітлено в роботах S. Pimenta та S. T. Pinho [1], а також R. A. Witik зі співавторами [5], які описали технологічні обмеження методів піролізу та сольволізу. S. Das [6] здійснив комплексну оцінку життєвого циклу полімерних композитів, армованих вуглецевим волокном. Стратегічний контекст сталого розвитку окреслено в «Плані дій щодо циркулярної економіки» Європейської комісії [7] та методологічному звіті ATI FlyZero [8]. R. E. Murray зі співавторами [10] дослідили можливості низьковитратного вуглецевого волокна з біомаси. Попри значну кількість досліджень з окремих аспектів, інтегрований підхід, що одночасно охоплює фінансовий, екологічний і технологічний виміри з використанням багатоцільової оптимізації, залишається не досить розробленим у науковій літературі, що й зумовлює актуальність цього дослідження.

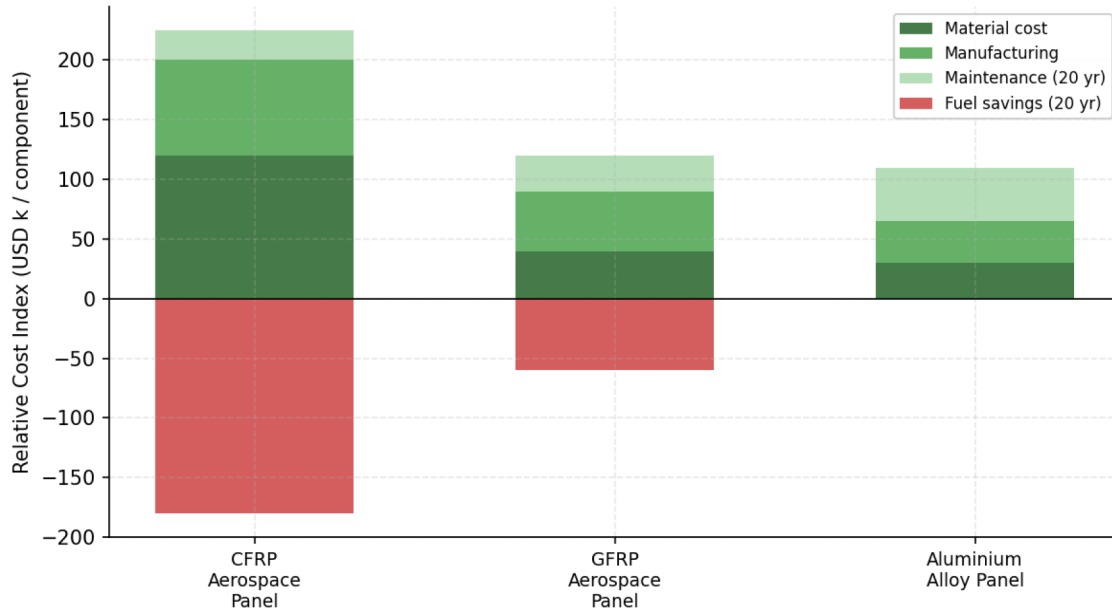
*Формулювання цілей статті.* Метою цієї статті є комплексна оцінка волокнисто-армованих аерокосмічних конструкцій ВПВУ та СВВУ за трьома взаємопов'язаними вимірами: повна фінансова вартість життєвого циклу порівняно з металевими конструкціями протягом репрезентативного терміну служби; екологічний профіль життєвого циклу з урахуванням як виробничих енергетичних витрат, так і операційних gains ефективності, які їх поступово компенсують; порівняльні можливості трьох виробничих процесів. Ці виміри інтегруються в рамках багатоцільової оптимізації за методом Парето для формального картографування простору компромісів для конструктора, який прагне одночасно балансувати між механічними характеристиками, вартістю та вуглецевим впливом.

*Основна частина.* **Аналіз вартості життєвого циклу: повна фінансова картина. Чому просте порівняння вартості закупівлі вводять в оману.** Порівняння вартості закупівлі за кілограм ВПВУ авіаційного класу (зазвичай 30–90 USD/кг залежно від специфікації та ринкової кон'юнктури) з вартістю алюмінієвого сплаву близько 2–5 USD/кг видається переконливим аргументом проти використання композитів. Однак таке порівняння надзвичайно неповне: воно враховує лише витрати на сировину в момент закупівлі, ігноруючи всі фінансові наслідки після введення літака в комерційну експлуатацію. За 20-річний строк служби у разі типового завантаження авіакомпанії структурна перевага ВПВУ у масі над алюмінієм генерує сукупну економію палива, яка у разі перевищує різницю у вартості матеріалів.

На рис. 1 подано розбивку вартості життєвого циклу для ВПВУ, СВВУ та алюмінію за репрезентативним 20-річним операційним горизонтом із використанням нормалізованих індексів вартості. Аналіз розкладає загальні витрати за 4 складниками: закупівля сировини, виготовлення та складання, технічне обслуговування протягом 20 років, а також фінансовий кредит від економії палива, зумовленої зменшенням структурної маси (рис. 1).

Результат, наведений у табл. 1, зазвичай дивує інженерів, які вперше знайомляться з аналізом вартості життєвого циклу: попри те, що сировина ВПВУ коштує більш ніж у чотири рази дорожче за алюміній за кілограм, конструкція з ВПВУ забезпечує сукупну вартість ЖЦ менш ніж удвічі нижчу порівняно з алюмінієм. Рядок економії палива є вирішальним чинником: сучасний вузькофюзеляжний авіалайнер нараховує 3 500–4 500 льотних годин на рік; скорочення структурної маси навіть на кілька сотень кілограмів через використання композитів дає за поточними цінами на авіаційне паливо суттєву щорічну економію на одне повітряне судно. Накопичена за 20 років ця економія впевнено перевищує комбіновану надбавку ВПВУ над алюмінієм за матеріалами, виготовленням та технічним обслуговуванням.

**Figure 1. Lifecycle Cost Comparison: CFRP, GFRP and Aluminium Panels (Representative values, 20-year service life)**



**Рис. 1. Розбивка вартості життєвого циклу для ВПВУ, СВВУ та алюмінієвих аерокосмічних панелей за 20-річним операційним горизонтом (нормалізовані індексні значення). Кредит від економії палива (показаний як від'ємний стовпець) є визначальним чинником для ВПВУ, що перекиває підвищені витрати на матеріали та виробництво**

Таблиця 1

Індекс вартості життєвого циклу за матеріалом і компонентом витрат (алюміній = 100 за базовим рівнем)

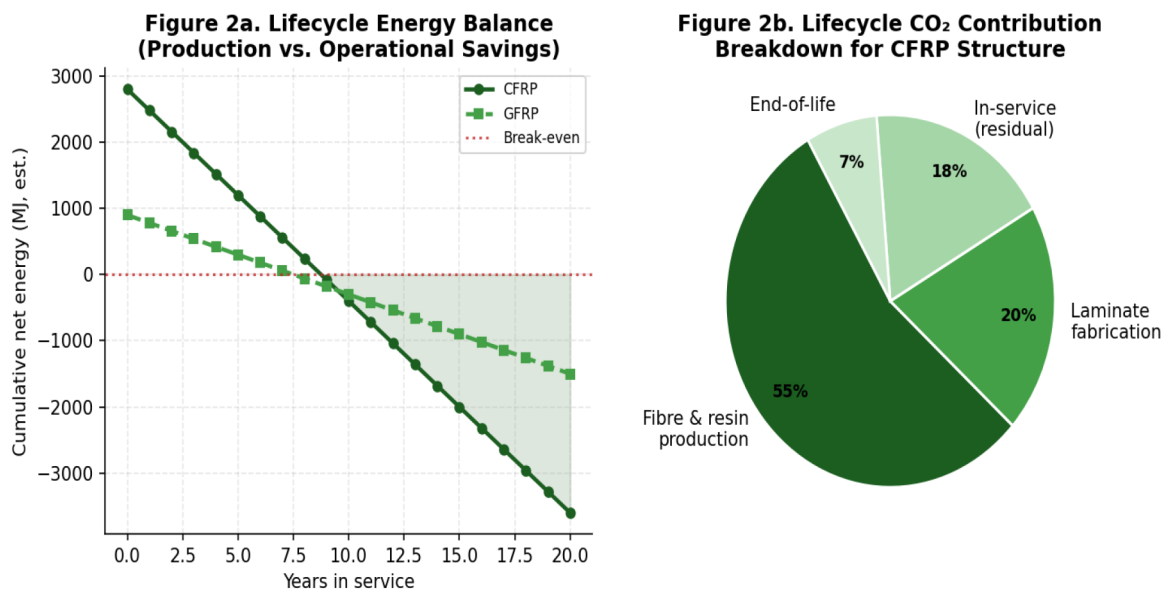
Компонент витрат	ВПВУ	СВВУ	Алюміній	Одиниці
Закупівля сировини	120	40	30	Індекс
Виготовлення та складання	80	50	35	Індекс
Технічне обслуговування (20 р.)	25	30	45	Індекс
Економія палива (20 р.)	-180	-60	0	Індекс
Загальна вартість ЖЦ	45	60	110	Індекс

**Строки окупності та аналіз чутливості.** Точка окупності – рік, коли накопичена економія палива дорівнює накопиченій вартісній надбавці ВПВУ над алюмінієм, є ключовою змінною в економіці авіаційних програм. Для основних конструктивних компонентів на вузькофюзеляжних платформах з високим завантаженням ця межа зазвичай досягається впродовж двох–п’яти років після введення в експлуатацію залежно від компонента, величини досягнутої економії маси та поточного рівня цін на паливо. СВВУ займає окрему позицію: вартість матеріалів і виробництва значно нижча, ніж для ВПВУ, однак і зменшення маси порівняно з алюмінієм менше, що призводить до пропорційно скромнішого паливного кредиту.

**Екологічна оцінка життєвого циклу. Енергетичне навантаження на етапі виробництва.** Екологічні переваги композитів в аерокосмічній галузі ускладнюються структурною асиметрією: екологічні вигоди від їхнього використання – скорочення витрати палива та відповідних викидів – накопичуються поступово впродовж років служби, тоді як екологічні витрати – вбудована енергія та вуглець на виробничому етапі – несуться авансом. Виробництво вуглецевого волокна є домінуючим чинником екологічного навантаження виробничого етапу. Перетворення поліакрилонітрильного прекурсора на безперервне армуюче волокно через

окисну стабілізацію та карбонізацію за високої температури споживає від 183 до 286 МДж на кілограм волокна залежно від сорту і конфігурації процесу. З урахуванням інфузії смоли, енергії консолідації та контролю якості загальна вбудована енергія аерокосмічного компонента з ВПВУ досягає приблизно 2 500–3 000 МДж на одиницю виробу. Для порівняння виготовлення еквівалентного компонента з алюмінієвого сплаву з первинного виплавлення потребує приблизно 1 200–1 600 МДж.

Незважаючи на вищу вартість виробничої енергії, ВПВУ досягає паритету енергії ЖЦ з алюмінієм приблизно через дев'ять років авіаексплуатації і після цього накопичує зростаючу чисту енергетичну перевагу. Наприкінці 20-річного терміну служби сукупна перевага ВПВУ над алюмінієм є значною і підтверджує екологічне обґрунтування для використання композитів (рис. 2).



**Рис. 2.** Зліва: кумулятивний енергетичний баланс для ВПВУ та СВВУ стосовно базового рівня алюмінію. Операційна економія енергії поступово компенсує виробничі витрати, досягаючи беззбитковості приблизно через дев'ять років для ВПВУ. Справа: розподіл викидів CO<sub>2</sub> за фазами ЖЦ для репрезентативного аерокосмічного компонента з ВПВУ

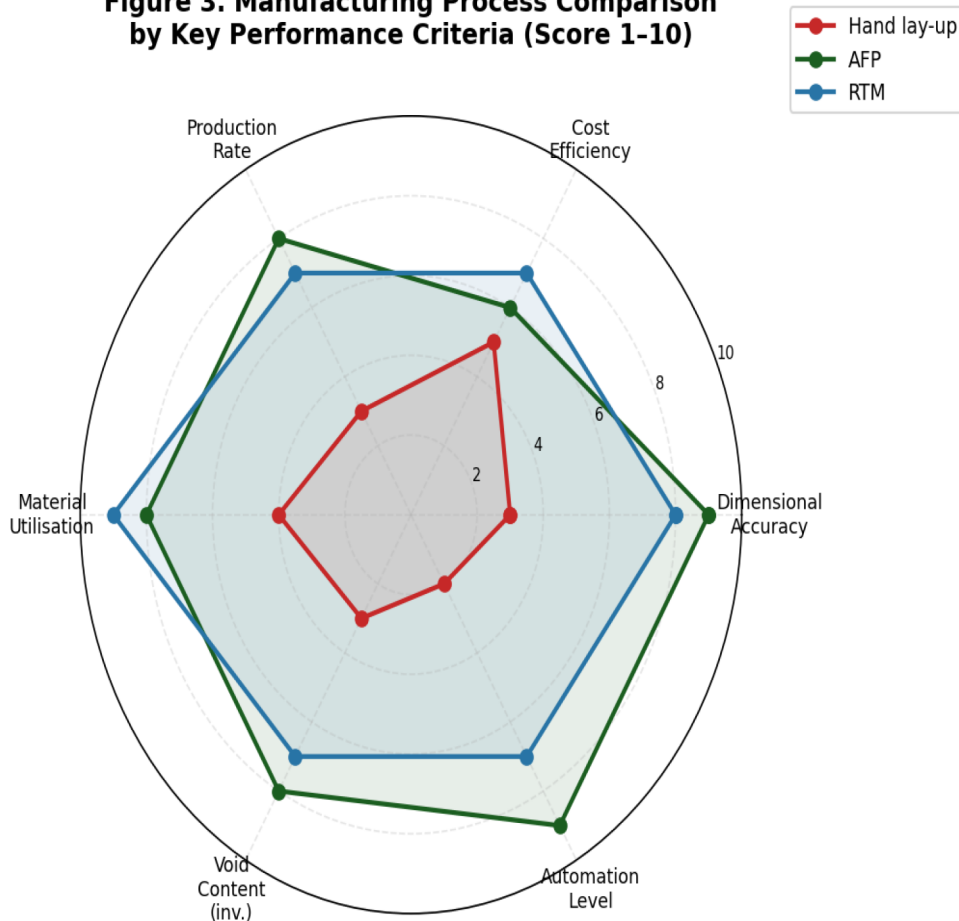
**Кінець строку служби: невирішена проблема сталого розвитку.** Сучасні конструкції з термореактивного ВПВУ є практично невідновними після закінчення терміну служби в будь-якому економічно значущому сенсі. Зшита епоксидна мережа не піддається тепловій переробці, а два основні методи відновлення волокна – піроліз і сольволіз – або порушують поверхневу цілісність відновленого волокна зі зниженням його механічних властивостей, або вимагають витрат енергії та хімічних речовин, що непропорційні вартості отриманого матеріалу. Практичний наслідок полягає в тому, що більшість відпрацьованих композитних конструкцій подрібнюється та відправляється на сміттєзвалище.

Дві технологічні траєкторії пропонують правдоподібні шляхи до більш циркулярного ЖЦ композитів. Термопластичні матричні композити – з матрицями РЕЕК, PPS або РЕКК, що можуть плавитися та переформуватися, вже використовуються у вторинних аероструктурах і забезпечують справжню переробку наприкінці строку служби. Друга траєкторія передбачає матеріали-прекурсори біологічного походження для вуглецевого волокна: лігнінові та целюлозні вуглецеві волокна були продемонстровані на рівні лабораторних і пілотних установок.

**Вибір виробничого процесу. Ландшафт виробництва аерокосмічних композитів.** Механічні характеристики готового композитного компонента та вартість його виробництва визна-

чаються не лише специфікацією матеріалу, а й технологічним маршрутом, що використовується для перетворення сировини на сертифіковану несучу конструкцію. Три процеси охоплюють більшість аерокосмічного виробництва композитів і разом перекривають весь діапазон обсягів виробництва, геометрії деталей і вимог до якості: ручне укладання, автоматичне укладання волокна (АУВ) та трансферне формування смоли (ТФС). На рис. 3 порівнюються ці три процеси за шістьма критеріями ефективності.

**Figure 3. Manufacturing Process Comparison by Key Performance Criteria (Score 1-10)**



**Рис. 3. Радарна діаграма порівняння ручного укладання, АУВ та ТФС за шістьма критеріями ефективності виробничого процесу (за шкалою від 1 до 10). АУВ отримує найвищі оцінки за рівнем автоматизації та темпом виробництва; ТФС лідирує за ефективністю використання матеріалів і точністю розмірів**

Таблиця 2

Оцінки ефективності виробничих процесів (1 = погано, 10 = відмінно)

Критерій ефективності	Ручне укладання	АУВ	ТФС
Точність розмірів	3	9	8
Економічна ефективність	5	6	7
Темп виробництва	3	8	7
Використання матеріалів	4	8	9
Контроль пористості	3	8	7
Рівень автоматизації	2	9	7



Профіль характеристик ручного укладання відображає його фундаментальну залежність від кваліфікованої ручної праці. Для прототипів, одиничних компонентів або ремонтних нашарувань ручне укладання залишається єдиним практично доступним маршрутом. За темпів виробництва, що перевищують кілька компонентів на тиждень, його технічні та економічні обмеження стають критичними.

**АУВ – рішення для первинних конструкцій великосерійного виробництва.** Автоматичне укладання волокна докорінно змінило економіку великих основних конструктивних елементів з композитів, коли вперше було впроваджено у виробництво фіюзеляжних секцій Boeing 787. Машина АУВ наносить джгути волокна з контрольованою швидкістю укладання 25–100 кг/год із точністю кута волокна до  $\pm 0,5^\circ$  і може слідувати складним поверхням подвійної кривизни. Капітальні витрати на впровадження АУВ – від 5 до 15 млн євро на осередок плюс значні зусилля на програмування для кожної нової деталі – означають економічну доцільність лише для програм з великими обсягами серійного виробництва.

**ТФС – точність, геометрія чистої форми та ефективність матеріалів.** Трансферне формування смоли вирішує клас проблем, з якими АУВ справляється гірше: закриті перетини, геометрично складні тривимірні кронштейни та з'єднувальні елементи, а також компоненти, де контрольована якість поверхні на обох гранях є функціональною вимогою. ТФС впорскує рідку смолу під контрольованим тиском у закрите оснащення, що містить попередньо розміщену суху заготовку волокна, виготовляючи деталі з чудовою повторюваністю розмірів на обох інструментальних поверхнях та високими, рівномірними об'ємними частками волокна. Ефективність використання матеріалів є особливою перевагою: заготовки з формою, близькою до чистої, генерують мінімальні відходи обрізки.

**Багатоцільова оптимізація: формальне балансування конкуруючих вимог.** Коли кожен зі структурних, фінансових і екологічних аналізів попередніх розділів розглядається окремо, він вказує на чітко переважне поєднання матеріалів і процесів. На практиці проєктування авіаційних конструкцій одночасно обмежено вимогами з усіх трьох областей, і рішення, що є глобально оптимальним для однієї цільової функції, рідко досягне в реальному багатообмеженому просторі проєктування. Багатоцільова оптимізація забезпечує строгу аналітичну основу для навігації цими конкуруючими вимогами (рис. 4).

Конфігурації, що лежать всередині хмари точок, є домінованими – існують покращені проєкти, які одночасно підвищують і структурну ефективність, і ефективність вартості ЖЦ. Три позначені конфігурації представляють практично здійсненні стратегії: первинна конструкція з ВПВУ, що максимізує структурну ефективність за найвищого індексу вартості ЖЦ; вторинна конструкція зі СВВУ, що мінімізує вартість за нижчої структурної ефективності; та гібрид ВПВУ/СВВУ у середній частині фронту Парето.

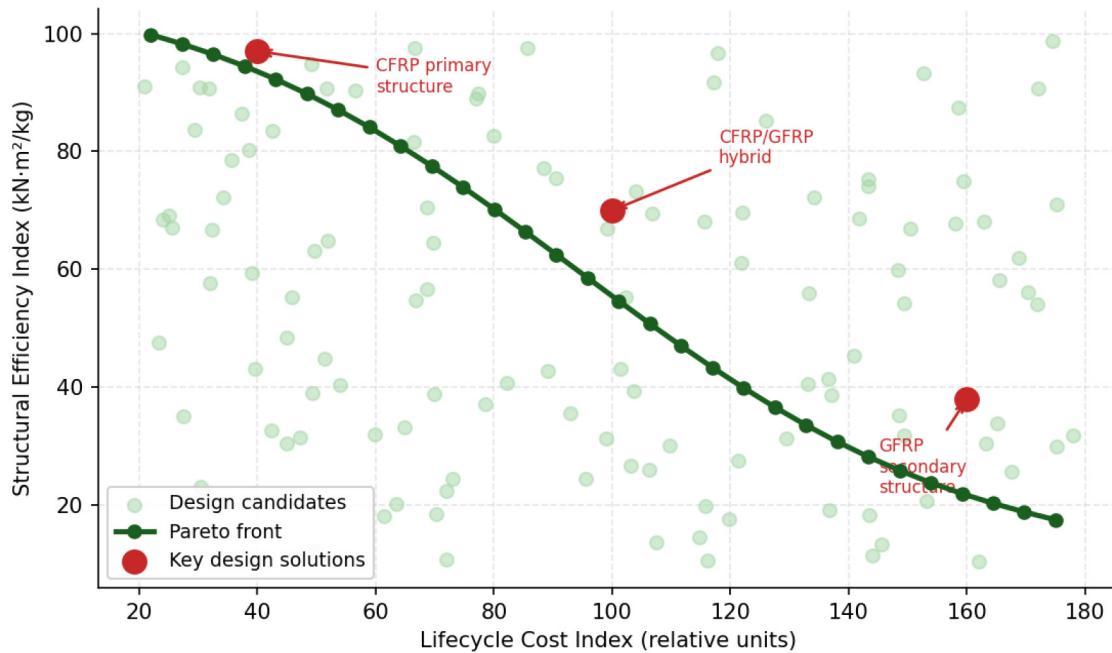
*Висновки.* За результатами комплексного оцінювання волокнисто-армованих аерокосмічних конструкцій з фінансового, екологічного та виробничого поглядів можна сформулювати п'ять ключових висновків.

По-перше, за 20-річним операційним горизонтом ВПВУ забезпечує чисту вартість ЖЦ, суттєво нижчу від алюмінієвого сплаву, незважаючи на вищі витрати на закупівлю та виробництво, з фінансовою беззбитковістю, що зазвичай настає впродовж 2–5 років авіаексплуатації.

По-друге, з екологічного боку значна вбудована виробнича енергія ВПВУ (приблизно 2 500–3 000 МДж на компонент) потребує приблизно дев'яти років операційної економії палива для амортизації стосовно базового рівня алюмінію.

По-третє, термопластичні матричні композити та вуглецеві волокна на основі біопрекурсорів є двома найбільш обґрунтованими технологічними траєкторіями в напрямі більш циркулярних ЖЦ композитів у найближчій перспективі.

**Figure 4. Multi-Objective Pareto Frontier: Structural Efficiency vs. Lifecycle Cost**



**Рис. 4. Багатоцільова крива Парето для проектування аерокосмічних панелей з композитів, що зіставляє індекс структурної ефективності з індексом вартості ЖЦ. Три репрезентативні конфігурації позначені: первинна конструкція з ВПВУ (пікова структурна ефективність), гібрид ВПВУ/СВВУ (збалансований компроміс) та вторинна конструкція із СВВУ (мінімальні витрати)**

Таблиця 3

Зведена комплексна оцінка матеріалів і варіантів процесів

Вимір оцінки	ВПВУ	СВВУ	Алюміній	Кращий варіант
Структурна ефективність	★★★	★★	★	ВПВУ
Вартість закупівлі матеріалів	★	★★	★★★	Алюміній
Економія палива (20 р.)	★★★	★★	–	ВПВУ
Чиста вартість ЖЦ	★★★	★★	★	ВПВУ
Вироб. енергія (менше = краще)	★	★★	★★	Алюміній/СВВУ
Придатність до переробки	★	★	★★★	Алюміній

По-четверте, у виборі виробничого процесу АУВ і ТФС пропонують вирішальні переваги перед ручним укладанням для великосерійного виробництва первинних конструкцій; вибір між АУВ і ТФС визначається геометрією деталі та вимогами до якості поверхні.

По-п'яте, багатоцільовий аналіз Парето підтверджує, що існують конструктивні рішення, які одночасно покращують структурну ефективність, ефективність вартості ЖЦ та екологічні показники. Підтримання актуальної кількісної моделі Парето є постійним стратегічним обов'язком для будь-якої програми розробки аерокосмічних конструкцій з композитів.

**Список використаних джерел**

1. Pimenta S., Pinho S. T. Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook. *Waste Management*. 2011. Vol. 31. No. 2. P. 378–392. DOI: 10.1016/j.wasman.2010.09.019
2. Song Y. S., Youn J. R., Gutowski T. G. Life cycle energy analysis of fibre-reinforced composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2009. Vol. 40. No. 8. P. 1257–1265. DOI: 10.1016/j.compositesa.2009.05.020



3. Hagnell M. K., Åkermo M. The economic and weight efficiency of composite and aluminium structures in aerostructures. *Composite Structures*. 2015. Vol. 131. P. 581–592. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.06.019
4. Dufflou J. R. et al. Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach. *CIRP Annals*. 2012. Vol. 61. No. 2. P. 587–609. DOI: 10.1016/j.cirp.2012.05.002
5. Witik R. A. et al. Carbon fibre reinforced composite waste: An environmental assessment of recycling, energy recovery and landfilling. *Composites Part A*. 2013. Vol. 49. P. 89–99. DOI: 10.1016/j.compositesa.2013.02.009
6. Das S. Life cycle assessment of carbon fibre-reinforced polymer composites. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011. Vol. 55. No. 5. P. 421–431. DOI: 10.1007/s00170-010-3053-3
7. European Commission. Circular Economy Action Plan for a Cleaner and More Competitive Europe. COM/2020/98. Brussels, 2020. URL: <https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/>
8. Aerospace Technology Institute. FlyZero: Lifecycle Carbon Methodology for Next-Generation Aircraft. ATI Report FZO-CST-REP-0062. Cranfield, 2023. URL: <https://www.ati.org.uk/flyzero>
9. Ermanni P. Composites Technoligen. ETH Zurich Lecture Notes. Zurich, 2006.
10. Murray R. E. et al. Low-cost carbon fibre from biomass-derived precursors. *Composites Science and Technology*. 2020. Vol. 200. P. 108421. DOI: 10.1016/j.compscitech.2020.108421

Дата першого надходження статті до видання: 19.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026

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



**Yu. Yunis**

*National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”*

## **FINANCIAL VIABILITY, ENVIRONMENTAL IMPACT AND MANUFACTURING PROCESS SELECTION FOR FIBRE-REINFORCED AEROSPACE STRUCTURES**

### *Summary*

While the structural merits of fibre-reinforced polymer composites in aerospace have long been established, their financial and environmental credentials are now attracting equally rigorous scrutiny from airlines, regulators and capital markets. This article evaluates CFRP and GFRP aerospace structures across three interconnected dimensions: total lifecycle cost, environmental burden and manufacturing process performance. A comparative cost analysis spanning a 20-year operational horizon demonstrates that the elevated upfront expenditure associated with CFRP is comprehensively recovered through fuel savings arising from structural weight reduction, typically within two to five years of entering airline service, ultimately delivering a net cost advantage that substantially undercuts aluminium alloy alternatives. On the environmental side, CFRP production carries a substantial embedded energy cost (approaching 2 800 MJ per component) that must be progressively paid back through in-service fuel efficiency gains, with full energy break-even achieved at roughly nine years. The inability to recover high-value carbon fibre from end-of-life thermoset components at economically viable cost is identified as the central unresolved sustainability challenge, with thermoplastic matrix systems and bio-derived fibre precursors representing the most credible near-term responses. A structured evaluation of hand lay-up, automated fibre placement and resin transfer moulding against six performance criteria provides actionable process selection guidance.

**Keywords:** lifecycle cost modelling, CFRP sustainability, carbon footprint assessment, automated fibre placement, resin transfer moulding, multi-objective optimisation, end-of-life recovery, aerospace composites.



---

## ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

---

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-25>

УДК 637.5:664.8:577.114:519.816

Л. В. Баль-Прилипко<sup>1</sup>, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-9489-8610

М. С. Ніколаєнко<sup>1</sup>, д-р філософії

ORCID: 0000-0003-2213-4985

М. Є. Сердюк<sup>1,2</sup>, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-6504-4093

В. М. Бандура<sup>1</sup>, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0001-8474-3020

І. Є. Іванова<sup>2</sup>, к.с.-г. наук, доц.

ORCID: 0000-0003-2711-2021

<sup>1</sup> Національний університет біоресурсів і природокористування України

<sup>2</sup> Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: vbandura@nubip.edu.ua

### БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНА ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПРИДАТНОСТІ ФЕРМЕНТОВАНИХ РОСЛИННИХ СУБСТРАТІВ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ В М'ЯСНИХ СИСТЕМАХ

*Анотація.* Об'єктом дослідження були ферментовані рослинні субстрати (спельга, льон, ламінарія, глива), отримані після 18 діб ферментації. Мета досліджень полягала в проведенні інтегральної оцінки придатності досліджуваних субстратів для різних груп м'ясних продуктів на основі багатокритеріального підходу. Показано, що ферментація зумовлює багатофакторні зміни кислотного стану, вуглеводного та білково-азотного профілю, а також параметрів вологоутримання, які формують індивідуальний функціонально-технологічний профіль кожного субстрату. Для узагальнення різновимірних критеріїв використано метод зваженої суми. За результатами оцінки льон отримав максимальні інтегральні бали в більшості груп виробів, тоді як спельга продемонструвала найвищу придатність для сирокочених і сиров'ялених виробів. Ламінарія та глива характеризувалися проміжними значеннями й можуть розглядатися як функціональні модифікатори структури та смакоароматичного профілю.

*Ключові слова:* ферментація, рослинні субстрати, багатокритеріальна оцінка, вологоутримувальна здатність, активність води, м'ясні вироби.

*Постановка проблеми.* У сучасних м'ясних технологіях підвищується інтерес до використання ферментованих інгредієнтів рослинного походження як джерела функціональних компонентів, здатних модифікувати водний стан, структуроутворення й сенсорний профіль білково-жирових систем. Разом із тим оцінювання придатності таких інгредієнтів є складним, оскільки ферментація викликає одночасні зміни кислотності, вуглеводного комплексу, білково-азотних перетворень і вологоутримання. Відтак одновимірний аналіз окремих показників не дає однозначного висновку щодо технологічної ефективності в конкретних групах м'ясних виробів. Це зумовлює необхідність застосування багатокритеріальних методів інтегрального оцінювання.

*Аналіз останніх досліджень.* Ферментовані продукти посідають вагоме місце в раціоні людини завдяки наявності пробіотичних властивостей, підвищенню біодоступності поживних речовин і потенційному позитивному впливу на стан здоров'я. Збагачення таких продуктів побічними компонентами агропродовольчого виробництва сприяє створенню інноваційних функціональних харчових продуктів із покращеним нутритивним профілем. Останніми роками використання промислових побічних ресурсів привертає значну наукову увагу, що зумовлено



їх високим умістом біологічно активних сполук: поліфенолів, флавоноїдів, каротиноїдів, токоферолів, вітамінів та антоціанів, які забезпечують виражену антиоксидантну активність харчових систем [1].

Ферментовані продукти є важливою частиною раціону, здоров'я та культурних особливостей людини [2]. Однією з найпоширеніших категорій ферментованих продуктів є м'ясні вироби. Включення порошків або екстрактів агропродовольчих побічних продуктів до складу традиційних м'ясних рецептур сприяє підвищенню їх харчової цінності й антиоксидантного потенціалу, уповільненню процесів ліпідного окиснення, стабілізації кольору, пригніченню розвитку патогенних мікроорганізмів і формуванню додаткових оздоровчих ефектів. Застосування таких інгредієнтів у технології ферментованих м'ясних продуктів розглядається як перспективний напрям розроблення нових функціональних виробів із підвищеною біологічною цінністю [3]. Дослідження переконливо показують, що антиоксидантний потенціал ферментованих продуктів можна збільшити шляхом додавання рослинних екстрактів (з трав, фруктів, овочів), тим самим покращуючи їхні функціональні властивості [4].

*Lactiplantibacillus plantarum* (Lb. plantarum) – це факультативна гетероферментативна бактерія, яка широко використовується в хлібопекарстві визнана та цінується за структуру й підкислення, які вона забезпечує зернам злаків, що використовуються для ферментації [5].

Насіння льону вважається функціональним інгредієнтом завдяки високому вмісту гідроколіїдних полісахаридів і білків, що забезпечують емульгуючі та структуроутворювальні властивості [6]. Морські водорості, як джерело альгінатів, білка й поліненасичених жирних кислот, здатні модифікувати структуру м'ясних фаршевих систем, підвищуючи їх волого- й жирутримувальну здатність і стабільність, зокрема під час заморожування та дефростації [7; 8]. Ферментовані гриби гливи також розглядаються як перспективний компонент для часткової заміни м'ясної сировини, оскільки сприяють покращенню текстурних і сенсорних характеристик продукції та стабільності під час зберігання [9].

В умовах усе більшої складності технологічних систем і необхідності обґрунтованого вибору оптимальних рішень особливої актуальності набувають методи багатокритеріального аналізу. Одним із найбільш поширених і водночас методично доступних інструментів є метод зважених сум (SAW), який дає змогу інтегрувати різновимірні показники шляхом їх нормалізації й урахування вагових коефіцієнтів. Завдяки можливості формування узагальненого інтегрального індексу цей підхід забезпечує об'єктивне ранжування альтернатив і є доцільним для оцінювання технологічної придатності сировини або рецептур у системах з багатьма взаємопов'язаними критеріями [10].

*Формулювання мети статті (постановка завдання).* Мета роботи – здійснити інтегральну багатокритеріальну оцінку придатності ферментованих рослинних субстратів для використання в різних групах м'ясних виробів з урахуванням технологічної значущості окремих критеріїв. Для досягнення поставленої мети виконано завдання: визначити систему інформативних критеріїв оцінювання ферментованих субстратів і здійснити їх класифікацію; обґрунтувати вагові коефіцієнти критеріїв з урахуванням специфіки різних груп м'ясних виробів; провести інтегральне оцінювання ферментованих субстратів за методом зваженої суми (SAW); установити диференціацію субстратів за рівнем інтегрального потенціалу для окремих груп м'ясних виробів і визначити пріоритетні напрями їх використання.

*Основна частина.* Об'єктами оцінювання (альтернативами) були ферментовані субстрати: спельта, льон, ламінарія, глива. Розрахунки виконували за експериментальними даними після 18 діб ферментації, що попередньо визначено як раціональний термін стабілізації кислотності й функціонально-технологічних параметрів. Основними критеріями оцінювання були: рН,  $\Delta TK$ ,  $\Delta C_{заг}$ ,  $|\Delta C_{ред}|$ ,  $\Delta N_{роз}$ ,  $\Delta DH$ ,  $a_w$ ,  $\Delta B33$ .



Для проведення багатокритеріального аналізу методом зваженої суми (SAW) усі показники ферментації класифіковано за напрямом оптимізації. Показник рН через наявність оптимального інтервалу значень у всіх групах м'ясних виробів розглядався як target-критерій. Показники, зменшення яких є технологічно доцільним, зараховано до cost-критеріїв. У дослідженнях це активність води. Параметри, зростання яких сприяє формуванню бажаних структурно-механічних, сенсорних і функціональних властивостей продукту, класифіковано як benefit-критерії. Узагальнену класифікацію критеріїв ферментації за напрямом оптимізації, використану в SAW-аналізі, наведено в таблиці 1.

Нормалізацію критеріїв виконували з урахуванням напряму оптимізації: для benefit-критеріїв використовували відношення до максимального значення, для cost-критеріїв – відношення мінімального до поточного.

Таблиця 1

Зведена таблиця класифікації критеріїв для SAW-аналізу

Група виробів	pH <sub>24</sub>	$\Delta TK$	$\Delta U_{заг}$	$ \Delta U_{ред} $	$\Delta N_{роз}$	$\Delta DH$	$a_w$	$\Delta B33$
Варені ковбаси, сосиски	t	b	b	b	b	b	c	b
Паштети, ліверні, намазки	t	b	b	b	b	b	c	b
Напівкопчені, варено-копчені	t	b	b	b	b	b	c	b
Сирокопчені, сиров'ялені	t	b	b	b	b	b	c	b
Січені напівфабрикати	t	b	b	b	b	b	c	b
Цільном'язові вироби	t	b	b	b	b	b	c	b

Примітка: t – target, c – cost, b – benefit.

Для target-критерію рН спочатку обчислювали модуль відхилення від заданого цільового значення, після чого нормалізували його як критерій мінімізації (чим менше відхилення, тим краще) з приведенням до інтервалу [0; 1].

Використаємо умовні позначення:

$i = 1..m$  – альтернатива (субстрат);

$j = 1..n$  – критерій;

$x_{ij}$  – вихідне значення критерію  $j$  для альтернативи  $i$ ;

$r_{ij}$  – нормалізоване значення (0...1);

$k_j$  – ваговий коефіцієнт критерію ( $\sum k_j = 1$ );

$A_i$  – інтегральний бал SAW (чим більше, тим краще).

Benefit-критерії:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max x_{ij}}. \quad (1)$$

Альтернатива з максимумом за критерієм отримує  $r_{ij}$ .

Cost-критерії:

$$r_{ij} = \frac{\min x_{ij}}{x_{ij}}. \quad (2)$$

Альтернатива з мінімумом за критерієм отримує  $r_{ij}$ .

Target-критерії:

Визначаємо відхилення від цільового значення:

$$d_{ij} = |x_{ij} - x_j^*|, \quad (3)$$

де  $x_j^*$  – задане цільове значення.



Проводимо нормалізацію, приймаючи таке: чим менше відхилення, тим краще:

$$r_{ij} = 1 - \frac{d_{ij}}{\max d_{ij}}. \quad (4)$$

Тоді:

- у разі  $d_{ij} = 0 \rightarrow r_{ij} = 1$  (ідеально в цілі),
- у разі  $d_{ij} = \max d \rightarrow r_{ij} = 0$  (найгірше відхилення).

Інтегральний бал субстрату  $A_i$  обчислювали за формулою:

$$A_i = \sum_{j=1}^n k_j r_{ij}, \quad (5)$$

де  $k_j$  – вагові коефіцієнти критеріїв.

Ранжування виконували за правилом: чим більший бал субстрату  $A_i$  тим вища технологічна доцільність у межах конкретної групи виробів.

Якщо для двох субстратів у межах певної групи отримували однакові  $A_i$  (з точністю до 0,001), застосовували домінуючий критерій сценарію як тай-брейк:

- для емульсійних, паштетних, січених, цілном'язових – пріоритет  $\Delta B33$ , далі  $a_w$ ;
- для сирокочених, сиров'ялених – пріоритет рН, далі  $\Delta TK$ , далі  $a_w$ .

Це забезпечує відтворюваність прийняття рішення та його технологічну обґрунтованість.

Формування вагових коефіцієнтів критеріїв у багатокритеріальній оцінці здійснювали з урахуванням фізико-хімічних механізмів формування структури та стабільності м'ясних виробів, а також критичних технологічних ризиків, характерних для кожної групи продукції. Значення вагових коефіцієнтів відображають відносний внесок кожного показника в досягненні цільових властивостей продукту й не є рівнозначними для різних технологічних сценаріїв. При розрахунку приймалося, що сума ваг = 1,00.

Група 1. Варені ковбаси та сосиски (емульсійні вироби). Для емульсійних виробів ключовими є стабільність білково-жирової емульсії, утримання вологи й мінімізація теплових утрат під час варіння. Саме тому найвищі ваги надано показникам водного стану:  $\Delta B33$  (0,30) та  $a_w$  (0,25), які безпосередньо корелюють із виходом готової продукції, відсутністю бульйонно-жирових відділень і рівномірністю структури. Показники білково-азотних перетворень ( $\Delta DH = 0,13$ ;  $\Delta N_{роз} = 0,12$ ) мають підвищену, але другорядну вагу, оскільки помірний протеоліз сприяє підвищенню функціональності білків, однак його надмірність може призводити до дестабілізації гелевої сітки. Кислотні показники (рН = 0,10;  $\Delta TK = 0,05$ ) ураховано з обмеженою вагою, оскільки надмірне зниження рН у варених ковбасах може погіршувати водоутримання м'ясних білків. Зміни вуглеводів ( $\Delta C_{заг} = 0,03$ ;  $|\Delta C_{ред}| = 0,02$ ) мають мінімальний вплив і відображають лише фонову роль ферментації рослинних компонентів.

Група 2. Паштети, ліверні та намазки. Для тонкодисперсних пастоподібних систем визначальними є пластичність, мазеподібна консистенція й відсутність синерезису, що обґрунтовує максимальну вагу  $\Delta B33$  (0,40) і високу вагу  $a_w$  (0,24). Саме ці показники формують стабільність таких систем під час зберігання й термічної обробки. Білково-азотні показники ( $\Delta N_{роз}$  і  $\Delta DH$  по 0,10) ураховано як фактори формування м'якої, рівномірної білково-жирової матриці та сенсорного профілю. Кислотні й вуглеводні критерії мають мінімальні ваги, оскільки інтенсивне кислототворення й активне споживання цукрів не є визначальними для якості паштетів.

Група 3. Напівкопчені та варено-копчені вироби. Ця група виробів характеризується компромісом між структурною стабільністю, соковитістю й розвитком смаку, що зумовило більш збалансований розподіл ваг. Високі значення  $\Delta B33$  (0,30) і  $a_w$  (0,20) відображають важливість утримання вологи під час копчення та варіння, тоді як підвищені ваги кислотних (рН = 0,12;



$\Delta TK = 0,08$ ) і білкових ( $\Delta DH = 0,12$ ;  $\Delta N_{роз} = 0,12$ ) показників ураховують роль ферментативних процесів у формуванні текстури й смакового профілю. Вуглеводні критерії мають допоміжне значення.

Група 4. Сирокопчені та сиров'ялені вироби. Для ферментованих сиropyкопчених виробів домінуючими є процеси кислототворення й осмотичної стабілізації, що безпосередньо пов'язані з мікробіологічною безпекою і стабільністю під час дозрівання. Тому найбільшої ваги надано рН (0,20),  $\Delta TK$  (0,15) та  $a_w$  (0,25). Показники споживання вуглеводів ( $\Delta C_{заг} = 0,10$ ;  $|\Delta C_{ред}| = 0,05$ ) отримали підвищені ваги порівняно з іншими сценаріями, оскільки саме вони визначають субстратну забезпеченість молочнокислої ферментації. Білково-азотні показники мають помірну вагу (по 0,10), а  $\Delta B33$  (0,05) є другорядним, оскільки утримання вологи не є цільовою функцією для цієї групи виробів.

Група 5. Січені напівфабрикати. Для січених виробів ключовим критерієм є збереження соковитості після смаження або запікання, що обґрунтовує максимальну вагу  $\Delta B33$  (0,40) і високу вагу  $a_w$  (0,25). Білково-азотні показники ( $\Delta DH$ ,  $\Delta N_{роз}$  по 0,10) ураховують роль помірного протеолізу у формуванні текстури та смаку. Кислотні й вуглеводні критерії мають мінімальний вплив.

Група 6. Цільном'язові вироби. Для цільном'язових виробів визначальним є утримання ін'єктованого розсолу та стабільність зрізу, що зумовило найвищу вагу  $\Delta B33$  (0,40) і максимальну серед усіх сценаріїв вагу  $a_w$  (0,28). Кислотні показники (рН = 0,10;  $\Delta TK = 0,05$ ) і білкові критерії ( $\Delta DH = 0,06$ ;  $\Delta N_{роз} = 0,08$ ) мають обмежену вагу, оскільки надмірний протеоліз або підкислення можуть погіршувати механічну цілісність м'язових волокон. Вуглеводні показники мають лише допоміжне значення.

У таблиці 2 представленні вагові коефіцієнти критеріїв для кожної групи виробів.

На основі сформованої системи критеріїв і визначених вагових коефіцієнтів виконано багатокритеріальну інтегральну оцінку придатності ферментованих рослинних субстратів для використання в різних групах м'ясних виробів методом зваженої суми (SAW).

Таблиця 2

Вагові коефіцієнти  $k_j$  для різних типів виробів

Найменування виробів	Значення $k_j$							
	рН	$\Delta TK$	$\Delta C_{заг}$	$ \Delta C_{ред} $	$\Delta N_{роз}$	$\Delta DH$	$a_w$	$\Delta B33$
Варені ковбаси, сосиски (емільсійні)	0,10	0,05	0,03	0,02	0,12	0,13	0,25	0,30
Паштети, ліверні, намазки	0,08	0,05	0,02	0,01	0,10	0,10	0,24	0,40
Напівкопчені, варено-копчені	0,12	0,08	0,04	0,02	0,12	0,12	0,20	0,30
Сирокопчені, сиров'ялені	0,20	0,15	0,10	0,05	0,10	0,10	0,25	0,05
Січені напівфабрикати	0,06	0,04	0,03	0,02	0,10	0,10	0,25	0,40
Цільном'язові вироби	0,10	0,05	0,02	0,01	0,08	0,06	0,28	0,40

Узагальнені результати багатокритеріальної інтегральної оцінки наведено в таблиці 3.

Таблиця 3

Результати багатокритеріальної оцінки придатності ферментованих рослинних субстратів для м'ясних виробів за методом SAW

Субстрат	Групи м'ясних виробів					
	група 1	група 2	група 3	група 4	група 5	група 6
Спельта	0,614	0,554	0,595	0,838	0,574	0,540
Льон	0,801	0,842	0,799	0,709	0,844	0,847
Ламінарія	0,665	0,660	0,571	0,481	0,662	0,701
Глива	0,625	0,569	0,602	0,798	0,580	0,548



Аналіз результатів багатокритеріальної інтегральної оцінки дає змогу сформуванню попередніх уявлень щодо потенційної придатності ферментованих рослинних субстратів для використання в різних групах м'ясних виробів.

Згідно з SAW-аналізом, льон характеризується найвищими інтегральними показниками в більшості розглянутих груп м'ясних виробів, що дає змогу припустити його універсальний функціонально-технологічний потенціал, пов'язаний із вологоутриманням, перебігом біохімічних перетворень і формуванням водно-структурного стану системи. Водночас ця інтерпретація має попередній характер і потребує експериментального підтвердження.

Для спельти встановлено виражену специфічність: найвищі інтегральні бали отримано для сирокочених і сиров'ялених виробів, що дає змогу розглядати її як субстрат для ферментації та регуляції кислотності у виробі тривалого дозрівання; помірні показники в інших групах указують на можливі обмеження застосування.

Ламінарія займає проміжне положення в більшості груп і може розглядатися як субстрат із помірною ферментаційною активністю й впливом на водний стан системи.

Глива характеризується специфічним профілем: вищі показники – для напівкочених і сирокочених виробів і нижчі – для варених і пастоподібних, що зумовлює її використання переважно як функціонального модифікатора.

Отримані результати створюють основу для попереднього ранжування субстратів і формування гіпотез щодо їх подальшого застосування; відповідне ранжування в межах кожної групи виробів наведено в таблиці 4.

Таблиця 4

Ранжування рослинних субстратів за інтегральною придатністю для різних груп м'ясних виробів (за результатами SAW-аналізу)

Група виробів	1 ранг	2 ранг	3 ранг	4 ранг
Варені ковбаси, сосиски (емільсійні)	льон	ламінарія	глива	спельта
Паштети, ліверні, намазки	льон	ламінарія	глива	спельта
Напівкочені, варено-кочені	льон	глива	спельта	ламінарія
Сирокочені, сиров'ялені	спельта	глива	льон	ламінарія
Січені напівфабрикати	льон	ламінарія	глива	спельта
Цільном'язові вироби	льон	ламінарія	глива	спельта

Отримане ранжування рослинних субстратів за інтегральною придатністю на основі SAW-аналізу формує кількісне підґрунтя для визначення їх ролі як базових компонентів або функціональних модифікаторів у різних групах м'ясних виробів. Аналіз технологічних вимог підтверджує доцільність використання льону як універсального базового компоненту, тоді як ламінарія та ферментована глива є функціональними модифікаторами залежно від типу виробу. Для емульсійних і пастоподібних систем більш доцільною є ламінарія як стабілізатор і вологоутримувальний агент, тоді як у виробі із вираженою структурною або ферментаційною специфікою – глива або спельта.

Багатокритеріальний аналіз дав змогу систематизувати експериментальні дані та сформуванню науково обґрунтованих гіпотез щодо потенційної придатності субстратів, при цьому інтегральні показники відображають сукупність біохімічних і функціонально-технологічних змін, що відбуваються під час ферментації. Виявлена диференціація субстратів обґрунтовує диференційований підхід до їх відбору відповідно до технологічних вимог виробів. Водночас результати мають попередній характер, оскільки не враховують взаємодію з м'ясною сировиною, що зумовлює необхідність подальших досліджень у складі комплексних м'ясних систем для перевірки сформульованих гіпотез та уточнення практичних рекомендацій.



*Висновки.* Метод зваженої суми (SAW) з урахуванням класифікації критеріїв benefit/cost/target і сценарно заданих ваг забезпечив кількісне ранжування ферментованих субстратів за їх технологічною придатністю для різних груп м'ясних виробів. Найвищі інтегральні показники в більшості груп продемонстрував льон, тоді як спельта є найбільш доцільною для сирокочених і сиров'ялених виробів. Ламінарія та глива мають помірні інтегральні бали й можуть використовуватися як структурні та сенсорні модифікатори в складі комбінованих рецептур.

#### Список використаних джерел

1. Ivanov Y., Atanasova M., Godjevargova T. Development of functional fermented meat products using agro-food byproducts. *Processes*. 2026. Vol. 14, № 4. P. 602. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr14040602>
2. Şerban L. R., Păucean A., Chiş M. S., Pop C. R., Man S. M., Puşcaş A., Ranga F., Socaci S. A., Alexa E., Berbeca A., Semeniuc C. A., Mureşan V. Metabolic Profile of Einkorn, Spelt, Emmer Ancient Wheat Species Sourdough Fermented with Strain of *Lactiplantibacillus plantarum* ATCC 8014. *Foods*. 2023 Vol.12(5). P. 1096. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12051096>
3. Tadesse S. A., Emire S. A. Production and processing of antioxidant bioactive peptides: A driving force for the functional food market. *Heliyon*. 2020. Vol. 6. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04765>
4. Stobiecka M., Król J., Brodziak A. Antioxidant activity of milk and dairy products. *Animals*. 2022. Vol. 12. P. 245. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani12030245>
5. Korcari D., Secchiero R., Laureati M., Marti A., Cardone G., Rabitti N. S., Ricci G., Fortina M. G. Technological properties, shelf life and consumer preference of spelt-based sourdough bread using novel, selected starter cultures. *LWT*. 2021. Vol. 151. 112097. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112097>
6. Lorenc F., Jarošová M., Bedrníček J., Smetana P., Bárta J. Structural Characterization and Functional Properties of Flaxseed Hydrocolloids and Their Application. *Foods (Basel, Switzerland)*. 2022. Vol. 11(15). P. 2304. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11152304>
7. Siladji C., Djordjevic V., Milijasevic J.B., Heinz V., Terjung N., Sun W., Tomasevic I. Micro- and macroalgae in meat products: effects on quality, physicochemical and functional properties, sensory characteristics, and potential for shelf-life enhancement. *Foods*. 2024. Vol. 13(6). P. 826. DOI: [10.3390/foods13060826](https://doi.org/10.3390/foods13060826)
8. Wang Y., Chang X., Wang Y., Xie J., Han G., Qi H. Seaweed, Used as a Water-Retaining Agent, Improved the Water Distribution and Myofibrillar Protein Properties of Plant-Based Yak Meat Burgers Before and After Freeze-Thaw Cycles. *Foods*. 2025. Vol. 14(14). P. 2541. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods14142541>
9. Boylu M., Hitka G., Kenesei G. Sausage Quality during Storage under the Partial Substitution of Meat with Fermented Oyster Mushrooms. *Foods*. 2024. Vol. 13(13). P. 2115. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods13132115>
10. Taherdoost H. Analysis of Simple Additive Weighting Method (SAW) as a Multi-Attribute Decision Making Technique: A Step-by-Step Guide. *Journal of Management Science & Engineering Research*. 2023. Vol. 6(1). P. 21–24. DOI: <https://doi.org/10.30564/jmsr.v6i1.5400>

*Дата першого надходження статті до видання: 01.02.2026*

*Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.02.2026*

*Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026*

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





**L. Bal-Prylypko<sup>1</sup>, M. Nikolaienko<sup>1</sup>, M. Serdiuk<sup>1,2</sup>, V. Bandura<sup>1</sup>, I. Ivanova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*

<sup>2</sup> *Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University*

## **MULTI-CRITERION ASSESSMENT OF THE TECHNOLOGICAL SUITABILITY OF FERMENTED PLANT SUBSTRATES FOR USE IN MEAT SYSTEMS**

### *Summary*

The object of the study was fermented plant substrates of spelt, flax, kelp and oyster mushrooms after eighteen days of fermentation and their potential use as ingredients in various meat product technologies. The aim of the work was to conduct an integral multi-criteria assessment of the suitability of these substrates for different groups of meat products, taking into account their functional and technological characteristics. During the fermentation process, multifactorial changes in acidity, carbohydrate and protein-nitrogen profile, as well as indicators related to water-holding capacity were established, which led to the formation of an individual functional and technological profile of each substrate. Individual analytical indicators do not allow objectively assessing their practical suitability in meat systems, since the effectiveness of the ingredient is determined by the cumulative effect on the structure, stability and rheological behavior of the protein-fat system. For this purpose, the weighted sum method was used as a tool for multi-criteria analysis. All fermentation indicators were classified according to the direction of optimization: the hydrogen indicator was considered as a target criterion taking into account the optimal interval of values for different product groups; parameters, the reduction of which is technologically feasible, were attributed to cost criteria; indicators, the increase of which contributes to the formation of the desired structural-mechanical, sensory and functional properties, were defined as useful criteria. Scenario-based weighting factors were established for each group of meat products, taking into account the specifics of emulsion, pate, semi-smoked, cooked-smoked, raw-dried, raw-smoked, ground and whole-muscle products. The results of the analysis showed that flax is characterized by the highest integral scores in most product groups, while spelt is most suitable for raw-dried and raw-smoked products. Laminaria and oyster mushrooms demonstrate intermediate integral values and can be considered as functional modifiers depending on the technological scenario. The obtained data create a scientifically sound basis for further experimental testing as part of complex meat systems and the development of practical recommendations for optimizing recipes and technological regimes.

**Keywords:** fermentation, plant substrates, multi-criteria evaluation, moisture retention capacity, water activity, meat products.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-26>

УДК 621.646

І. М. Белова<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф.

ORCID: 0000-0002-1497-7133

В. М. Гіджеліцький<sup>2</sup>, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-5959-514X

І. Я. Стадник<sup>3</sup>, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0003-4126-3256

<sup>1</sup> Інститут інноватики, природокористування та інфраструктури  
Західноукраїнського національного університету

<sup>2</sup> Київський кооперативний інститут бізнесу і права

<sup>3</sup> Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

e-mail: igorstadnykk@gmail.com

## ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ЕКСТРАГУВАННЯ ЧОРНОБРИВЦІВ У РОТОРНО-ПУЛЬСАЦІЙНОМУ АПАРАТІ

*Анотація.* У статті досліджено процес інтенсифікації екстрагування біоактивних сполук із суцвіть чорнобривців (*Tagetes patula*) у роторно-пульсаційному апараті (РПА) циліндричного типу з гвинтовим ротором. Науково обґрунтовано застосування принципу дискретного введення енергії для підвищення швидкості масообміну. На основі аналізу рівняння руху дисперсної частки визначено роль сил інерції приєднаної маси та гідродинамічного опору в руйнуванні прикордонного дифузійного шару. Установлено, що конструктивні особливості апарата забезпечують високу відносну швидкість фаз, що дає змогу скоротити тривалість екстракції в кілька разів порівняно з традиційними методами, забезпечуючи високий вихід цільових компонентів при оптимальних енерговитратах.

*Ключові слова:* чорнобривці, екстрагування, роторно-пульсаційний апарат, дискретне введення енергії, приєднана маса, відносна швидкість, інтенсифікація масообміну.

*Постановка проблеми.* На сучасному етапі розвитку промисловості України створення енерго- та ресурсозберігаючих технологій є пріоритетним завданням. Покращення техніко-економічних показників виробництва в харчовій, фармацевтичній і хімічній галузях безпосередньо залежить від розробки високоефективних апаратів, здатних інтенсифікувати фундаментальні гідродинамічні й тепломасообмінні процеси. Одним із найбільш критичних етапів у переробці рослинної сировини є екстрагування цінних компонентів, швидкість якого суттєво обмежена складною внутрішньою структурою біологічних об'єктів.

Сучасні методи інтенсифікації екстракції базуються на застосуванні імпульсних, вібраційних і кавітаційних впливів. Вибір оптимального способу підведення енергії (механічного, акустичного або їх поєднання) визначається специфікою сировини. З огляду на обмежене поширення електричних і теплових методів диспергування, особливу увагу привертають механічні й гідроакустичні способи впливу, що забезпечують високий ККД та зниження собівартості продукції.

При використанні традиційного механічного перемішування ключовим фактором інтенсифікації стає неоднорідність енергетичного поля в об'ємі апарата. Максимальна інтенсивність перенесення речовини спостерігається лише в локальній активній зоні, де турбулентність і градієнти швидкостей досягають пікових значень. Для такої специфічної сировини, як суцвіття чорнобривців, де пелюстки мають високий внутрішній дифузійний опір, критично важливо забезпечити умови для багаторазової рециркуляції часток через зони високої енергоємності. Крім цього, додержання постійного оновлення граничного шару розчинника на міжфазній поверхні за рахунок підтримання високого рушійного потенціалу масопереносу в усьому об'ємі екстрактора.



Таким чином, наукове обґрунтування шляхів посилення динамічного імпульсного впливу в активних зонах при мінімізації загальних енерговитрат є ключем до створення високоефективного обладнання для переробки чорнобривців.

*Аналіз останніх досліджень.* Традиційні підходи до інтенсифікації масообмінних процесів у системі «тверде тіло – рідина» базуються на механічному підведенні енергії за допомогою перемішувальних пристроїв різних конструкцій: лопатевих, пропелерних, турбінних і вібраційних [1–3]. Згідно з фундаментальними дослідженнями [4], основний механізм впливу мішалок полягає у створенні тангенціальних, радіальних або осьових потоків, що забезпечують макроперемішування об'єму. Проте при відносно низьких швидкостях навколо рослинної частки формується ламінарний пристінний шар, товщина якого обмежує швидкість дифузії. Лише за умови значного зростання відносної швидкості відбувається перехід до турбулентного режиму, що супроводжується зростанням зсувних напружень і деформацією міжфазної поверхні.

Незважаючи на різноманітність конструкцій, використання класичних проточних апаратів для екстракції біологічної сировини часто є малоефективним. Це пояснюється суттєвою різницею у швидкостях процесів: механічне руйнування часток відбувається майже миттєво, тоді як дифузійний вихід вторинних метаболітів (зокрема лютеїну й ефірних олій чорнобривців) є тривалим процесом [5]. Сучасні світові тенденції (2023–2025 роки) у галузі переробки рослинної сировини, зокрема чорнобривців (*Tagetes erecta* та *Tagetes patula*), демонструють перехід від традиційної мацерації до високоенергетичних методів.

Сучасний стан досліджень у галузі екстрагування вказує на необхідність переходу від загального перемішування до створення локальних мікроактивних зон. Роботи 2024–2025 років активно розглядають ультразвукову екстракцію (UAE) та мікрохвильовий вплив як засоби руйнування клітинних стінок [6; 7]. Проте встановлено, що для промислових масштабів ці методи часто потребують значних витрат енергії або викликають локальний перегрів, що критично для термолабільних каротиноїдів (лютеїну) [8].

Новітні дослідження (2025 рік) указують на те, що створення «мікроактивних зон» навколо кожної частинки квітки є більш енергоефективним, ніж обертання всього об'єму рідини [9]. Подача енергії у формі потужних короткочасних імпульсів дає змогу досягти пікової питомої потужності безпосередньо в місці контакту фаз.

Аналіз публікацій 2024 року підтверджує, що ключовим фактором подолання дифузійного бар'єру є створення відносної швидкості ( $w_0$ ). У стаціонарних потоках частки чорнобривців швидко набувають швидкості середовища, що мінімізує масообмін. У стаціонарних потоках швидкість часток ( $v_d$ ) швидко зрівнюється зі швидкістю середовища ( $v_c$ ), що призводить до занулення відносної швидкості ( $w = 0$ ). У такому стані масообмін лімітується виключно молекулярною дифузією, що критично сповільнює процес.

Доцільним є перехід від постійного введення енергії до імпульсного впливу. Потужні короткочасні імпульси створюють різкі перепади тиску, що дають змогу буквально «виштовхувати» екстрактивні речовини з капілярів рослинної тканини, запобігаючи при цьому термічній деградації чутливих сполук. Тому для інтенсифікації процесу необхідно забезпечити рух екстрагенту з прискоренням ( $g_c = dv_c/dt \neq 0$ ). Це дає можливість динамічно «зривати» насичений прикордонний шар із поверхні кожної пелюстки чорнобривців.

Кінетична модель процесу в сучасних апаратах описується рівнянням масопереносу [10; 11]:

$$M = kS\Delta U, \quad (1)$$

де інтенсифікація досягається синергією збільшення питомої поверхні ( $S$ ) і коефіцієнта переносу ( $k$ ). Використання роторно-пульсаційних систем дає змогу реалізувати ці умови одночасно. Коли період силового впливу на систему є спільномірним із часом релаксації часток,



процес переходить із пасивної дифузії в режим активної конвекції на мікрорівні [9; 12]. Аналіз літератури показує, що найбільш перспективним шляхом підвищення  $k$  є використання масових сил (відцентрових або вібраційних). Оскільки густина чорнобривців і розчинника відрізняється, виникає інерційний ефект, який підтримує високе значення  $w$  навіть у турбулентних середовищах [9–11; 13].

Незважаючи на значний прогрес, залишається недостатньо вивченим питання оптимальної конфігурації роторних вузлів для обробки суцвіть чорнобривців, які мають складну парусну геометрію пелюсток. Це зумовлює необхідність дослідження роторно-пульсаційних апаратів із гвинтовими пазами, які здатні поєднувати транспортувальну функцію з інтенсивним імпульсним впливом.

Максимальна інтенсифікація екстрагування досягається за умови, коли період силового впливу на систему є спільномірним із часом релаксації часток. Це дає змогу трансформувати процес із пасивної дифузії в режим активної мікроконвекції. Саме такий режим реалізується в роторно-пульсаційних апаратах, що й визначило напрям дослідження.

*Формування мети статті (постановка завдання).* Метою роботи є наукове обґрунтування й експериментальне підтвердження ефективності процесу екстрагування біоактивних сполук із суцвіть чорнобривців у роторно-пульсаційному апараті на основі принципу дискретного введення енергії.

Для досягнення поставленої мети вирішено такі завдання:

1. Проаналізувати гідродинамічні умови в робочій зоні РПА й установити вплив сил інерції приєднаної маси на інтенсифікацію масопереносу.
2. Розробити математичну модель руху рослинної частки в потоці екстрагенту з урахуванням конструктивних особливостей гвинтового ротора.
3. Експериментально встановити залежність виходу цільових компонентів від режимних параметрів апарата (частоти обертання ротора й тривалості обробки).
4. Порівняти ефективність запропонованого методу з традиційними способами екстрагування за кінетичними й енергетичними показниками.

*Основна частина.* Об'єктом дослідження слугували висушені суцвіття чорнобривців (*Tagetes patula*), заготовлені в період повного розквіту. Перед екстрагуванням суцвіття надавали попередньому подрібненню до фракції розміром  $d = 2\text{--}5$  мм. Вологість сировини становила не більше ніж 10–12 %. Екстрагент: етиловий спирт 70 %. Співвідношення твердої та рідкої фаз (Т:Р) у дослідах варіювалося в межах від 1:5 до 1:15.

Дослідження проводилися на лабораторній установці, ключовим вузлом якої є роторно-пульсаційний апарат (далі – РПА) циліндричного типу. Ротор: діаметр 200 мм, оснащений гвинтовими пазами для створення осьового прискорення. Нерухома циліндрична решітка з отворами діаметром 2–3 мм. Електродвигун із частотним регулятором, що давав змогу змінювати швидкість обертання ротора в діапазоні від 500 до 3000 об/хв.

Методика проведення екстракції. Процес екстрагування здійснювався за циркуляційною схемою: задана кількість екстрагенту заливалася в робочу ємність і підігрівалася до температури 40–60 °С. Після досягнення температурного режиму в систему вносилися наважка чорнобривців. Включався РПА, що забезпечував інтенсивне перемішування та дискретне введення енергії згідно з описаною теоретичною моделлю. Через рівні проміжки часу (5, 10, 20, 30 хв) відбиралися проби екстракту для визначення вмісту цільових компонентів.

Аналітичні методи. Визначення вмісту сухих речовин в екстракті визначали рефрактометричним методом. Уміст каротиноїдів (лютеїну) вимірювали спектрофотометричним методом при довжині хвилі 450 нм. Математична обробка даних проводилася з використанням методів варіаційної статистики (програмний пакет Excel/Origin), з довірчою ймовірністю  $P = 0,95$ .



Математичне моделювання динаміки часток чорнобривців у потоці екстрагенту. Швидкість екстракції в РПА описується залежністю, де коефіцієнт переносу  $k$  є функцією від критерію Рейнольдса ( $Re$ ), який, у свою чергу, прямо залежить від частоти обертання ротора та геометрії гвинтових пазів. Для опису інтенсифікації масообміну в роторно-пульсаційному апараті розглянули рівняння руху окремої частки рослинної сировини. Зміна швидкості частки  $v_d$  визначається балансом сил [14; 16]:

$$m_d \cdot \frac{dv_d}{dt} = F + F_m + F_g, \quad (2)$$

де ключову роль для нашого апарата відіграють сила інерції приєднаної маси ( $F_m$ ) і сила гідродинамічного опору ( $F$ ). Оскільки ми використовуємо ротор із гвинтовими пазами, він створює різкі прискорення потоку. Частка чорнобривця змушена затягувати за собою екстрагент. Для складної форми пелюсток коефіцієнт  $k_m$  буде значно вищим за 0,5 (сферичне значення), що збільшує динамічний вплив на клітинну оболонку. Сила гідродинамічного опору ( $F$ ) залежить від квадрата відносної швидкості  $w^2$ . У нашому РПА завдяки вузькому зазору між ротором і решіткою  $w$  досягає максимальних значень, що призводить до здирання дифузійного шару з поверхні квітки.

У процесі екстрагування чорнобривців на кожну частинку в потоці діє комплекс сил, що визначає її траєкторію та швидкість омивання розчинником. Сила інерції приєднаної маси –  $F_{add}$  або  $F_m$ . Найважливіша сила – в умовах пульсацій, що створюються гвинтовим ротором. Коли ротор проганяє суміш крізь отвори, швидкість рідкої фази ( $v_c$ ) змінюється стрибкоподібно. Частинка чорнобривця не може миттєво змінити свою швидкість через інерцію, але вона «тягне» за собою певний об'єм рідини – приєднану масу ( $m_{add}$ ).

$$F_{add} = m_{add}dw/dt. \quad (3)$$

Оскільки швидкість у пазах ротора змінюється за мілісекунди, похідна  $dw/dt$  набуває величезних значень. Це створює динамічний удар, який не просто перемішує, а буквально «стискає та розтискає» капіляри пелюсток чорнобривців, прискорюючи вихід лютеїну. Складова сили гравітації й Архімеда ( $F_{gx}$ ) враховує різницю густин між рослинною тканиною та екстрагентом. Відповідно:

$$F_{gx} = V_d(p_d - p_c)g_x. \quad (4)$$

У звичайному відстійнику пелюстки чорнобривців можуть спливати або осідати (залежно від розчинника). У нашому апараті, де діють високі прискорення, ця сила врівноважується турбулентними пульсаціями. Однак велика різниця густин ( $p_d - p_c$ ) сприяє тому, що частка «відстає» від потоку, збільшуючи відносну швидкість  $w$ .

Сила гідродинамічного опору ( $F$ ) – це сила безпосереднього «тертя» розчинника об поверхню квітки. Оскільки використовується ротор із гвинтовими пазами, потік набуває складного закрученого характеру. Сила опору, що залежить від площі міделевого перерізу ( $S_m$ ), у випадку пелюсток чорнобривців є дуже значною через їхню неправильну, «парусоподібну» форму. Високий опір призводить до інтенсивного відведення дифузійного шару. Щойно молекула цільової речовини виходить із пори рослини, сила  $F$  миттєво «змиває» її в загальний об'єм екстрагенту.

Підставляючи значення сил у загальне рівняння руху, ми отримуємо диференціальну модель, яка пояснює переваги вибраного методу. Гвинтові пази ротора створюють постійну зміну швидкості  $v_c$ . Відповідно, це генерує силу  $F_m$ , яка пропорційна прискоренню  $dw/dt$ . Це означає, що кожна пульсація в апараті створює миттєвий стрибок тиску всередині капілярів чорнобривців. Циліндрична решітка виступає як турбулізатор. Коли частка проходить крізь отвори решітки, коефіцієнт опору  $\varnothing$  різко зростає через зміну числа Рейнольдса.



Якщо підставити всі розписані нами складові, ми отримуємо повну картину:

$$\frac{dv_d}{dt} = \frac{3 \rho_c \emptyset}{3 \rho_d R} \omega^2 + \frac{1 \rho_c}{2 \rho_d} \frac{d\omega}{dt} + g \left( 1 - \frac{\rho_c}{\rho_d} \right). \quad (5)$$

Ця формула (5) доводить, що зміна швидкості частинки ( $dv_d/dt$ ) впливає на швидкість екстракції. У апараті регулюється трьома важелями: розміром часток чорнобривців, що прямо впливає на градієнт швидкості ( $dw/dt$ ) та конструкцією пазів. Вони визначають коефіцієнт опору ( $\emptyset$ ).

Вплив динамічних параметрів на інтенсивність масопереносу.

Для опису процесу екстрагування ми використовуємо основне рівняння масообміну (1), яке в загальному вигляді визначає швидкість виходу цільових компонентів із чорнобривців:

$$dM/dt = kS(C_{nas} - C). \quad (6)$$

Використовуючи отримані раніше дані про сили та відносну швидкість  $w$ , проаналізуємо, як робота РПА з гвинтовим ротором впливає на кожен множник цього рівняння. Згідно з теорією пограничного шару, коефіцієнт  $k$  прямо залежить від числа Рейнольдса ( $Re_d = wd/v$ ), де  $w$  – та сама відносна швидкість, яку ми розраховували через баланс сил. Завдяки силі інерції приєднаної маси ( $F_{add}$ ) та пульсаціям, значення  $w$  у РПА є на порядок вищим, ніж у звичайних екстракторах. Це призводить до різкого зменшення товщини дифузійного прикордонного шару навколо пелюстки чорнобривця.

Хоча ми розглядаємо екстрагування, у РПА паралельно відбувається процес диспергування. Сила гідродинамічного опору ( $F$ ) і напруження зсуву в зазорі між ротором і решіткою призводять до подрібнення часток чорнобривців до оптимального розміру. Збільшення площі контакту  $S$  без надмірного руйнування структури, що могло б ускладнити подальшу фільтрацію.

Гвинтові пази ротора забезпечують інтенсивне макроперемішування по всій висоті циліндричної камери. Це дає змогу миттєво відводити екстраговані речовини від поверхні частки в об'єм розчинника, підтримуючи концентрацію  $C$  біля поверхні на мінімальному рівні. Таким чином, різниця потенціалів ( $C_{nas} - C$ ) залишається максимальною протягом усього циклу обробки.

Фундаментальною особливістю екстрагування чорнобривців у роторно-пульсаційному апараті є перехід від статичного перемішування до динамічного імпульсного впливу. Математично цей взаємозв'язок реалізується через інтеграцію рівняння руху частки в критеріальне рівняння масопереносу [14; 15]. Шляхом інтеграції гідродинамічних характеристик потоку в кінетичне рівняння (6) ми отримуємо нестационарну модель масопереносу. Вона базується на тому, що ключовий параметр інтенсифікації – коефіцієнт масопереносу  $k$  – перестає бути статичною величиною й перетворюється на функцію часу та просторового положення частки в апараті. Математично цей зв'язок реалізується через число Рейнольдса ( $Re_d$ ), яке визначає режим омивання пелюсток чорнобривців екстрагентом:

$$k(t) = D/d_a Sh = D/d_a f(Re_d(t), Sc), \quad (7)$$

де  $D$  – коефіцієнт молекулярної дифузії;  $Sh$  – число Шервуда;  $Sc$  – число Шмідта;  $Re_d(t) = w(t) d_a/v$  – нестационарне число Рейнольдса.

Оскільки відносна швидкість  $w(t)$  постійно змінюється внаслідок диференціального рівняння руху (5), ми спостерігаємо такі фізико-математичні ефекти: динамічна зміна коефіцієнта  $k$  та подолання дифузійного опору. Підставляючи значення швидкості  $w$  з рівняння (5) у рівняння (6), отримуємо модель, де швидкість переходу маси  $dM/dt$  пульсує синхронно з проходженням частки крізь гвинтові пази ротора. Нестационарність потоку спричиняє періодичне

стискання та «зривання» прикордонного дифузійного шару. Кожна зміна швидкості в гвинтовому каналі генерує новий імпульс масопереносу, що дає змогу підтримувати високий градієнт концентрації безпосередньо біля поверхні рослинної тканини. Підсумкове рівняння набуває вигляду:

$$dM/dt = f(dv_c/dt, w)S(C_{nas} - C). \quad (8)$$

Побудована нестационарна модель (8) доводить, що основний внесок в інтенсифікацію екстрагування в РПА робить не середнє значення швидкості, а її похідна за часом (прискорення). На рисунку 1 подано графік нестационарної швидкості масопереносу  $dM/dt$  в роторно-пульсаційному апараті під час екстрагування чорнобривців.

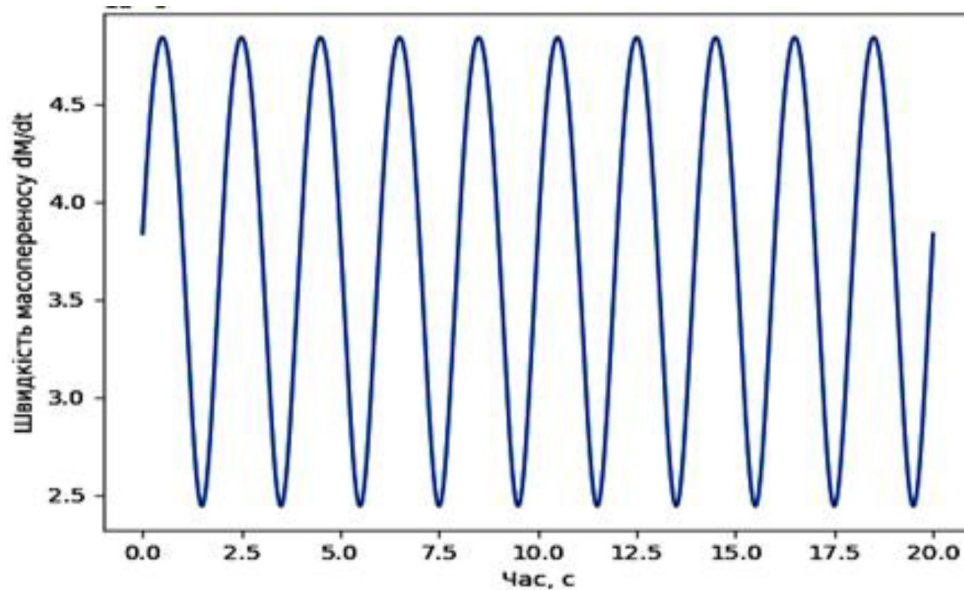


Рис. 1. Графік нестационарної швидкості масопереносу  $dM/dt$

З рис. 1 видно, що швидкість масопереносу  $dM/dt$  змінюється періодично внаслідок пульсаційної зміни відносної потоку  $w(t)$ , що зумовлює коливання числа Рейнольдса й коефіцієнта масопереносу  $k(t)$ . Пікові значення відповідають моментам інтенсифікації омивання частинок і руйнування прикордонного дифузійного шару, тоді як мінімальні – фазам зниження гідродинамічного впливу. Таким чином, графік підтверджує імпульсний механізм підвищення ефективності масопереносу в динамічному режимі.

Це дає змогу перевести процес із повільної молекулярної дифузії в режим примусової конвекції на рівні мікропор рослинної сировини. Таким чином, використання РПА з гвинтовим ротором дає змогу максимізувати ліву частину рівняння руху  $dv_a/dt$ , відповідно, призводить до інтенсивної деформації частинок чорнобривців, що руйнує внутрішні структури клітини та прискорює вихід цільових компонентів (лютеїну) у 5–8 разів порівняно зі стаціонарним перемішуванням.

*Висновки.* У результаті дослідження процесу екстрагування біоактивних сполук із суцвіть чорнобривців у роторно-пульсаційному апараті (РПА) з гвинтовим ротором встановлено, що інтенсифікація масообміну в системі «чорнобривці – екстрагент» досягається завдяки принципу дискретного введення енергії. Створення локальних активних зон із високим рівнем питомої потужності дає змогу мінімізувати час обробки сировини за рахунок миттєвого руйнування прикордонного дифузійного шару.

Розроблено математичну модель руху часток рослинної сировини, яка враховує комплекс гідродинамічних сил. Доведено, що використання ротора з гвинтовими пазами генерує зна-



чні сили інерції приєднаної маси ( $F_{add}$ ) та високу відносну швидкість фаз ( $w$ ), що є первинним фактором прискорення виходу цільових компонентів.

#### Список використаних джерел

1. Stadnyk I., Piddubnyy V., Kravchenko M., Rybchuk L., Kolomiets O., Danylo S. ADHESION OF MARZIPAN PASTES BASED ON DRY DEMINERALIZED WHEY 1160. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2020. Vol. 14. P. 1149–1160. DOI: <https://doi.org/10.5219/1351>
2. Коновалова В. А., Касьянов Г. І., Данильченко С. В. та ін. Екстракційні технології у фармації : підручник. Київ : Наукова думка, 2021. 320 с.
3. Stadnyk I., Piddubnyi V., Mykhailyshyn R., Petrychenko I., Fedoriv V., Kaspruk V. The Influence of Rheology and Design of Modeling Rolls On the Flow and Specific Gravity During Dough Rolling and Injection. *Journal of Advanced Manufacturing Systems*. 2022. № 22(02). P. 403–421. DOI: <https://doi.org/10.1142/s0219686723500208>
4. Бурдо О. Г., Терзів С. Г. Кінетика масопереносу в технологіях екстрагування цільових компонентів із фітосировини. *Наукові праці ОНАХТ*. 2020. Вип. 84, Т. 1. С. 12–18.
5. Мальований М. С. Дячок В. В. Екстрагування суміші рослинної сировини. Розрахунок процесу, *Хімічна промисловість України*. 2010. № 4. С. 17–21.
6. Stadnyk I., Piddubnyi V., Krsnozhon S., Antoshkova N. INFLUENCE OF REDUCTION ON ADHESIVE PROPERTIES. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2020. Vol. 14. P. 76–87. DOI: <https://doi.org/10.5219/1195>
7. Кравич А. С. Екстрагування біологічно активних речовин з біомаси *Gladiolus Imbricatus* культивованій в умова in vitro : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / Національний університет «Львівська політехніка». Львів, 2016. С. 159.
8. Буннун П., Туньяситикун П., Кловутімон В., Шотіпрук А. Отримання вільного лютеїну шляхом одночасної екстракції та деестерифікації квіток чорнобривців у зрідженій суміші диметилового ефіру (ДМЕ)–КОН–EtOH. *Переробка харчових продуктів та біопродуктів*. 2017. Вип. 106. С. 193–200. DOI: 10.1016/j.fbp.2017.10.002
9. Налаваде П. Б., Гаджар А. К. Мікроінкапсуляція лютеїну, екстрагованого з квіток чорнобривців прямостоячих (*Tagetes erecta* L.), з використанням повного факторіального дизайну. *Журнал науки та технології доставки ліків*. 2016. № 33. P. 75–87. DOI: 10.1016/j.jddst.2016.03.012
10. Zhao L., et al. Comparative analysis of extraction technologies for plant extracts: from traditional to green methods. *Frontiers in Chemistry*. 2025. № 13.
11. Сурендранатх Р., Ганга М., Джавахарлал М., Аніта К. Екстракція та кількісне визначення лютеїну чорнобривців з використанням різних систем розчинників. *Міжнародний журнал фармацевтичних наук. Огляд та дослідження*. 2016. № 37. С. 187–191.
12. Narkprasom N., et al. Optimization for Lutein Extract and Antioxidant Activity from Marigold using safe and green solvents. *BUU Science Journal*. 2025.
13. Chen X., et al. Characterization of Marigold Flower Extracts: Ultrasound-Assisted Extraction and subsequent encapsulation. *MDPI Foods*. 2024. № 13(15).
14. Patel H., Mandle N. Comparative Study of Extraction Methods for Enhancing the Yield of Phytochemicals. *IJPHDT*. 2025. № 2(4).
15. Сидорчук В. М., Іваненкою О. П. Математичне моделювання біотехнологічних процесів : навч. посіб. Харків : НТУ «ХПІ», 2022. 256 с.
16. 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.
17. Ghitescu R. E., Volf I., Carausu C., Popa V. I. Optimization of a polyethylene glycol-assisted extraction of polyphenols from spruce wood bark. *Industrial Crops and Products*. 2021. № 167. P. 113–125.

Дата першого надходження статті до видання: 14.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 12.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026

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





**I. Belova<sup>1</sup>, V. Hidzhelitskyi<sup>2</sup>, I. Stadnyk<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Institute of Innovation, Environmental Management and Infrastructure of the Western Ukrainian National University*

<sup>2</sup> *Kyiv Cooperative Institute of Business and Law*

<sup>3</sup> *Ternopil Ivan Pulyuy National Technical University*

## **INTENSIFICATION OF MARIGOLD EXTRACTION VIA DISCRETE ENERGY INPUT IN A ROTARY-PULSATION APPARATUS**

### ***Summary***

The article investigates the intensification of bioactive compound extraction from marigold inflorescences (*Tagetes patula*) using a cylindrical rotary-pulsation apparatus (RPA) with a screw rotor. The application of discrete pulse energy input (DPEI) is scientifically justified to enhance mass transfer rates. Based on the particle motion equation, the role of added mass inertia forces and hydrodynamic resistance in disrupting the boundary diffusion layer is determined. The design features of the RPA ensure high relative phase velocity, significantly reducing extraction time compared to traditional methods while maintaining high yields of target components at optimal energy costs. A fundamental feature of the process in the RPA is the transition from stationary mixing to dynamic impulse action. This relationship is mathematically modeled by integrating the particle motion equation into the mass transfer criteria equation. The study substantiates a shift in the process mechanism: from slow molecular diffusion to forced convection within the micropores of the plant material.

The creation of local active zones with high specific power levels enables the minimization of processing time due to the instantaneous destruction of the boundary diffusion layer. Intense particle deformation disrupts intracellular structures and accelerates the release of target components, specifically lutein. Consequently, the process duration is reduced by 5–8 times compared to conventional stationary mixing. The findings demonstrate the high efficiency of the proposed technology for obtaining natural antioxidants for food and pharmaceutical applications.

**Keywords:** marigolds, extraction, rotary-pulsation apparatus, discrete pulse energy input, added mass, relative velocity, mass transfer intensification, diffusion phase impact.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-27>

UDC 637.5.037

A. O. Helikh, Ph.D., Associate Professor

Pang Yongfeng, Ph.D. student

*Sumy National Agrarian University*e-mail: [anna.helikh@snau.edu.ua](mailto:anna.helikh@snau.edu.ua)

ORCID: 0000-0003-3769-1231

ORCID: 0009-0003-6573-139X

## INNOVATIVE TECHNOLOGY FOR DOUGH SHELLS IN MINCED SEMI-FINISHED PRODUCTS BASED ON THE SYNERGY OF GLUTEN-FREE RAW MATERIALS AND MICROALGAE PROTEIN ISOLATE FOR MILITARY AND HEALTHY DIET

*Summary.* This research presents a comprehensive theoretical and experimental framework for advancing the technology of dough shells used in dual-use minced semi-finished products, specifically tailored for military rations and crisis-resilient nutrition. We have scientifically validated the integration of a protein isolate derived from the microalga *Euglena gracilis* alongside a selection of gluten-free plant materials, including rice, white lupin, flaxseed flour, and corn starch. This strategic formulation is designed to enhance both the nutrient density and biological value of the final product. Furthermore, it addresses a critical gap in specialized nutrition by catering to individuals suffering from gluten intolerance or stress-induced exacerbations of celiac disease.

In evaluating the functional, technological, and rheological performance of these model dough systems, our findings highlight a significant synergy between white lupin flour and the microalgae isolate. This interaction provides the structural and mechanical resilience necessary to maintain the integrity of the dough shells under the rigors of extreme logistics, deep freezing, and field-based thermal processing. By identifying the optimal balance between protein fortifiers and structure-forming agents, we have established a robust production technology for high-energy, special-purpose dough shells. Comprehensive assessments of organoleptic, physicochemical, and safety parameters further confirm that this technology offers an effective solution for ensuring sustainable nutrition and food security in demanding environments.

*Keywords:* alternative proteins, microalgae protein isolate, *Euglena gracilis*, flour-based dough shells, military nutrition, crisis-resilient nutrition, gluten-free diet, white lupin flour.

*Problem Statement.* In the current landscape of societal development, particularly under the pressures of martial law and ongoing crisis, there is an urgent demand for advanced, science-driven solutions in specialized food production. The primary objective is to develop sustainable military rations that integrate high nutrient density and ease of consumption with the resilience required for extreme logistical environments. While minced meat semi-finished products are essential to these rations, a significant technological hurdle remains: ensuring the structural and mechanical durability of their dough shells during freezing, transit, and thermal preparation in field conditions.

At the same time, the challenge of food intolerances has become increasingly critical. Intense and chronic stress can lead to the exacerbation of gastrointestinal conditions among both military personnel and civilians. Current statistics indicate that celiac disease affects approximately 1 in 200 people in Ukraine, with a notable upward trend in recent years. For these individuals, a strict gluten-free diet is the only effective means of restoring physical function and maintaining quality of life. Consequently, the development of gluten-free rations has evolved beyond a mere medical requirement into a vital element of food security and the operational readiness of personnel with specific dietary needs.

However, many commercial gluten-free products currently fall short, often characterized by low levels of complete proteins and vitamins, poor organoleptic quality, and excessive brittleness. While research suggests that raw materials such as rice, sorghum, and flaxseed flours, along with corn starch,



offer promising functional and nutritional benefits, their effective application remains a challenge. In Ukraine, although the production of such specialized foods is strictly governed by safety and quality regulations, market analysis reveals frequent non-compliance, including low protein content, short shelf lives, and high costs.

To meet the rigorous standards of military nutrition, dough formulations must be fortified with high-quality proteins to support rapid physical recovery. A transformative solution lies in the use of protein isolate from the microalga *Euglena gracilis*. Integrating this isolate into gluten-free dough not only elevates the product's biological value through essential amino acids and immunomodulating  $\beta$ -glucans but also creates a synergy with flaxseed flour that enhances elasticity and plasticity. This ensures the stability and balance of the final product. Given the vital need for balanced, specialized nutrition, refining the technology for gluten-free dough shells using plant-based materials and microalga isolates stands as a critical task for modern food science.

*Analysis of Recent Research.* The design of military rations and the maintenance of food security during crises require the development of specialized products that offer both high nutrient density and an extended shelf life [1]. Under the constant stress of martial law, the prevalence of gastrointestinal disorders among both soldiers and civilians has become an acute concern [2]. Current statistics show that celiac disease affects approximately 1 in 200 people in Ukraine, with a clear upward trend in recent years. To date, the only viable and accessible method to stabilize a patient's condition and normalize digestive function is the lifelong adherence to a specialized diet centered on gluten-free cereals and flours [3].

Extensive research by both domestic and international scholars has evaluated the potential of various plant-based raw materials for these purposes. Literature reviews consistently identify rice flour, sorghum, amaranth, flaxseed flour, and corn starch as the most effective components for specialized food production [4]. Studies on model dough systems involving white lupin flour have garnered particular interest. For instance, it has been observed that the monolithic particles in amaranth-where starch is tightly bound to protein-contribute essential elasticity to the dough. Furthermore, research suggests that a 1:1 ratio of rice flour to starch optimizes moisture levels and soaking properties while enhancing the product's overall sensory appeal [5]. Similarly, the inclusion of flaxseed flour has been shown to improve viscosity and elastic properties, while the chemical profile of sorghum continues to be a major focus of scholarly investigation [6].

Despite these advancements, perfecting the quality of gluten-free products remains a global challenge for the food industry [7]. Achieving superior physicochemical and organoleptic standards is a complex undertaking. A specific technical hurdle is the creation of a durable dough shell capable of surviving extreme logistics; such a shell must resist cracking during both low-temperature storage and the rigors of boiling [8].

To address protein deficiencies and provide the necessary structural integrity, the use of microalgae proteins has emerged as a groundbreaking innovation. Current research demonstrates that integrating an isolate from *Euglena gracilis* significantly enhances the microstructure of gluten-free dough [9]. The unique protein profile of *Euglena*, combined with its storage polysaccharide, paramylon ( $\beta$ -1,3-glucan), functions as a high-performance hydrocolloid [10]. This synergy provides the system with exceptional water-holding capacity, stabilizes the starch matrix of rice and corn, and results in a highly elastic dough shell [11]. Additionally, the presence of  $\beta$ -glucans introduces vital immunomodulatory properties—a key requirement for functional military nutrition [12].

Today, improving gluten-free technology has moved beyond simple dietetics; it is now a matter of strategic importance for food security and military readiness [13]. Creating a durable gluten-free matrix that remains stable through freezing and field processing is a formidable task [14]. Therefore, advancing the technology of dough shells for crisis-resilient semi-finished products—through the

innovative combination of plant materials and microalgae protein isolates-is both a timely and essential mission [15].

*Formulation of the Article's Aim.* The aim of this study is to improve the technology of dough shells for minced semi-finished products designed for military rations and use in crisis situations.

*Main part.* Since the chemical composition of GFRM directly affects the functional, technological, and rheological properties of dispersed systems, and consequently, the structural and mechanical strength of dough shells under extreme logistical conditions, the next stage involved a study of their chemical composition. Additionally, an innovative functional protein additive-protein isolate from the microalga *Euglena gracilis*-was introduced to the GFRM complex. The research results are presented in Table 1.

Table 1

Chemical composition of GFRM and *Euglena gracilis* microalgae protein isolate ( $\alpha = 0,05$ )

Name	Moisture, %	Protein, %	Carbohydrates, %	Fat, %	Ash, %
Rice flour	10.6	7.9	78.6	2.5	0.4
White lupin flour	8.5	38.5	16.0	9.5	3.5
Flaxseed flour	6.0	33.8	36.5	18.9	4.8
Amaranth flour	6.9	8.6	75.3	6.4	2.8
Corn starch	11.3	1.0	87.3	0.1	0.3
<i>Euglena gracilis</i> isolate	5.2	68.5	15.3	6.5	4.5

The analytical data reveal that flaxseed and white lupin flours are distinguished by an elevated protein content, a factor that directly drives their superior structure-forming capabilities. When integrated with the *Euglena gracilis* microalgae protein isolate-which boasts a remarkable purity of 98.5 % protein-these raw materials act in synergy to establish a robust protein framework. This structural network effectively compensates for the absence of gluten while ensuring the high nutrient density essential for military nutrition. However, it is noteworthy that the increased fat content in these specific flours may pose limitations for large-scale applications where long-term storage is a primary concern.

In contrast, rice flour, amaranth, and corn starch contribute a high concentration of starch polysaccharides. Their ability to gelatinize even at lower temperatures provides the model dough systems with necessary rheological flexibility, balances the caloric profile, and enriches the product with highly digestible carbohydrates.

The dynamics of biochemical transformations occurring during the kneading process are closely correlated with the functional and technological properties of the raw materials. Specifically, indicators such as Fat-Binding Capacity (FBC), Water-Absorption Capacity (WAC), Water-Holding Capacity (WHC), and Fat-Holding Capacity (FHC) serve as the scientific basis for optimizing kneading parameters. To ensure consistency, all experimental studies were conducted at a controlled temperature of  $23 \pm 2$  °C.

Experimental data reveal that among the plant-based raw materials studied, flaxseed flour exhibits superior Water-Holding Capacity (WHC), Fat-Holding Capacity (FHC), and Water-Absorption Capacity (WAC). Notably, the maximum Fat-Binding Capacity (FBC) of 122 % was recorded in white lupin flour. The introduction of microalgae protein isolate significantly amplifies the system's water-absorption properties, with WAC reaching a peak of 310 %. These findings are fundamentally linked to the ratio of key biopolymers and the fractional composition of the proteins. Specifically, the high concentration of water-soluble proteins-with albumins reaching up to 44 % and 57 %-combined with hydrophilic non-starch polysaccharides in flaxseed, amaranth, and white lupin flours, drives these maximum WAC and swelling values. In contrast, the prevalence of starch polysaccharides and



Table 2

Functional and technological properties of GFRM and *Euglena gracilis* microalgae protein isolate ( $\alpha = 0,05$ )

Name	WHC, %	FBC, %	FHC, %	WAC, %
Wheat flour (control)	89.3	109.0	91.4	109.0
Rice flour	93.5	107.6	82.2	146.0
Amaranth flour	89.9	108.7	91.3	182.0
White lupin flour	115.1	122.0	95.4	188.0
Flaxseed flour	124.3	115.0	110.3	289.0
Corn starch	77.3	102.0	80.1	103.6
<i>Euglena gracilis</i> protein isolate	135.0	110.0	105.0	310.0

alcohol-soluble protein fractions (glutenins) in rice flour, along with the hydrophobic amino acid profile found in wheat flour, results in comparatively lower WAC and FBC values [12].

These results underscore the strategic importance of incorporating rice, amaranth, and white lupin flours into gluten-free formulations. This selection is further validated by our analysis of chemical composition and structural-mechanical performance. The prospect of combining white lupin flour with microalgae protein isolate is particularly promising, as it substantially enhances the mixture's functional properties. This synergy is driven by high WHC, FHC, and WAC, alongside the presence of lipids,  $\beta$ -glucans, and pentosans [15]. Together, these components exert a crucial cryoprotective effect, increasing dough plasticity and preventing structural failure during processing or storage.

Special consideration must be given to how the *Euglena gracilis* isolate influences the organoleptic profile of the dough shells. Due to the natural pigment composition of the microalgae, including residual chlorophyll and carotenoids, the isolate imparts a distinct light greenish tint to the dough. Within the context of military-grade rations, this color shift is viewed as a positive attribute. It functions as a natural visual marker of high nutrient density—a «military-style» aesthetic—that allows for easy product identification without the need for synthetic dyes. Finally, to ensure full compliance with «Food Safety» regulations, the developed dough shells were tested against rigorous standards for toxic elements and radionuclides, with the results detailed in Table 3.

Table 3

Hygienic requirements and safety indicators of dough shells

Substance (Element)	Maximum Permissible Level, mg/kg (for radionuclides – Bq/kg)	Test Results
Toxic elements: Lead	0.5	Not detected
Arsenic	0.1	Not detected
Cadmium	0.05	Not detected
Mercury	0.03	Not detected
Radionuclides: Cesium-137	200	Not detected

The safety analysis confirms that the developed dough shells are entirely free from toxic elements or radionuclides that could pose a risk of food poisoning or toxicosis. These results validate the product's suitability for human consumption, even under the physiological strain of crisis conditions.

Beyond safety, the practical application of this technology is highly promising for military and emergency logistics. Given the rigorous demands of military nutrition and the frequent lack of stable refrigeration (cold chain) in conflict zones, these dough shells are ideally suited for advanced dehydration methods, such as freeze-drying or convective drying. Utilizing these techniques extends the shelf life of the product to between 12 and 24 months, even under unregulated storage temperatures. This exceptional stability ensures that the dough shells fully meet the stringent requirements for special-purpose rations, providing a reliable and nutritious food source where it is needed most.



**Conclusions.** The synthesis of theoretical and experimental research presented in this study offers a viable solution to the pressing challenge of enhancing dough shell technology for dual-use semi-finished products. Our findings lead to the following key conclusions:

Experimentally substantiated the effectiveness of combining a gluten-free flour mix (rice, flaxseed, amaranth, white lupin, and corn starch) with *Euglena gracilis* protein isolate. The research establishes that the synergy between white lupin flour and the high-purity isolate (98.5 % protein) creates a robust protein framework that successfully compensates for the structural absence of gluten.

The integration of flaxseed flour and microalgae isolate remarkably amplifies the system's water-absorption capacity (with the isolate reaching 310 %), as well as its water-holding and fat-holding capacities.

Comprehensive sanitary-chemical and radiological assessments confirm that the developed dough shells fully comply with international food safety standards. No toxic elements or radionuclides were detected, ensuring the product's safety for human consumption.

The application of dehydration technology extends the product's shelf life to 12–24 months under unregulated storage temperatures. This exceptional durability makes it an ideal component for specialized rations in demanding environments.

In summary, the developed dough shells represent a high-quality, structurally stable, and biologically valuable advancement in food technology. This innovation not only contributes to national food security but also significantly expands the range of specialized nutrition available to military personnel and individuals with gluten intolerance.

### Bibliography

1. The role of plant-based alternative foods in sustainable and healthy food systems: Consumption trends in the UK / C. Alae-Carew, R. Green, C. Stewart et al. *Science of The Total Environment*. 2022. Vol. 807. Art. 151041. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151041>
2. Biochemical profile of Dunaliella isolates from different regions of Iran with a focus on pharmaceutical and nutraceutical potential applications / M. Araj-Shirvani, M. Honarvar, M. Jahadi, M. Mizani. *Food Science & Nutrition*. 2024. Vol. 12, no. 7. P. 4914–4926. DOI: <https://doi.org/10.1002/fsn3.4137>
3. Microalgae as source of functional ingredients in new-generation foods: Challenges, technological effects, biological activity, and regulatory issues / V. P. Barros de Medeiros, W. K. A. da Costa, R. T. da Silva et al. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2022. Vol. 62, no. 18. P. 4929–4950. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1879729>
4. Impact of four different *Chlorella vulgaris* strains on the properties of durum wheat semolina pasta / M.-C. Baune, T. Lickert, F. Schilling et al. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, no. 19. Art. 8760. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14198760>
5. The potential of microalgae and their biopolymers as structuring ingredients in food: A review / T. M. M. Bernaerts, L. Gheysen, I. Foubert et al. *Biotechnology Advances*. 2019. Vol. 37, no. 8. Art. 107419. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2019.107419>
6. Microalgal biomass as a (multi)functional ingredient in food products: Rheological properties of microalgal suspensions as affected by mechanical and thermal processing / T. M. M. Bernaerts, A. Panozzo, V. Doumen et al. *Algal Research*. 2017. Vol. 25. P. 452–463. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.05.014>
7. Algae: A promising and sustainable protein-rich food ingredient for bakery and dairy products / P. Bhatnagar, P. Gururani, A. Parveen et al. *Food Chemistry*. 2024. Vol. 441. Art. 138322. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.138322>
8. Iron from co-encapsulation of defatted *Nannochloropsis oceanica* with inulin is highly bioavailable and does not impact wheat flour shelf life or sensorial attributes / R. Bhatnagar, X.-G. Lei, D. Miller, O. Padilla-Zakour. *Foods*. 2023. Vol. 12, no. 3. Art. 675. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12030675>
9. Lupin: An emerging food allergen in the United States / T. A. Bingemann, C. B. Santos, A. F. Russell, A. Anagnostou. *Annals of Allergy, Asthma & Immunology*. 2019. Vol. 122. P. 8–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anai.2018.09.467>



10. Microalgae-based polysaccharides: Insights on production, applications, analysis, and future challenges / P. A. Caetano, T. C. do Nascimento, A. S. Fernandes et al. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2022. Vol. 45. Art. 102491. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102491>
11. Effect of germination on fatty acid profile, amino acid profile and minerals of amaranth (*Amaranthus* spp.) grain / A. Chauhan, N. Kumari, D. Saxena, S. Singh. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2022. Vol. 16. P. 1777–1786.
12. Proteins from pseudocereal seeds: Solubility, extraction, and modifications of the physicochemical and techno-functional properties / A. B. T. Constantino, E. E. Garcia-Rojas. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2022. Vol. 102. P. 2630–2639.
13. Lupin proteins: Structure, isolation and application / S. Shrestha, L. van 't Hag, V. S. Haritos, S. Dhital. *Trends in Food Science & Technology*. 2021. Vol. 116. P. 928–939. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.08.035>
14. Nutritional facts, bio-active components and processing aspects of pseudocereals: A comprehensive review / P. Thakur, K. Kumar, H. S. Dhaliwal. *Food Bioscience*. 2021. Vol. 42. Art. 101170.
15. Effect of food matrix and thermal processing on the performance of a normalised quantitative real-time PCR approach for lupine (*Lupinus albus*) detection as a potential allergenic food / C. Villa, J. Costa, C. Gondar et al. *Food Chemistry*. 2018 Vol. 262. P. 251–259. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.04.079>

Дата першого надходження статті до видання: 10.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 05.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026

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



**А. Геліх, Пан Юнфень**

Сумський національний аграрний університет

## **ІННОВАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ТІСТОВИХ ОБОЛОНОК ДЛЯ ФАРШЕВИХ НАПІВФАБРИКАТІВ НА ОСНОВІ ПОЄДНАННЯ БЕЗГЛЮТЕНОВОЇ СИРОВИНИ ТА ІЗОЛЯТУ БІЛКА МІКРОВОДОРОСТЕЙ ДЛЯ ВІЙСЬКОВИХ РАЦІОНІВ ТА ХАРЧУВАННЯ У КРИЗОВИХ СИТУАЦІЯХ**

### **Анотація**

Виконані комплексні дослідження, що дозволяють теоретично та експериментально обґрунтувати удосконалення технології тістових оболонок для фаршевих напівфабрикатів подвійного призначення – для раціонів військового харчування та використання у кризових ситуаціях. Науково обґрунтовано доцільність введення ізоляту білка мікродорості Евлени (*Euglena gracilis*) у комплексі з безглютеновою рослинною сировиною (рисовим, білого люпину, лляним борошном та кукурудзяним крохмалем) як фізіологічно-функціональних інгредієнтів. Таке композиційне рішення спрямоване на підвищення нутрієнтної щільності та біологічної цінності продукту, а також задоволення потреб споживачів зі стрес-індукованими загостреннями целіакії та непереносимістю глютену. Досліджено функціонально-технологічні та реологічні властивості модельних тістових систем. Встановлено, що синергія борошна білого люпину та ізоляту мікродоростей забезпечує необхідну структурно-механічну міцність тістових оболонок, що гарантує збереження їх цілісності під час екстремальної логістики, заморожування та термічної обробки в польових умовах. Визначено оптимальне співвідношення білкових збагачувачів та структуроутворюючих компонентів у рецептурі. Розроблено комплексну технологію виробництва високоенергетичних тістових оболонок для фаршевих напівфабрикатів спеціального призначення. Досліджено органолептичні та фізико-хімічні показники, а також основні показники безпеки тістових оболонок, що підтверджують його ефективність для забезпечення продовольчої безпеки та сталого харчування.

**Ключові слова:** альтернативні білки, ізолят білка мікродоростей, *Euglena gracilis*, борошняні тістові оболонки, військове харчування, кризостійке харчування, безглютенова дієта, борошно люпину білого.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-28>

УДК 664.2:663.12

В. А. Гніцевич, д-р техн. наук

К. А. Доронін, аспірант

*Державний торговельно-економічний університет*

e-mail: v.gnitsevych@knu.edu.ua

ORCID: 0000-0002-6089-1082

ORCID: 0009-0001-1302-439X

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ФЕРМЕНТАЦІЇ ХУМУСУ СТАРТОВИМИ КУЛЬТУРАМИ

*Анотація.* У статті наведено результати дослідження параметрів процесу ферментації хумусу із застосуванням стартових культур молочнокислих бактерій. Обґрунтовано доцільність використання керованої ферментації для покращення фізико-хімічних та сенсорних властивостей продукту. Досліджено вплив дози стартової культури, температури та тривалості ферментації на динаміку кислотності та накопичення ароматичних сполук у хумусі. Встановлено закономірності зміни рН та інтенсивності утворення діацетилю в умовах холодної ферментації. Показано, що ферментація за температури 2...6 °С забезпечує стабільний перебіг мікробіологічного процесу без різкого підвищення кислотності. Визначено раціональні параметри ферментації, які дозволяють керовано формувати смак і аромат хумусу та підвищувати його споживчу привабливість.

*Ключові слова:* молочнокисле бродіння, бобові культури, холодна ферментація, кислотність, діацетил, ароматичний профіль, функціональні продукти, пастоподібні системи.

*Постановка проблеми.* У світовій практиці харчових технологій спостерігається стійка тенденція до розширення асортименту ферментованих продуктів рослинного походження, що зумовлено зростанням попиту на продукти функціонального та пробіотичного спрямування. З огляду на це бобові культури мають перспективу розширення використання в харчовій промисловості завдяки своїм харчовим, екологічним та економічним перевагам. Прогнозовано, що сегмент ферментованих бобових зросте з 0,3 млрд у 2024 до 1,5 млрд USD до 2035 року [1].

Однак їх застосування все ще обмежене через наявність антипоживних та алергенних сполук, досить низькі технологічні властивості та сенсорні характеристики. Ферментація розглядається як ефективний інструмент підвищення біологічної цінності, покращення засвоюваності поживних речовин та формування стабільних органолептичних характеристик продуктів переробки бобових культур [2].

Хумус є популярним продуктом на основі нуту, який широко споживається у країнах Близького Сходу, Європи та Північної Америки. Проте класична технологія його приготування не передбачає застосування керованої ферментації, що обмежує можливості регулювання та формування функціональних властивостей продукту. У доступних наукових джерелах відсутні систематизовані дані щодо використання стартових культур у процесі ферментації хумусу та впливу параметрів цього процесу на показники якості готового продукту.

Актуальність цього дослідження зумовлена необхідністю наукового обґрунтування параметрів ферментації хумусу із застосуванням стартових культур, що дозволить керовано формувати його фізико-хімічні, мікробіологічні та органолептичні властивості. Особливого значення набуває можливість отримання хумусу з покращеними споживчими характеристиками та потенційними оздоровчими властивостями, що відповідає сучасним світовим тенденціям розвитку харчових технологій.

Наукова новизна роботи полягає у дослідженні впливу параметрів процесу ферментації хумусу стартовими культурами на формування показників якості продукту та в обґрунтуванні оптимальних режимів ферментації для цього виду харчової продукції.



*Аналіз останніх досліджень.* Дослідження щодо ферментації бобових є перспективним напрямом у процесі розроблення новітніх технологій харчових продуктів. Так, авторами [3–8] досліджуються такі чинники впливу на процес, як вибір штамів LAB, температура, час, кисень, добавки. Вказується, що оптимальні умови ще потребують стандартизації для різних видів бобових культур. У цих роботах визначено, що молочнокисле бродіння змінює склад та поживні, функціональні, технологічні і сенсорні характеристики бобових культур. Процес регульованої ферментації дозволяє змінювати конформацію та структуру білків, вуглеводів та жирів, що визначають зміни всіх інших властивостей бобових культур. Визначено, що молочнокисле бродіння є дієвим методом зниження рівня антипоживних сполук та поліпшення засвоюваності білків. Крім того, молочнокисле бродіння знижує алергенність бобових. Корисні для здоров'я ефекти ферментованих бобових зумовлені не тільки позитивними змінами у складі, а й наявністю пробіотиків, що підтверджує можливість використання ферментованих бобових як функціональних харчових продуктів.

Визначенням раціональних параметрів ферментації бобових займалися вчені Stefan W. Ritter, Quentin P. Thiel [9]. Ними визначений підхід до оптимізації параметрів ферментації, таких як температура, концентрація клітин інокуляту та додавання метіоніну для декількох штамів з метою активації процесу ферментації субстратів на основі люпину та бобових для зменшення специфічного аромату та поліпшення сенсорного профілю освіжаючого напою. Встановлено, що температура була важливою для більшості моделей, тоді як концентрація клітин інокуляту та додавання метіоніну мали незначний вплив. Підвищення температури ферментації призвело до зниження концентрації альдегіду та діацетилю та співвідношення оцтової/молочної кислоти.

У роботі [10] розглядається вплив вибраних штамів молочнокислих бактерій на сенсорні характеристики та вміст білків та амінокислот у ферментованих водних екстрактах, отриманих із зерен люпину, гороху та квасолі. Були виявлені нові та помітні сенсорні нотки, зокрема вареної шинки, мигдалю та сандалового дерева. Ферментований водний екстракт з люпину показав вищий загальний вміст білка, близький до вмісту в коров'ячому молоці. Результати цього дослідження показали, що молочнокисле бродіння покращує сенсорні характеристики інноваційних ферментованих напоїв на основі бобових культур, які зберігали високу кількість життєздатних лактобактерій до кінця холодильного зберігання.

У роботі [11] порівнювали функціональні властивості паст на основі бобових культур, вироблених із використанням різних схем ферментації та заквасок, на основі оцінки активності DPPH, відновної здатності, летких речовин та фенольних сполук. Ними доведено, що ферментаційні процеси значно збільшують загальний вміст фенолів і танінів, активність DPPH-радикалів і відновлювальну здатність у пастах, а вибір концентрату бобових культур та відповідна температура ферментації можуть позитивно вплинути на профіль летких органічних сполук у продуктах.

Таким чином, аналіз наукових публікацій останніх років свідчить, що ферментація бобових із використанням стартових культур є ефективним інструментом керування якістю харчових систем. Встановлено, що основні параметри ферментації, а саме температура, тривалість процесу, доза інокуляту та початковий рН, істотно впливають на перебіг мікробіологічних і біохімічних процесів, а також на фізико-хімічні, структурно-механічні та сенсорні властивості ферментованих продуктів.

Водночас результати досліджень мають фрагментарний характер і переважно стосуються окремих видів бобових або рідких і напіврідких систем, що зумовлює недостатню вивченість параметрів ферментації пастоподібних продуктів, зокрема хумусу.

*Метою цієї роботи є наукове обґрунтування та експериментальне визначення раціональних параметрів процесу ферментації хумусу із застосуванням стартових культур, що забезпечують*



стабільність мікробіологічних показників, покращення фізико-хімічних та сенсорних властивостей продукту, а також підвищення його споживчих і функціональних характеристик.

*Основна частина.* Сформульована робоча гіпотеза щодо можливості використання стартових культур у виробництві ферментованого хумусу окреслила низку штамів, що можуть працювати в умовах «холодного бродіння». Попередніми дослідженнями органолептичних характеристик модельних систем хумусу із різними штамами мікроорганізмів та визначенням кратності змін ароматичних сполук у модельних системах порівняно із контролем встановлено, що внесення *Lactobacillus rhamnosus* та *Lactococcus lactis* дозволяє отримати більш виражений смак та аромат продукту, що зумовлено більш інтенсивним накопиченням кетонів порівняно з іншими штамами [12].

Визначення раціональних параметрів ферментації хумусу базується на тому, що ключовими показниками є кислотність (рН) та смак, які комплексно відображають ефективність мікробіологічного процесу, ступінь розвитку ароматичних сполук і загальну споживчу привабливість продукту. Саме поєднання цих двох параметрів дозволяє комплексно оцінити результати ферментації.

Змінними параметрами регулювання ефективності ферментації хумусу є значення таких показників, як доза внесення стартової культури, тривалість процесу ферментації, температура середовища.

Рекомендоване виробником дозування обраної стартової культури визначено для заквашування незбираного молока як сировини у виробництві кисломолочних продуктів та становить  $5 \cdot 10^6 \dots 1 \cdot 10^7$  КУО/г. Тому постала необхідність обґрунтування умов дії штамів в іншій харчовій системі, а саме в хумусі.

Визначили, що дозування суміші ліофілізованих штамів варіюватиметься у межах  $1 \cdot 10^6 \dots 1 \cdot 10^8$  КУО/г продукту, тривалість ферментолізу становитиме 1...30 днів з періодичністю відбору проб 1 раз на 7 днів. Температура в камері заквашування варіюватиметься в інтервалі 2...6 °С. З огляду на те, що нормативні документи, що регулюють фізико-хімічні та органолептичні показники хумусу в Україні та ЄС, відсутні, користувалися загальними вимогами до харчових продуктів. Для контролю (Хумус «Класичний» ТМ Yofl) кислотність, що зумовлена наявністю у рецептурі лимонної кислоти, перебуває в межах рН = 4,6...5,5. Відповідно, мінімальним значенням рН дослідного зразка хумусу прийнято 4,7...4,8, оскільки це поріг кислотності *Lactobacillus rhamnosus*, нижче якого його метаболічна активність знижується. Значення рН нижче 4,7...4,8 негативно впливає й на органолептичні властивості продукту (поява занадто кислого смаку), що робить продукт менш привабливим для споживача.

Досліджено зміни рН дослідних зразків хумусу в процесі ферментації залежно від дози внесеної стартової культури (рис. 1). Температура процесу становила 4 °С, тривалість ферментації 30 днів.

Дослідження свідчать, що рН дослідних зразків хумусу на початку ферментації перебувало в межах 4,85...4,87, далі відзначається повільне зниження значень рН для всіх зразків до кінцевих 4,65...4,70 на 30-у добу ферментації. Збільшення дозування стартової культури призводить до незначного зниження значень рН. Зрозуміло, що зі збільшенням дози стартової культури зростає початкова кількість життєздатних клітин мікроорганізмів у середовищі, ферментація починається раніше та відбувається інтенсивніше. При цьому прискорюється продукування органічних кислот, що зумовлює більш швидке зниження рН хумусу із більшою дозою стартової культури. Причини повільного накопичення органічних кислот під час ферментації хумусу пов'язані із біохімічними особливостями бобової сировини, оскільки молочнокислі бактерії метаболізують переважно моно- і дисахариди (глюкоза, мальтоза, лактоза тощо), які в нуті та хумусі присутні в незначній кількості. Досить щільна структура хумусу також перешкоджає швидкому поши-

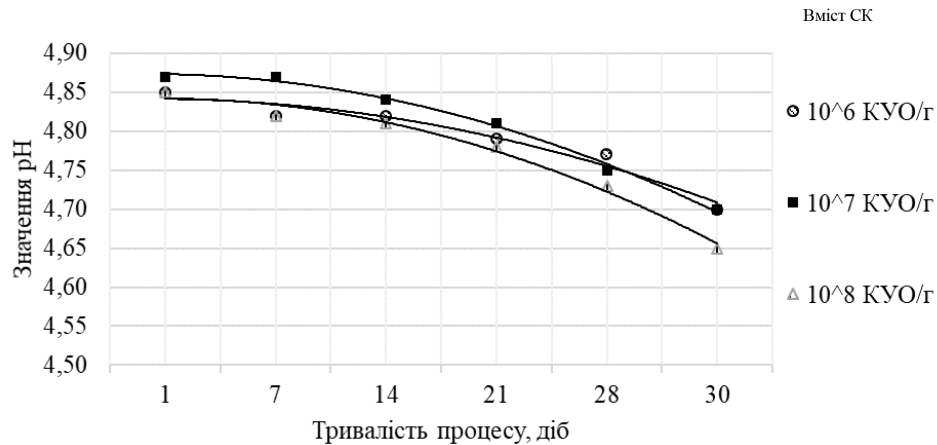


Рис. 1. Динаміка зміни рН хумусу в процесі ферментації залежно від дози стартової культури

ренню мікроорганізмів і метаболітів. Ще одним важливим чинником є температура ферментації, яка значно нижча за оптимальну для *Lactobacillus rhamnosus* (35...40 °С), але відповідає технологічному завданню «холодної ферментації» для подовження терміну зберігання продукту.

З огляду на незначні відмінності в значеннях рН за різного дозування стартової культури встановлюємо раціональну концентрацію, яка становить  $1 \cdot 10^7 \dots 1 \cdot 10^8$  КУО/г.

На наступному етапі досліджували вплив температури ферментації на зміни рН дослідних зразків хумусу (2) впродовж 30 діб за дозування стартової культури  $1 \cdot 10^7$  КУО/г. Орієнтовними значеннями залишається рН 4,7...4,8.

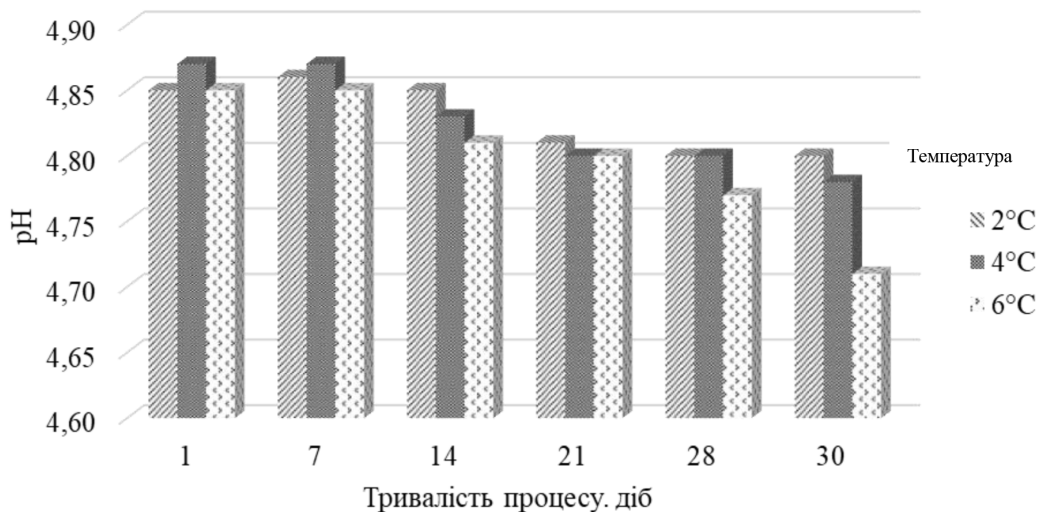


Рис. 2. Динаміка зміни рН у процесі ферментації залежно від температури

У період з 7-ої до 21-ої доби для всіх дослідних зразків хумусу встановлено подальше зниження рН, що зумовлено триваючим метаболізмом внесених культур *Lactobacillus rhamnosus* та *Lactococcus lactis* внаслідок повільного молочнокислого бродіння, що супроводжується накопиченням органічних кислот, насамперед молочної.

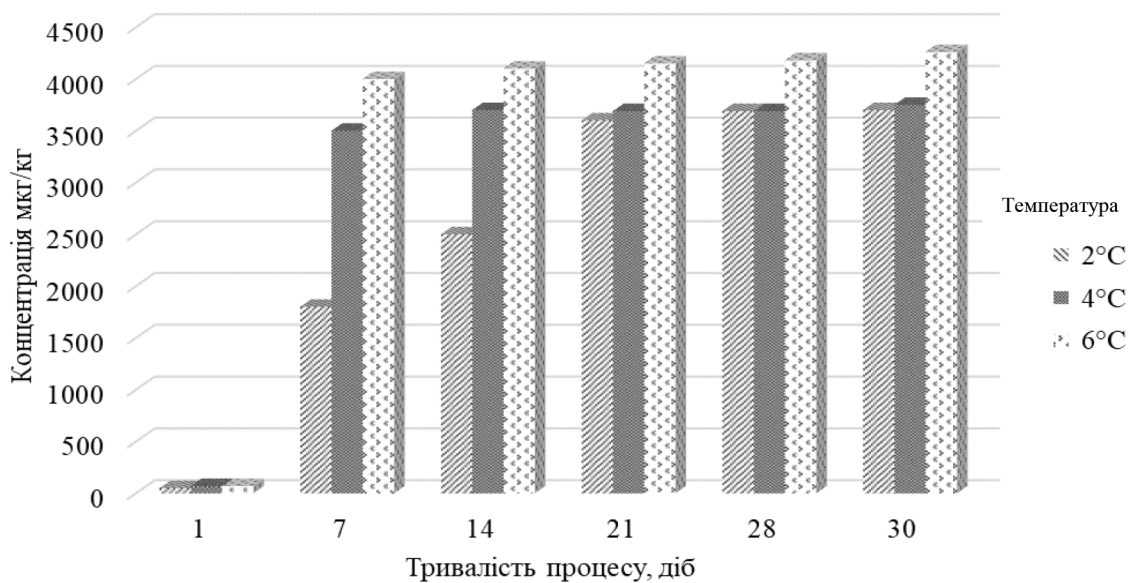
Зразок, ферментований за температури 6 °С, характеризувався більш інтенсивним приростом кислотності порівняно зі зразками, що ферментувалися за 2 та 4 °С. Така закономірність пояснюється тим, що температура 6 °С є більш сприятливою для збереження метаболічної активності *Lactobacillus rhamnosus* та *Lactococcus lactis*. За цієї температури не відбувається глибокого інгібування гліколітичних ферментів, транспорту субстратів крізь клітинну мемб-

рану та синтезу органічних кислот. Натомість за 2...4 °С у клітин спостерігаються прояви холодового стресу, що призводить до пригнічення кислотоутворювальної здатності.

На пізньому етапі ферментолізу (21-а...30-а доба) рН дослідних зразків зменшується незначно через те, що молочнокислі бактерії *Lactobacillus rhamnosus* та *Lactococcus lactis* вичерпують більшу частину легкозброджуваних субстратів, що уповільнює подальше утворення органічних кислот. Крім того, накопичення молочної кислоти призводить до зниження метаболічної активності мікроорганізмів та переходу їх у стаціонарну фазу, білково-мінеральна буферна система нутової пасти стабілізує кислотність, уповільнюючи подальші зміни рН. Сукупність цих процесів формує характерне «плато» кислотності після 21-ої доби.

Таким чином, встановлено, що варіювання температури ферментації хумусу в межах 2...6 °С не спричиняє статистично значущих відмінностей у динаміці накопичення органічних кислот, загальна інтенсивність кислотоутворення залишається порівняно стабільною, що свідчить про низьку температурну чутливість бактерій в умовах холодної ферментації.

Раніше було визначено, що ефективність ферментолізу, окрім зміни значень рН, також характеризується інтенсивністю накопичення смако-ароматичних речовин, зокрема діацетилу, який є побічним метаболітом молочнокислих бактерій. Тому на наступному етапі досліджували динаміку накопичення діацетилу залежно від температури за сталого дозування стартової культури (рис. 3).



**Рис. 3.** Динаміка накопичення діацетилу в процесі ферментації залежно від температури за дозування стартової культури  $1 \cdot 10^7$  КУО/г

За результатами проведених досліджень встановлено, що для всіх дослідних зразків хумусу характерним є інтенсивне накопичення діацетилу протягом перших 7 днів ферментації, коли його концентрація зростає з 50 до 1800...4000 мг/кг за різних температур процесу. Така динаміка зумовлена високою метаболічною активністю *Lactococcus lactis* та *Lactobacillus rhamnosus* на початковій стадії процесу, коли мікроорганізми активно метаболізують цитрат і піровиноградну кислоту, що призводить до інтенсивного утворення діацетилу як побічного продукту окиснення ацетоїну.

У подальші періоди ферментації швидкість синтезу діацетилу суттєво знижується, його концентрація поступово досягає плато (3600...4200 мг/кг на 21-у добу). Це пов'язано зі зменшенням концентрації доступних для мікроорганізмів субстратів (цитрату та відповідних проміжних метаболітів), зниженням активності культур через накопичення органічних кислот та зменшення рН, а також частковим перетворенням діацетилу на ацетоїн та 2,3-бутандіол уна-



слідок редуцтазної активності бактерій. На пізній стадії (після 21-ої доби) біосинтез діацетилу стабілізується, що проявляється у відсутності суттєвих змін його концентрації.

У дослідних зразках хумусу, які ферментувалися за температури 6 °С, накопичення діацетилу було більш інтенсивним, ніж за менших температур. Це пояснюється тим, що за температури 6 °С бактерії перебувають у повільно активному стані, зберігають метаболічну активність за меншого холодового стресу, який спостерігається за 2 та 4 °С. Це сприяє більш стабільному і поступовому утворенню діацетилу.

*Висновки.* Встановлено, що застосування стартових культур *Lactobacillus rhamnosus* та *Lactococcus lactis* є доцільним для ферментації хумусу в умовах низькотемпературного режиму, що забезпечує стабільний перебіг мікробіологічного процесу та покращення сенсорних характеристик продукту. Показано, що варіювання дози стартової культури в межах  $1 \cdot 10^6 \dots 1 \cdot 10^8$  КУО/г не призводить до суттєвих відмінностей у кінцевих значеннях рН, однак впливає на інтенсивність початкового етапу ферментації. Рационально визначено концентрацію  $1 \cdot 10^7 \dots 1 \cdot 10^8$  КУО/г.

Встановлено, що ферментація хумусу за температури 2...6 °С характеризується повільним зниженням кислотності та формуванням плато рН після 21-ої доби, що зумовлено особливостями бобової сировини, обмеженою кількістю легкозброджуваних вуглеводів та буферною здатністю продукту. Доведено, що температура ферментації впливає на накопичення діацетилу: найбільш інтенсивне його утворення спостерігається за температури 6 °С, що пов'язано з вищою метаболічною активністю молочнокислих бактерій порівняно з умовами 2...4 °С. Встановлено, що основне накопичення діацетилу відбувається протягом перших 7 діб ферментації, після чого його концентрація стабілізується внаслідок вичерпання субстратів та переходу мікроорганізмів у стаціонарну фазу росту.

Отримані результати підтверджують можливість керованого формування смако-ароматичного профілю хумусу шляхом регулювання параметрів холодної ферментації та створюють наукове підґрунтя для впровадження ферментованого хумусу у виробництво функціональних і крафтових харчових продуктів.

#### Список використаних джерел

1. Hummus Market Size, Growth & Trends Report (2023–2030). *Grand View Research*. 2025. URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/hummus-market-report>.
2. Чебаненко Є. В., Мельник О. Ю. Огляд інноваційних методів обробки бобових культур та їх вплив на харчову цінність і функціональні властивості. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів»*. 2024. № 4(58). С. 69–74. DOI: <https://doi.org/10.32782/msnau.2024.4.10>
3. Emkani M., Oliete B., Saurel R. Effect of lactic acid fermentation on legume protein properties: a review. *Fermentation*. 2022. Vol. 8, № 6. Art. 244. DOI: <https://doi.org/10.3390/fermentation8060244>
4. Ayivi R., Gyawali R., Krastanov A. et al. Lactic acid bacteria: food safety and human health applications. *Dairy*. 2020. Vol. 1. P. 202–232.
5. Pereira G. V. M., De Carvalho Neto D. P., Junqueira A. C. D. O. et al. A review of selection criteria for starter culture development in the food fermentation industry. *Food Reviews International*. 2020. Vol. 36. P. 135–167.
6. Semba R. D., Ramsing R., Rahman N., Kraemer K., Bloem M. W. Legumes as a sustainable source of protein in human diets. *Global Food Security*. 2021. Vol. 28. Art. 100520.
7. Ren Y., Li L. Effects of extracellular proteases and its inhibitors on the gel characteristics of soy protein induced by lactic acid bacteria. *International Journal of Food Science & Technology*. 2022. Vol. 57. P. 1587–1597.
8. Emkani M., Oliete B., Saurel R. Pea protein extraction assisted by lactic fermentation: impact on protein profile and thermal properties. *Foods*. 2021.
9. Ritter S. W., Thiel Q. P., Gastl M. I. et al. Optimizing the fermentation parameters in the lactic acid fermentation of legume-based beverages: a statistically based approach. *Microbial Cell Factories*. 2024. Vol. 23. Art. 253. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12934-024-02522-x>



10. Demarinis C., Verni M., Pinto L., Rizzello C.G., Baruzzi F. Use of selected lactic acid bacteria for the fermentation of legume-based water extracts. *Foods*. 2022. Vol. 11. Art. 3346. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11213346>

11. Illarionova V., Ciprovica I., Kruma Z., Tomson L., Feldmane J., Zagorska J. Impact of fermentation patterns on functional properties of legume-based spreads. *LWT Food Science and Technology*. 2025. Vol. 228. Art. 118099. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2025.118099>

12. Гніцевич В., Доронін К. Обґрунтування вибору стартових культур для виробництва ферментованого хумусу. *Товарознавство. Технології. Інжиніринг*. 2025. № 3(55). С. 73–83. DOI: [https://doi.org/10.31617/2.2025\(55\)05](https://doi.org/10.31617/2.2025(55)05)

*Дата першого надходження статті до видання: 15.01.2026*

*Дата прийняття статті до друку після рецензування: 08.02.2026*

*Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026*

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



**V. Gnitsevych, K. Doronin**

*State University of Trade and Economics*

## **STUDY OF THE PARAMETERS OF THE HUMUS FERMENTATION PROCESS WITH STARTER CULTURES**

### *Summary*

The article presents the results of a comprehensive study of the controlled fermentation process of hummus using lactic acid bacteria starter cultures aimed at substantiating rational technological parameters and ensuring stable quality characteristics of the final product. The relevance of the study is driven by the growing global demand for fermented plant-based foods with functional and vegan orientation, as well as by the insufficient scientific knowledge regarding fermentation processes of paste-like legume-based products, particularly hummus. Traditional hummus production technology does not involve controlled fermentation, which limits the possibilities for regulating its physicochemical, microbiological, and sensory properties.

The aim of the study was to scientifically substantiate and experimentally determine rational parameters of the hummus fermentation process using *Lactobacillus rhamnosus* and *Lactococcus lactis* starter cultures under low-temperature (cold fermentation) conditions. The effects of starter culture dosage, fermentation temperature, and process duration on pH dynamics and the accumulation of flavor-active compounds, particularly diacetyl, were investigated as key indicators of fermentation efficiency and consumer acceptability.

Experimental studies were conducted using starter culture dosages in the range of  $1 \cdot 10^6$  to  $1 \cdot 10^8$  CFU/g, fermentation temperatures of 2...6 °C, and a process duration of up to 30 days. The results demonstrated that hummus fermentation is characterized by a slow decrease in pH values, which is attributed to the biochemical characteristics of chickpea-based raw materials, the limited content of readily fermentable carbohydrates, and the high buffering capacity of the product. It was established that variation in starter culture dosage does not cause significant differences in final pH values; however, it affects the intensity of the initial fermentation stage. A starter culture concentration of  $1 \cdot 10^7$ ... $1 \cdot 10^8$  CFU/g was identified as optimal.

The study confirmed that fermentation temperature significantly influences diacetyl accumulation. The most intensive diacetyl formation was observed at 6 °C, which is associated with higher metabolic activity of lactic acid bacteria under reduced cold stress compared to lower temperatures. It was found that the main accumulation of diacetyl occurs during the first 7 days of fermentation, after which its concentration stabilizes due to substrate depletion and the transition of microorganisms to the stationary growth phase.

The obtained results confirm the feasibility of using starter cultures for the controlled formation of the flavor and aroma profile of hummus and provide a scientific basis for the implementation of fermented hummus technology in the production of functional and craft food products.

**Keywords:** lactic acid fermentation, legumes, cold fermentation, acidity, diacetyl, aroma profile, functional product, paste-like systems.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-29>

УДК 664.7:664.3:664.034.2

В. С. Калина<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.В. О. Троєкурова<sup>1</sup>, асистентМ. В. Луценко<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.І. І. Волосенков<sup>1</sup>, бакалавр

ORCID: 0000-0002-3061-3313

ORCID: 0009-0002-9117-696X

ORCID: 0000-0002-0924-5157

ORCID: 0009-0002-5025-8715

<sup>1</sup> Дніпровський державний аграрно-економічний університет<sup>2</sup> Луганський національний університет імені Тараса Шевченка

e-mail: viktoriya-kalina@ukr.net

## ПЕРСПЕКТИВИ ВИРОБНИЦТВА ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ОЛІЙНОЇ ТА КРУП'ЯНОЇ СИРОВИНИ СПОСОБОМ ЕКСТРУДУВАННЯ

*Анотація.* У статті розглянуто перспективи виробництва харчових продуктів із використанням олійної та круп'яної сировини способом екструдкування як інноваційного напрямку підвищення харчової й біологічної цінності продукту. Проаналізовано нутрієнтний склад насіння амаранту, кунжуту, арахісу, розторопші та сої. Узагальнено дані щодо харчової цінності круп'яної продукції. Установлено, що екструзійна технологія забезпечує інтенсифікацію технологічних процесів, модифікацію фізико-механічних і біохімічних властивостей готового продукту, що в комплексі сприяє зростанню його засвоюваності й енергетичної цінності. Запропоновано підходи до створення крохмально-олійних екструдованих продуктів. Перспективним напрямом є міждисциплінарна співпраця технологів, кулінарів і медичних фахівців щодо розробки рецептур круп'яних сумішей із додаванням олійних культур харчового призначення. Це створює передумови для розробки й виробництва нових круп'яних виробів оздоровчого та профілактичного призначення.

*Ключові слова:* олійно-круп'яна інгредієнтна суміш, екструзійна технологія, крохмально-олійні екструдовані продукти.

*Постановка проблеми.* Зараз на українському ринку харчових продуктів спостерігається стійке зростання попиту на вироби з високим рівнем кулінарної готовності, зокрема мюслі, сухі сніданки, супи кремоподібної консистенції та продукцію швидкого приготування. Такі продукти характеризуються мінімальною потребою в попередній обробці перед споживанням, простотою використання та значною економією часу й зусиль під час приготування страв, що є актуальним, наприклад, в умовах відключення електроенергії.

Одним із найбільш перспективних напрямів інтенсифікації технологічних процесів у харчовій промисловості є застосування екструзійної обробки крохмалевмісної та олійної сировини. Ключовими перевагами екструзійної обробки є збереження значної частки біологічно активних сполук, притаманних вихідній сировині, а також заміна багатостадійних і періодичних процесів безперервним виробництвом із використанням компактного обладнання. Крім того, сучасні екструзійні системи дають змогу формувати продукти з наперед заданим хімічним складом, керовано модифікувати їх структурно-механічні й технологічні властивості, а також збагачувати їх функціональними інгредієнтами з метою підвищення харчової та біологічної цінності [1; 2].

Основною сировинною базою для виготовлення екструдованої продукції традиційно є зернові культури, зокрема кукурудза, пшениця, рис, ячмінь, просо, а також продукти їх промислової переробки. Перспективним є розширення інгредієнтного складу сировини для виготовлення круп'яних виробів за рахунок використання олійного насіння.



*Аналіз останніх досліджень.* Залежно від виду зернової культури, з урахуванням фізико-механічних властивостей і якісних характеристик круп'яні підприємства виробляють значну кількість монокруп і сумішей. Одними з найважливіших є крупи з пшениці, ячменю, вівса, гречки, рису, проса тощо. Створена значна кількість конструкцій машин і їх робочих органів, що становлять технологічне обладнання, яке забезпечує виробництво круп'яної продукції високої якості й широкого асортименту. Наприклад, з гречки такі різновиди круп, як ядриця, проділ, ядриця швидкорозварювана та проділ швидкорозварюваний; з вівса – крупа вівсяна недроблена, крупа вівсяна плющена, пластівці вівсяні «Геркулес», пелюсткові пластівці, толокно; з ячменю, залежно від технології приготування, виготовляють крупи перлову та ячну. Більш простішою технологією є отримання перлової крупи, при якій ядро зерна ячменю звільняється від квіткових оболонки і додатково шліфується. У випадку виробництва ячної крупи часточки подрібненого ядра вивільнюються повністю від квіткових плівок і частково від плодкових оболонки [3; 4].

Екструдовані крупи отримують шляхом гідротермічної обробки зернової сировини в умовах високої температури (120–200 °С), тиску й механічного зсуву з подальшим різким зниженням тиску на виході з екструдера. Найбільш поширеною сировиною є кукурудза, рис, пшениця, гречка, ячмінь, овес, а також бобові культури [5].

*Технологічний процес зазвичай включає такі стадії:* очищення та калібрування зерна; подрібнення (до крупки або борошна залежно від рецептури); кондиціонування (зволоження до 14–20 %); екструзійну обробку в одно- або двошнекових екструдерах; формування, різання й охолодження готового продукту.

Під час екструзії відбуваються глибокі фізико-хімічні перетворення: клейстеризація крохмалю, денатурація білків, часткова деструкція клітковини, інактивація антипоживних речовин. Завдяки цьому підвищується перетравність продукту та скорочується тривалість подальшого кулінарного приготування. Екструдовані крупи використовують як швидкорозварювані каші, сухі сніданки, напівфабрикати й інгредієнти функціональних продуктів [5–7].

Екструзія олійної сировини (соняшнику, сої, ріпаку, льону тощо) є ефективним способом підготовки насіння до пресування або екстракції розчинниками. На відміну від традиційного обсмажування або кондиціонування в жаровнях, екструзійна обробка забезпечує інтенсивний механотермічний вплив тривалістю короткого часу (10–60 с).

*Технологічний процес зазвичай включає такі стадії:* очищення та лущення (за потреби); подрібнення або плющення; кондиціонування до оптимальної вологості (10–12 %); короткочасну екструзійну обробку; подальше пресування або екстракцію.

У процесі екструзії відбувається руйнування клітинних структур, денатурація білків і часткова деструкція клітинних стінок, що сприяє вивільненню олії та підвищенню її виходу. Додатково інактивуються ферменти (зокрема ліпаза, уреаза в сої), знижується вміст антипоживних сполук і мікробіологічне навантаження [8–9].

Застосування екструдерів (одно- або двошнекових) дає змогу регулювати температуру, тиск, швидкість зсуву та тривалість обробки, що забезпечує оптимізацію технологічних параметрів залежно від виду олійної культури й обраного способу подальшого видобування олії. Таким чином, екструзійні технології є ефективним інструментом інтенсифікації виробництва як екструдованих круп, так і підготовки олійної сировини до вилучення жиру, забезпечуючи підвищення виходу цільового продукту, скорочення енергетичних витрат і покращення функціональних характеристик отриманої продукції [10].

*Формулювання мети статті (постановка завдання).* Метою роботи є проведення аналітичного огляду сучасних тенденцій харчових технологій, а саме: процесів екструзії, виробництва



круп, особливості використання олійної сировини в технологіях круп'яних продуктів. Згідно з поставленою метою статті, проведено аналітичний огляд таких питань:

- загальна характеристика основних видів круп;
- опис технології виробництва екструдованих круп і круп'яних виробів;
- характеристика основних видів олійного насіння, що є потенціальним інгредієнтом у технології круп'яного виробництва;
- запропоновано технології виробництва екструдованих круп із крохмально-олійним складом.

*Основна частина.* Розглянемо харчову цінність круп'яної продукції (на абсолютно суху речовину), що представлено в таблиці 1.

Таблиця 1

## Харчова цінність круп'яної продукції

Назва крупи	Крохмаль, %	Азотисті речовини, %	Жир, %	Клітковина, %	Білок, %	Зола, %	Цукри, %	Енергетична цінність на 100 г, кКал
Вівсяна	72,0	16,0	6,0	2,84	11,9	2,25	0,25	351
Гречана (ядриця)	81,0	12,0	2,0	2,0	12,6	2,10	0,30	325
Рис	88,0	6,0	0,5	0,30	7,0	0,6	0,5	326
Пшоно шліфоване	83,3	11,5	2,5	0,65	12,0	1,30	0,15	330
Перлова	85,0	9,0	1,2	1,25	9,2	1,15	0,5	325
Ячна	82,0	11,0	1,5	2,0	10,4	1,5	0,4	322
Горох лущений	66,0	26,0	2,6	2,2	23,0	2,4	0,3	330
Манна	84,2	12,7	0,9	0,24	11,3	0,54	0,96	333

Окрім вищевказаних круп, круп'яні підприємства також виробляють суміші різних круп і використовують технологічні операції, які впливають на асортимент круп, наприклад, термічна обробка, яка дає змогу отримати крупи швидкого приготування. Крім того, крупи підвищеної біологічної цінності можуть виготовлятися дражуванням і пресуванням. У разі використання дражування борошняні продукти різних видів послідовно накачують шарами, а зв'язувальною речовиною є крохмальний клейстер. Виготовлені крупи мають округлу форму діаметром від 2,5 до 4,0 мм [4].

Для виготовлення круп пресуванням використовують спеціальні пресувальні машини, у яких матриці пресів мають різний профіль отворів. Змішуванням різних компонентів, які входять до складу цих круп, із крохмальним клейстером отримують однорідну щільну масу, а вже із цієї маси, яку продавлюють крізь матриці пресів, виготовляють крупи різної форми, наприклад, у вигляді циліндрів, зерен тощо [9; 11].

Пресуванням досягається ущільнення тих сумішей, які ввійшли до складу рецептури обраної крупи. Крупи не змінюють свій біохімічний склад, а для того, щоб поліпшити якісні характеристики крупів, необхідно вводити в рецептуру суміші такі компоненти, які можуть значно підвищити якість крупи, використовувати різноманітні види круп і їх властивості, а також застосовувати сучасні технології їх обробки, що може призвести до підвищення енергетичної цінності (таблиця 1).

У хлібобулочні вироби вже додають різноманітне насіння, у тому числі й олійне, а також продукцію його переробки. Серед таких біологічно цінних добавок є кунжут, соя, льон, рапс, амарант, розторопша, рис тощо. Розглянемо деякі з них.

Соя – представник зернобобової сировини, яка розповсюджена в сільському господарстві та застосовується для виробництва широкого спектру продуктів у харчовій промисловості.



Такого значного застосування вона набула завдяки великому вмісту білка та високоцінних харчових компонентів. Сьогодні її широко використовують як економічно вигідний заміник м'яса та молочних продуктів [12]. Енергетична цінність насіння сої (на 100 г продукту) становить 446 кКал, або 1866 кДж, білка – 36,5 г, жирів – 20,0 г, вуглеводів – 30,2 г, зокрема цукрів – 7,3 г. До її складу входить низка вітамінів, серед яких – фолацин  $B_9$  (фолієва кислота) – 375 мкг, ретинол (одна з форм вітаміну А) – 1 мкг, піридоксин ( $B_6$ ) – 0,377 мг, вітамін С (аскорбінова кислота) – 6 мг, і багато мікроелементів. Основним біохімічним компонентом є білок, тому, обираючи рецептуру круп для формування сумішей, варто уважно розглядати якісні характеристики обраних компонентів [13].

Розторопша – це насіння, біохімічний склад якого включає широкий комплекс біоактивних компонентів. Насіння розторопші містить флаволігнани, які забезпечують виражену антиоксидантну й гепатопротекторну дію. Ліпідна фракція представлена поліненасиченими жирними кислотами, зокрема омега-6 (лінолева) й омега-9 (олеїнова), що забезпечують нормалізацію ліпідного обміну та сприяють зниженню рівня «поганого» холестерину. Насіння також містить значну кількість харчових волокон, що позитивно впливає на роботу шлунково-кишкового тракту та мікробіоту кишечника. Серед вітамінного комплексу переважають вітаміни групи В, А, Е й К, що беруть участь у метаболізмі, антиоксидантному захисті, процесах кровотворення та регуляції коагуляції. Мінеральний склад насіння представлений калієм, кальцієм, магнієм, цинком, залізом, селеном, міддю й хромом, що забезпечує підтримку електролітного балансу, функціонування серцево-судинної та кісткової систем [14].

Амарант є високопоживним і функціонально цінним видом насіння, що характеризується багатим макро- й мікронутрієнтним складом. Насіння містить 16–20 % білка, 6–9 % ліпідів і 60–65 % крохмалю. Особливістю біохімічного складу амаранту є високий уміст незамінної амінокислоти лізину – 6–7 %, що перевищує її концентрацію в зерні пшениці та кукурудзи у 2,5–3,5 рази. Лізин є ключовою амінокислотою для синтезу білків, зокрема колагену, і сприяє нормальному росту й розвитку організму. Поживна цінність насіння амаранту на 100 г продукту становить: жири – 7,02 г, білки – 13,56 г, вуглеводи – 58,55 г, енергетична цінність – 371 кКал. Насіння амаранту містить значну кількість харчових волокон, що покращують травлення та мікробіоту кишечника, а також поліфенольні сполуки, фітостероли й токофероли, які проявляють антиоксидантні властивості. Ліпідний склад характеризується переважною кількістю ненасичених жирних кислот: лінолевої, олеїнової, що забезпечує сприятливий вплив на ліпідний обмін і серцево-судинну систему. Крім того, насіння амаранту є джерелом мінералів (заліза, магнію, фосфору, кальцію, цинку), що підвищує його харчову цінність і функціональні властивості [15].

Земляний горіх (арахіс) – у ньому міститься 37 % білка, близько 21 % крохмалю, до 53 % олії, яка містить арахінову, лігноцерінову, стеаринову, пальмітинову, олеїнову й інші жирні кислоти, також алкалоїди, арахін і конарахін, глюкенини, соланіни, амінокислоти, цукор, вітаміни групи В, Е-пантотенову кислоту, біотин. У фармацевтичній промисловості використовують для приготування різних ліків. Насіння арахісу при регулярному споживанні, якщо немає протипоказань та алергічних реакцій, може сприяти зниженню рівня «поганого» холестерину, покращенню роботи серцево-судинної системи та нервової системи [16].

Кунжут є яскравим представником суперфуду, який містить великий відсоток цинку, натрію, фосфору, марганцю, селену, кальцію, калію, магнію та заліза. Хімічний склад насіння включає 45–55 % ліпідів, 18–25 % білка, 10–15 % вуглеводів і близько 5–12 % харчових волокон. Ліпідна фракція представлена переважно ненасиченими жирними кислотами – олеїною та лінолевою, що зумовлює високу біологічну активність кунжутної олії та її стійкість до окиснення. Особливу цінність становить комплекс біологічно активних сполук із вираженими антиокси-

дантними властивостями. Насіння містить лігнани (сезамін, сезамолін, сезамол), фітостероли, токофероли (вітамін Е), каротиноїди (попередники ретинолу), а також вітаміни групи В (тіамін, рибофлавін, ніацин) [17].

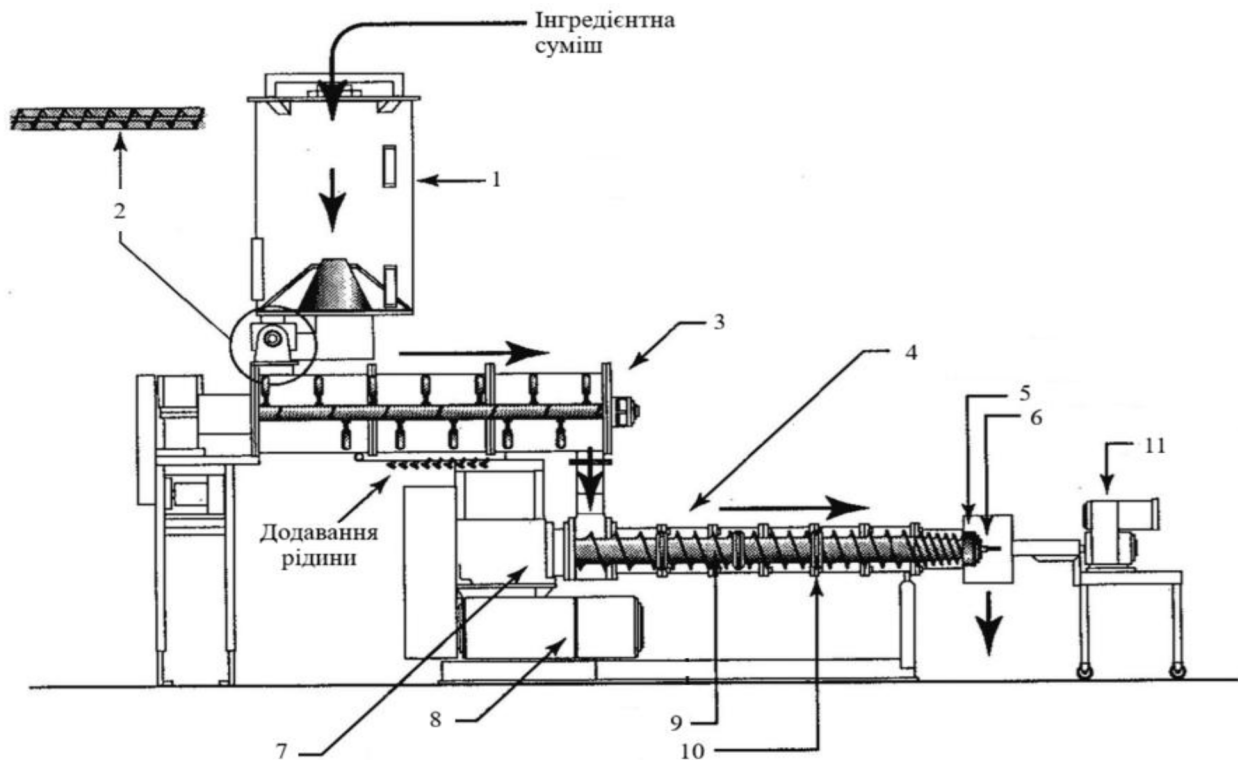
Характерні дані про досліджувані рослинні культури свідчать про їх сприятливий ефект на загальний стан здоров'я людини, тому розглянуті нами культури у вигляді насіння можна використовувати для виробництва круп'яних сумішей, згідно з ретельно обраним складом і рецептурою, де можливо виробляти різні суміші, у тому числі й лікувально-профілактичного призначення.

Розглянемо, якими технологічними методами можливо обробляти круп'яні суміші, щоб вони мали вигляд, властивості, біохімічний склад, найбільш якісні для споживання.

Ми розглядали метод пресування, але він забезпечує лише ущільнення часток суміші. Можливо використовувати проварювання суміші, мікронізацію. Але найменш енергозатратний процес, де практично будь-який зерновий продукт можна перетворити на досить пластичну масу, – це екструзування. За допомогою екструзійної технології можливо створювати харчові продукти з регульованою харчовою, біологічною та енергетичною цінністю [18].

Переробка рослинної сировини за допомогою термопластичної екструзії пояснюється двома основними причинами. По-перше, великим обсягом і різноманітністю круп'яних сумішей; по-друге, економічним ефектом, який показує виробництво екструзійної продукції.

Особливістю екструзійної техніки є оптимізація, де кілька технологічних операцій відбуваються в одній машині – екструдері. У межах цього процесу одночасно відбуваються транспортування, перемішування, подрібнення, варіння, ущільнення й формування; можливість збіль-



**Рис. 1.** Загальний вигляд екструдерної системи: 1 – накопичувальний бункер із «живим» (рухомим) дном; 2 – шнековий живильник із регульованою швидкістю; 3 – прекондіціонер (вузол попередньої підготовки); 4 – вузол корпусу (циліндра) екструдера; 5 – дистанційне кільце; 6 – фінішна матриця (фільтра); 7 – корпус головного приводу; 8 – двигун головного приводу; 9 – шнек; 10 – стопорне кільце/елемент для створення зсуву; 11 – ніж із регульованою швидкістю (різальний пристрій)



шення швидкості протікання хімічних реакцій; високий ступінь автоматизації та скорочення кількості обслуговуючого персоналу (рис. 1) [18–21].

Використання екструзійної технології для виробництва круп із різних зернових, бобових, олійних культур у харчові високоцінні продукти, забезпечує глибокі біохімічні перетворення поживних речовин – вуглеводів, клітковини, білків, що призводить до підвищення їх засвоєння й отримання високоякісних екструдатів. Формовані екструдати у вигляді джгутів або різних сформованих продуктів із сумішей круп'яних культур можливо дробити, розсіювати на ситах на круп'яні фракції різних геометричних розмірів, згідно з номерами сит, а борошняну фракцію використовувати в тістових масах при виробництві різного печива та макаронних виробів.

**Висновки.** По-перше, екструзійну технологію доцільно використовувати в технології виробництва круп'яних продуктів, тому що вона забезпечує швидку зміну та покращення фізико-механічних і біохімічних властивостей кінцевої продукції, збільшення її енергетичної цінності.

По-друге, така сучасна технологія ставить питання до технологів харчових виробництв, кулінарів, медиків про можливість сумісної розробки та створення нових рецептур круп'яних сумішей із додаванням різних олійних культур харчового призначення, у результаті чого промисловість зможе виробляти нові круп'яні вироби оздоровчого призначення, у тому числі й для профілактичного лікування.

#### Список використаних джерел

1. Дзюба Н.А., Буняк О.В. Дослідження безпечності екструдатів на основі круп'яної сировини. *Таврійський науковий вісник. Серія «Технічні науки»*. 2022. № 6. С. 59–67.
2. Mościcki L., Van Z., Dick J. Extrusion-cooking and related technique. *Extrusion-cooking techniques: Applications, theory and sustainability*. 2011. P. 1–24.
3. Осокіна Н. М., Герасимчук О. П., Матвієнко Н. П. Технологія зберігання та переробки зерна. Київ : ТОВ «Книга-плюс», 2012. 320 с.
4. Шутенко Є. І., Соц С. М. Технологія круп'яного виробництва. Одеса : ОНАХТ. 2010. 272 с.
5. Orozco-Angelino X., Espinosa-Ramírez J., Serna-Saldívar S. O. Extrusion as a tool to enhance the nutritional and bioactive potential of cereal and legume by-products. *Food Research International*. 2023. Vol. 169. 112889.
6. Чебаненко Є., Мельник О. Метод екструзійної обробки бобових: вплив на поживні властивості та перспективи використання. *Вісник Хмельницького нац. університету. Серія «Технічні науки»*. 2025. № 351(3.1). С. 542–548.
7. Кобилінська О. В. Розроблення раціональних технологій харчоконцентратів швидкого приготування на основі екструдованої сировини : автореф. дис.... канд. техн. наук : 05.18.01. Київ : УДУХТ, 2000.
8. Kadam A., Scanlon M. G., Koksel F. Extrusion of Oilseed-Based Ingredients: Unlocking New Potential for Sustainable Protein Solutions. *Compr Rev Food Sci Food Saf*. 2025. P. 1–24. DOI: 10.1111/1541-4337.70185
9. Riaz M. N. Extrusion processing of oilseed meals for food and feed production. *Bailey's Industrial Oil and Fat Products*. 2005.
10. Перевалов Л. І. Науково-практичне обґрунтування інноваційних технологій переробки насіння олійних культур : автореф. дис.... докт. техн. наук : 05.18.06. Харків : Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т», 2021. 42 с.
11. Guy J. Extrusion Cooking: Technologies and Applications. Cambridge : Woodhead Publishing, 2001. 23 p.
12. Boye J. I., Barbana C. Protein processing in food and bioproduct manufacturing and techniques for analysis. *Food and industrial bioproducts and bioprocessing*. 2012. P. 85–113.
13. Johnson L. A., White P. J., Galloway R. Soybeans: chemistry, production, processing, and utilization. *Elsevier*. 2015. 422 p.
14. Duke J. A. Handbook of Medicinal Herbs. CRC Press, 2002. 845 p.
15. Калина В. С., Троєкурова В. О., Закопай Д. П. Дослідження технології виробництва амарантово-житнього хліба як функціонального продукту з підвищеною харчовою цінністю. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2025. Том 15, № 2. С. 302–307.
16. Лимар В. А. Арахіс. Київ : Аграрна наука, 2007. 158 с.



17. Кобзева Д. О., Лях В. О. Схожість та якість насіння кунжуту різних років вирощування. *Науково-технічний бюлетень інституту олійних культур НААН*. 2014. № 20. С. 112–117.
18. Lazou A. E. Food extrusion: An advanced process for innovation and novel product development. *Critical reviews in food science and nutrition*. 2022. P. 1–29.
19. Yadav N., Suvedi D. Extrusion technology in food processing: Principles, innovations and applications in sustainable product development. *Food and Humanity*. 2025. Vol. 5.
20. Ganjyal G. M. Extrusion cooking: cereal grains processing. *Elsevier*. 2020. 533 p.
21. Petik I., Litvinenko O., Kalyna V., Ilinska O., Raiko V., Filenko O., Lutsenko M., Romanova T., Svishchova Ya., Ivakin O. Development of extruded animal feed based on fat and oil industry waste. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. № 2/11 (122). P. 112–120.

Дата першого надходження статті до видання: 02.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026

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



V. Kalyna<sup>1</sup>, V. Troiekurova<sup>1</sup>, M. Lutsenko<sup>2</sup>, I. Volosenkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dnipro State Agrarian and Economic University

<sup>2</sup> Luhansk Taras Shevchenko National University

## PROSPECTS FOR THE PRODUCTION OF FOOD PRODUCTS USING OILSEED AND CEREAL RAW MATERIALS BY EXTRUSION TECHNOLOGY

### *Summary*

The article examines the prospects for the production of food products using oilseed and cereal raw materials by means of extrusion as an innovative approach to enhancing the nutritional and biological value of products. The nutrient composition of amaranth, sesame, peanut, milk thistle, and soybean seeds is analyzed; these raw materials are characterized by a high content of complete proteins, polyunsaturated fatty acids, dietary fiber, B vitamins, tocopherols, minerals, and biologically active compounds with antioxidant properties. The nutritional value of cereal products (oat flakes, buckwheat, rice, millet, pearl barley, barley groats, peas, and semolina) is also summarized, as they serve as important sources of complex carbohydrates, plant protein, fiber, and micronutrients. The feasibility of combining oilseed and cereal raw materials in extruded blends to develop products with targeted functional properties is substantiated. It is demonstrated that extrusion technology ensures process intensification and rapid modification of the physical-mechanical and biochemical characteristics of raw materials, increases the degree of starch gelatinization, promotes protein denaturation, and inactivates anti-nutritional factors, thereby improving digestibility and enhancing the energy value of the final product. It is concluded that the application of extrusion in cereal product manufacturing is both technologically and economically justified. A promising direction is interdisciplinary collaboration among food technologists, culinary specialists, and medical professionals to develop cereal blends enriched with edible oilseed crops. This approach creates the preconditions for the production of health-oriented cereal products, including those intended for preventive nutrition.

**Keywords:** oil-and-cereal ingredient mixture, extrusion technology, starch-oil extruded products.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-30>

UDC 663.222

H. V. Kaplan, Candidate, PhD

T. A. Manoli, PhD

O. M. Myroshnichenko, PhD

Y. O. Barysheva, PhD

T. M. Afanasieva, PhD

ORCID: 0009-0001-2929-5442

ORCID: 0000-0001-9121-9232

ORCID: 0000-0002-7701-2056

ORCID: 0000-0002-5479-7479

ORCID: 0000-0003-2791-0779

*Odesa National University of Technology*

e-mail: kushnir.kamenka@gmail.com

## PROBLEMS, PROSPECTS OF PET-NAT PRODUCTION TECHNOLOGY IN UKRAINE

*Summary.* The popularity of Pét-Nat sparkling wine produced using Ancestrale technology is growing worldwide. Purpose of the work: to determine consumer awareness and prospects for Pét-Nat production in Ukraine; to investigate the use of different yeast strains during fermentation to improve wine quality; physicochemical, organoleptic indicators of wine quality. Scientific novelty: for the first time, the technology of production of sparkling wines of the Pét-Nat type from grape varieties grown in Ukrainian conditions and the quality indicators of the finished product were studied. Conclusions: the survey proved that consumers prefer still wines, but 14 % chose Pét-Nat, and producers noted problems with technology, wine quality. The highest score by organoleptic was received by a wine sample made with the EnartisFerm PERLAGE yeast strain; the lowest score was received by a sample made with the APRO-FERM SHAMP yeast strain, due to weaker perlage and signs of oxidation. Scientific research has allowed us to improve the technology, improve the quality of Pét-Nat sparkling wine by using certain types of yeast in the fermentation process, and make this range more competitive on the market and understandable to the consumer.

*Keywords:* sparkling wine, Pét-Nat, technology improvement, parameters, sensory analysis, OIV methodology.

*Statement of the problem.* The analysis of problems in the production and promotion of Ukrainian sparkling wines of the Pét-Nat type on the market is of great importance, since the industry has the raw materials and production capabilities to create authentic wines with a unique character. Ukrainian consumers prefer such sparkling wines for their vigor, drinkability and expressiveness, but note such disadvantages of Pét-Nat as the presence of sediment, dull color, specific undesirable aromas. Winemakers have identified technological barriers in the production of Pét-Nat wines: excessive accumulation of sediment and problems with the quality of this type of drink. Therefore, the issue of improving the technological aspects of the production of sparkling wines of the Pét-Nat category from grape raw materials of the Ukrainian terroir, as well as improving the quality indicators of the finished product, in particular using progressive methods of sensory analysis, is very relevant today.

*Analysis of recent research.* Wine is a matter of taste and a sign of cultural identity. More than any other alcoholic beverage, wine is associated with politeness and restraint [1–4]. Over the past decade, a new modern historical and social phenomenon has emerged: wine is produced, sold, and consumed in more countries and by a greater variety of people than in any other period in history [5–8].

Until recently, the culture of wine consumption in Ukraine differed from that of other European countries [9–11]. Unfortunately, the Ukrainian consumer approaches the choice of wine less rationally than Europeans. For the modern Ukrainian consumer, the appearance of the bottle and its cost are important. Few people pay attention to the composition, grape variety, aging, etc. These selection criteria are used only by particularly sophisticated buyers, who to a greater extent prefer imported products [12; 13]. Given the global problems of ecology and sustainable development, the relevance of which is reaching its peak, consumers increasingly prefer “green” products [14–18].



Research into the problems and relevance of Pét-Nat production in Ukraine is relevant, as there is great potential for the production of wine products with its own unique style.

Pét-Nat is an abbreviation of Pétillant Naturel, which means “naturally sparkling” [19–26]. This is a return to the old, ancient traditions of sparkling wine production. Pét-Nat symbolizes authentic craftsmanship, mainly in small quantities. Regardless of whether it is white, red or rosé, the wines are often cloudy due to unfiltered bottling and thus visually differ from the impeccable mass-produced products of large Champagne houses.

Currently, there are no documents at the legislative level that regulate the production of Pét-Nat. We conducted an online survey on the awareness of modern Ukrainian consumers about Pét-Nat wines. More than 52 % of respondents prefer sparkling wines made using classical technology. The main advantages of Pét-Nat, which consumers identified, are freshness, lightness, and richness. The main disadvantages are sediment, turbidity, foreign atypical aromas. An online survey of Ukrainian producers of sparkling wines of the Pét-Nat type revealed the main problems of the technology: large sediment. Despite such problems, the Ukrainian producer increases the volume of Pét-Nat production from year to year and sees prospects for the development of such a drink in Ukraine.

*Formulation of the purpose of the work (task statement).* To determine consumer awareness and prospects for the production of Pét-Nat wine in Ukraine; to investigate: the use of different yeast strains in fermentation to improve wine quality; physicochemical, organoleptic indicators of wine quality; through research, to improve the technology that allows making Pét-Nat wine a competitive range on the market.

*The main part.* The research was conducted at the Department of Wine Technology and Sensory Analysis of the Odesa National Technological University (Ukraine) and at the TM KOVACH WINERY enterprise (Kontsovo village, Uzhgorod district, Zakarpattia region).

Research materials: must and wine materials for sparkling wines from Sauvignon Blanc, Chardonnay, Merlot grapes grown in Ukraine (Zakarpattia region), produced in the micro-winery and in the production conditions of TM KOVACH WINERY (Kontsovo village, Uzhgorod district, Zakarpattia region) and various yeast races (tab. 1).

For organoleptic analysis, five samples of Pét-Nat “Ancestrale” of the 2022 harvest were presented, which were produced at the TM KOVACH WINERY enterprise (64 Turyanytsia St., Kontsovo village, Uzhgorod district, Transcarpathian region).

Pét-Nat “Ancestrale” of the 2022 harvest is a blend of Chardonnay, Sauvignon Blanc and Merlot grape varieties in equal quantities. This ratio was chosen to achieve a typical pink color, harmonious acidity and bright aroma.

The experimental samples differ in the yeast races on which fermentation was carried out (tab. 2).

To study the chemical composition of grapes, wine materials and wines, both generally accepted and specific research methods were used.

The following indicators were measured: mass concentration of titrated acids and sulfur dioxide, mass concentration of sugars.

Mass concentration of titrated acids. The method is based on titration of wine with a titrated sodium hydroxide solution to the equivalence point, which is set at pH 7.0 using the bromothymol blue indicator. The mass concentration of titrated acids ( $\text{g/dm}^3$ ) is calculated based on the volume of titrant consumed.

Mass concentration of sulfur dioxide ( $\text{mg/dm}^3$ ). The method is based on the oxidation of free sulfurous acid in an acidic medium to sulfuric acid using iodine. 1 % starch solution serves as an indicator. The bottle with wine is uncorked immediately before analysis to prevent loss of sulfur dioxide. In a conical flask with a capacity of  $200 \text{ cm}^3$ ,  $50 \text{ cm}^3$  of wine is measured with a pipette,  $3 \text{ cm}^3$  of  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (density  $1.11 \text{ g/cm}^3$ ),  $1 \text{ cm}^3$  of starch,  $1 \text{ cm}^3$  of trilon B are added and immediately titrated with a 0.01 M iodine solution until a blue color appears, which does not disappear within 30 seconds.

Table 1

Yeast characterization

Name of yeast	Purpose of yeast	Properties of yeast
SIHA Aktivhefe 4 Saccharomyces cerevisiae CH 158	Highly active dry yeast specifically for the production of sparkling wines, both in acratophores and for fermentation in bottles according to the “Méthode traditionnelle”. They are also suitable for the maturation of aged wines. The production of sparkling wines with a delicate bouquet while simultaneously intensifying the aroma, characteristic of the variety and terroir	Fast start of secondary fermentation. Very good cold fermentation properties. Easy yeast separation. Ferment sparkling wine with small bubbles
APRO-FERM SHAMP Saccharomyces bayanus	For fermentation recovery; for bottle and tank champagization (for fine sparkling wines). Gives the aroma subtle notes of nuttiness	Resistant to low pH; resistant to high CO <sub>2</sub> concentration; cold-resistant; optimal fermentation temperature 14–22 °C
EnartisFerm PERLAGE Saccharomyces cerevisiae ex r.f. bayanus	A strain selected for the production of sparkling wines using the traditional method. Can be successfully used in the primary fermentation of white wines. Ferments wines with a very elegant and pure aroma, reflecting the characteristics of the grape variety and the region	Resistant to high sugar and alcohol concentrations, low pH and low temperatures. Fermentation temperature 10–30 °C. Moderate fermentation rate at low temperature; high at > 15 °C. Alcohol tolerance ≤ 17 % High SO <sub>2</sub> resistance.
Erbslöh Oenoferm Rose	Special granulated yeast for fermenting fruity rosé or late wines. Aroma profile: complex fruity aromas, sweet floral and honey notes, soft and creamy taste. Ferments complex wines with fruity-sweet floral-honey aromas	Fast start of fermentation. Resistant to low temperatures. Fermentation temperature 17–22 °C. High nutrient requirement. For best results, more complex nutrients – VitaFerm Ultra – are required, depending on the degree of grape maturity, nutrient content and health

Table 2

Experimental samples

Sample number	Yeast application options
1	SIHA Aktivhefe 4
2	APRO-FERM SHAMP
3	Composition: SIHA Aktivhefe 4 and APRO-FERM SHAMP
4	Composition: EnartisFerm PERLAGE and Erbslöh Oenoferm Rose
5	EnartisFerm PERLAGE

Mass concentration of sugars. The study is carried out using a refractometer, the indicators of which are listed according to special tables. The indicator is measured in units of g/dm<sup>3</sup>.

The active acidity of the must and wine materials is measured using a pH meter.

The organoleptic tests of Pét-Nat were carried out according to the OIV international organization’s scoring system (point method using a 100-point scale [5]).

Online survey of Ukrainian consumers and Ukrainian producers of sparkling wines of the Pét-Nat type in Ukraine using Google Forms.

**Results of a survey of consumers and producers of sparkling wines of the Pét-Nat type in Ukraine**

During November 2023, an online survey of the modern Ukrainian consumer was conducted. More than 200 respondents took part in the survey. The purpose of the survey was to investigate the relevance of production and consumer awareness of a drink such as Pét-Nat.



Among the respondents, the majority were middle-aged people 30–50 years old (59.6 %) and young people 18–30 years old (39.2 %). The results show that an active solvent consumer interested in wine culture was involved.

Almost 2/3 of the respondents prefer still wines (62.7 %), 1/3 (29.4 %) – sparkling wines, and 6 % – consume both still and sparkling wines. Such a high rate of consumption of sparkling wines demonstrates the relevance of the development of the sparkling wine market in Ukraine.

When asked about wine taste, the majority of respondents preferred dry wines (68 %), semi-dry wines are preferred by 17 % of respondents, semi-sweet wines are preferred by 9 %, sweet and fortified wines are preferred by 2 % of respondents. Such results certainly give hope for the development of a high culture of wine consumption in Ukraine, illustrating the predominance of dry wines over drinks with residual sugar. This is also an impetus for the development of production and improvement of Pét-Nat technology.

The respondents were asked questions about the technology of sparkling wines. The Ukrainian consumer prefers sparkling wines made by classical (52 %) or tank (28 %) methods. Wines made by the Ancestral method (Pét-Nat) were preferred by 14 %. Such a low indicator demonstrates the presence of organoleptic shortcomings in Pét-Nat, which are associated with insignificant perlage and sediment in the bottle. In addition, there is a problem of high pressure in the bottle, which makes it difficult to uncork the bottle before consumption. The problems of Pét-Nat also include the impossibility of its sale due to the lack of legal registration.

Despite certain problems with Pét-Nat, the majority of respondents (78 %) know about this range of sparkling wines, but only 60 % of the total number of participants have tasted this drink. These indicators are quite high and prove the relevance of spreading the culture of Pét-Nat consumption in Ukraine.

Ukrainian craft wineries are popular and consumers have specific favorites. 85 % of respondents know one or more Pét-Nat producers in Ukraine.

In order to better understand the individuality and problem of Pét-Nat, a question was asked about the advantages and disadvantages of Pét-Nat. Among the advantages, consumers identify freshness, lightness, richness of taste, bright aromas; among the disadvantages – sediment, turbidity, foreign aromas and uncontrolled pressure.

During November 2023, an online survey of Ukrainian producers of sparkling wines of the Pét-Nat type was conducted. The purpose of the survey was to study the interest of producers in the production of Pét-Nat and consider possible problems.

13 producers participated in the survey: TM Chateau Pinot (Odesa region), My Wine (Roksolany, Odesa region), Frumushika-Nova family winery (Odesa region), Biologist (Kyiv region), Rakovetska Loza (Lviv region), Medovy Spas (Kyiv region), TM KOVACH WINERY (Zakarpattia region), Axis Wine (Lviv region), Korus wine (Kirovohrad region), DON ALEJANDRO WINERY (Odesa region), PP Vinorobnya Slyvyno (Mykolaiv region), Bohdan's winery (Khmelnitskyi region), VinSancho (Dnipropetrovsk region).

The main reasons for starting to produce Pét-Nat, according to the producers, are: the fashion for this drink in the world; tasting Pét-Nat by Christophe Lacarin; attempts to produce a lighter, more drinkable drink; the desire to experiment.

For the production of Pét-Nat, Ukrainian producers use the following grape varieties: Pinot Blanc, Pinot Gris, Pinot Noir, Chardonnay, Aligote, Traminer, Johanniter, Zweigelt, Merlot.

Ukrainian producers are taking their first steps in the production of Pét-Nat-type wines, most of them have 3–5 seasons of production experience. The volumes of products produced from season to season increase by 30–500 % and are accompanied by a significant expansion of the range. According to the survey, the share of Pét-Nat in the total wine production of the 2023 season is from 5 to 15 %.



Producers highlight the problems of Pét-Nat production, which include the presence of sediment in the bottle, uncontrolled foaming during uncorking the bottle, difficulties in stabilizing the drink, and determining residual sugar.

Consumers showed interest in the questionnaire and asked questions to scientists and producers: Why can I sometimes not uncork a bottle without excessive foaming? Why are there sometimes atypical and unpleasant aromas? Why is there such a large amount of sediment?

Producers have formulated the following topical questions regarding the technology and prospects of Pét-Nat in Ukraine: How to choose a mechanically stable bottle? At what level of residual sugar should the drink be bottled? How to stabilize the drink? How to minimize sediment and avoid disgorging? How to produce Pét-Nat officially?

### **Sensory analysis of experimental samples**

Sensory analysis of experimental samples of Pét-Nat was carried out by a group of experts, consisting of seven people, according to the OIV methodology on a 100-point scale. During the tasting, the commission determined various aspects of the wine's organoleptic properties.

The color assessment includes determining the color change, the contrast of the wine. The transparency of Pét-Nat and the level of sediment are also assessed.

When determining the aroma, the tasters assess the typicality, freshness, brightness and fruitiness of the aroma, as well as the absence of foreign aromas.

When studying the taste, the fullness, saturation and extractivity, acidity, the overall composition of taste nuances are assessed, which gives a feeling of harmony. When assessing the taste, its intensity and quality were also separately assessed.

Visually, the tasters assess the duration of the play of bubbles in the glass and the pressure in the bottle when uncorking.

The experts determine the nature and duration of the aftertaste and assess how well all the components of the wine are balanced.

The results of sensory evaluation of experimental wine samples are given in (tab. 3).

Table 3

Sensory evaluation of experimental Pét-Nat samples

Sample number	Points
1	84
2	81
3	87
4	92
5	93

According to tab. 3, the yeast strain SIHA Aktivhefe 4 was used to produce sample 1. According to the experts, the wine is clear, with small bubbles, persistent perlage, and the fruity aroma dominates, especially black and white currants. The aromas of fermentation are clearly expressed. The taste is relatively simple, but with balanced acidity. The aftertaste is intense and persistent. The total score is 84.

The yeast strain APRO-FERM SHAMP was used for sample 2. The experts noted that the perlage is weaker than that of sample 1, and the wine is clear. The aroma is dominated by signs of oxidation and fermentation, with pronounced fruity notes, including raspberry and white currant. The intensity and freshness of the taste are less than that of sample 1. The experts noted the presence of the aroma of the malolactic fermentation process. Total score 81.

The composition of the following yeast strains was used to produce sample 3: SIHA Aktivhefe 4 and APRO-FERM SHAMP. The experts noted a good level of perlage. The wine is less transparent



than samples 1 and 2. The wine is characterized by bright fruity aromas of red apple and raspberry. The aroma is clean, the taste is bright, harmonious acidity and an intense aftertaste. Total score 87.

The composition of the following yeast strains was used to produce sample 4: EnartisFerm PERLAGE and Erbslöh Oenoferm Rose. The wine is characterized by persistent perlage. The drink is transparent. Unlike the previous samples, floral aromas dominate, especially iris. The acidity is lower and the taste is not as intense. The drink is balanced, harmonious. The aftertaste is long and pleasant. Total score 92.

For sample 5, the EnartisFerm PERLAGE yeast strain was used. It was found that the transparency and perlage of sample 5 did not differ from the previous samples. In the aroma, experts found notes of pink peach, strawberry and barberry. The aroma is fresh and clean. The taste is simple and clear. Long-lasting and intense aftertaste. Total score 93.

### Improving the technology of sparkling wines of the Pét-Nat type

The experimental samples of Pét-Nat “Ancestrale” were produced from grapes of the Sauvignon Blanc, Merlot and Chardonnay varieties of the 2022 harvest from the terroir in the village of Pistryalovo, Mukachevo. The harvest was carried out manually in dry weather at 5 a.m. to avoid heating the berries.

Crushing was carried out immediately after grape harvest on a crusher with a comb separator with simultaneous sulphiting at a rate of 10 g/dm<sup>3</sup>. Must separation was carried out using a stainless steel sieve for gravity-flow must selection. Must quality indicators are given in (tab. 4).

Table 4

Must quality indicators

Indicator name	Points		
	Sauvignon Blanc	Chardonnay	Merlot
Mass concentration of sugar, g/dm <sup>3</sup>	200	195	215
Active acidity	2.9	2.9	3.1
Mass concentration of titrated acids, g/dm <sup>3</sup>	8.2	7	7.8

10 % of the gravity-flow must volume is taken and sulphited to a level of 40 mg/dm<sup>3</sup>, followed by cooling and storage at 0 °C. This technological procedure must be carried out at the very beginning of crushing to avoid oxidation and the development of undesirable microflora. Under such conditions, the cooled must can be stored for a long time.

Clarification of the must was carried out using Seporit bentonite. The must was additionally aged at +3 °C for two days.

After removal from the sediment, the must was sent for primary fermentation using TM Erbslöh ‘Oenoferm Rose’ yeast. Rehydration was carried out for 3 hours with a gradual decrease in temperature from +38 to +18 °C. Fermentation was carried out at a controlled temperature of 15–17 °C. After fermentation, the dry wine material was removed from the yeast sediment.

The finished wine material is blended with the primary must and yeast strains according to Table 2.

Rehydration was carried out for 24 hours with a gradual decrease in temperature from +38 to +18 °C and the addition of nutrients.

The sulfite level was adjusted to 25 mg/dm<sup>3</sup> and tannin APRO-TAN GALL ANAX was added in an amount of 5 g/dm<sup>3</sup>.

The bottling took place in sparkling wine bottles, which were sealed with crown caps. It is this combination of the bottle and crown cap that provides mechanical resistance to the increase in pressure in the bottle during fermentation.

After bottling, the experimental samples were placed in a room with a temperature of +20 °C without access to sunlight. This temperature is considered optimal for completing fermentation in



bottles. For two weeks, batonage was carried out every other day to evenly distribute the yeast in the bottle.

*Conclusions.* An analytical review of the literature revealed certain problems in the positioning and production of Pét-Nat. Oenological and food publications have formed a general vision of Pét-Nat in the world as a promising alcoholic beverage that arouses some interest among consumers and has great potential for production. One of the pressing problems is the lack of regulatory documents at the legislative level, starting with the definition of Pét-Nat and requirements for the quality of the finished product.

In order to determine the level of competitiveness of Pét-Nat on the Ukrainian market, an online survey of consumers and producers of Pét-Nat was conducted. The modern Ukrainian consumer is active and alternative. He gladly accepts such a novelty as Pét-Nat. Consumers demonstrate high awareness of modern craft winemaking. The main impressions of Pét-Nat can be distinguished: the advantages can be summarized as freshness, lightness, richness, brightness of aroma and taste. Among the shortcomings, consumers highlight sediment, turbidity, foreign aromas.

Most of the surveyed producers use pure yeast cultures, which makes Pét-Nat more stable and predictable. Almost all producers who have been producing Pét-Nat for two or more years have increased their production volumes and those who tried it for the first time were satisfied with the first experiments and intend to continue producing Pét-Nat. There is a desire for development and efforts of producers to satisfy consumer preferences and expectations, which proves the feasibility and relevance of improving the technology.

The improvement of the technology for the production of sparkling wines of the Pét-Nat type involves the selection of 10 % of the volume of gravity-flow must during crushing, sulphiting the selected must to a level of 40 mg/dm<sup>3</sup> and storing it at a temperature of 0 °C.

The main part of the wine material is processed and full fermentation is carried out. Fermented dry wine is removed from the yeast sediment. The primary must is “dosed” to a residual sugar level of 18 g/dm<sup>3</sup>. Fermentation is started with a fresh yeast culture and bottled.

Samples produced using the improved technology were subjected to organoleptic tests. Among the Pét-Nat samples tasted, the highest scores were received by sample 4 – 92 points and sample 5 – 93 points, which proves the positive impact of the improved technology on the sensory profile of Pét-Nat.

The yeast preparations EnartisFerm PERLAGE and Erbslöh Oenoferm Rose had the best effect on the formation of Pét-Nat aromas. The yeast preparations SIHA Aktivhefe 4 and APRO-FERM SHAMP changed the aromatic profile of the must. The proposed improved technology makes it possible to solve the described problems for both consumers and producers, simplifying the manufacturing technology and making Pét-Nat more understandable for consumption.

### Bibliography

1. Gately I. Drink: a cultural history of alcohol. London : Penguin, 2008.
2. Perevozova I. V., Parkhomchuk S. S. Consumer priorities regarding changes and trends in the development of Ukrainian authentic goods in the global economic environment. *Biznes, innovatsii, menedzhment: problemy ta perspektyvy*. 2025. P. 184–185.
3. Demyanenko O., Petrichak O. Formation of a brand of regional food products in the conditions of digitalization of the economy. *Zbirnyk naukovykh prats Cherkaskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Serii: Ekonomichni nauky*. 2025. Vol. 26, № 75(2). P. 32–43.
4. Khanas U. Sotsio-kulturnyi prostir ta kulturnyi turizm u Zakarpatti: transformatsii ta perspektyvy. Uzhhorod : Hoverla, 2025. Rozdil II. P. 242–278.
5. McIntyre J., Germov J. The social appetite: sociology of food. Oxford : Oxford University Press, 2017.
6. Chon J. Y., Gergaud O., Heo C. Y. An empirical investigation of wine sales as a driver of financial performance in restaurants: insights from real-world sales data. *International Journal of Hospitality Management*. 2025. Vol. 128. Article 104139.



7. Agnoli L., Vasileiou E., Outreville J. F. Human values as cultural drivers for the consumption of wine and other alcoholic beverages: a cross-country analysis. *EuroMed Journal of Business*. 2025.
8. Vlahović B., Antić K. Wine consumption in the world's largest wine consuming countries. *Acta Agriculturae Serbica*. 2025. Vol. 30, № 59. P. 43–52.
9. Bezhenar I. Ukrainian wine market in 2024. *Commodity science. Technologies. Engineering*. 2025. Vol. 53, № 1. P. 54–91.
10. Brikova T. Peculiarities of winemaking development in promising wine-producing regions of Ukraine. *Innovatsii ta tekhnologii v sferi posluh i kharchuvannia*. 2025. № 2(16). P. 32–36.
11. Pavlenko S., Vasiliev O. Current issues in humanities. 2025.
12. Ageieva I., Nebesnyuk Y. Research of the current state and directions of strategy for the restoration of vinegrowing and wine production in Ukraine. *Food Industry Economics*. 2017. Vol. 8, № 4. P. 58–66. DOI: <https://doi.org/10.15673/fie.v8i4.461>
13. Bezhenar I. Wine consumer behavior: demographic, social and emotional factors in the context of sustainable development. *Aktualni pytannia ekonomichnykh nauk*. 2025. № 7.
14. Petrenko O. Green revolution in the agricultural sector: the path to sustainable economic development. *Food Industry Economics*. 2023. Vol. 15, № 2. P. 38–43. DOI: <https://doi.org/10.15673/fie.v15i2.2674>
15. Vasylik O. V., Gorodetskii E. R. Current status and prospects of the use of alternative oak wood preparations in wine production. *Zdorovia liudyny i natsii*. 2025. Vol. 3, № 3. P. 15–33. DOI: <https://doi.org/10.31548/humanhealth.3.2025.15>
16. Holovachko V. M., Hulyanych V. I. Modern models of innovative transformation of wineries. *Investytsii: praktyka ta dosvid*. 2025. № 8. DOI: <https://doi.org/10.32702/2306-6814.2025.8.140>
17. Sidorkiewicz M., Królikowska K., Dyzek B., Pijet-Migon E., Dubel A. Artificial intelligence for sustainable wine industry: AI-driven management in viticulture, wine production and enotourism. *arXiv preprint*. 2025. arXiv:2507.21098
18. Rivera Chavez Z. B., Porcaro A., De Simone M. C., Guida D. Improving sustainable viticulture in developing countries: a case study. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, № 12. Article 5338.
19. Bene Z., Zsófi Z. The characteristics of the natural winemaking philosophy and its role in sustainability in Hungary. *Uncorked: Negotiating science and belief in the natural wine movement*. Cham : Springer Nature Switzerland, 2025. P. 163–177.
20. Polishchuk M. M., Mukoid R. M., Babych I. M. Features of the production process of pet-nat from cherries. *Naukovi zdobutky u vyrishenni aktualnykh problem vyrobnytstva ta pererobky syrovyny, standartyzatsii i bezpeky prodovolstva : tezy XIII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii vchenykh, aspirantiv i studentiv, 10–11 kvitnia 2025 roku*, Kyiv. Kyiv : NUBiP, 2025. P. 352–353.
21. Serna D. B., Delgado V. T., Del Arco Fernández V. Natural wine in Spain through the case of Gredos: making wine, creating. *Uncorked: Negotiating science and belief in the natural wine movement*. Cham : Springer Nature Switzerland, 2025. P. 115.
22. Epstein B. S. Champagne: a global history. London : Reaktion Books, 2025.
23. Wei R., Wang H., Li H. Sustainability. *Uncorked: Negotiating science and belief in the natural wine movement*. Cham : Springer Nature Switzerland, 2025. P. 193.
24. Fodor's Essential Argentina: with the Wine Country, Uruguay and Chilean Patagonia. New York : Fodor's Travel, 2025.
25. Zirakashvili N., Vepkhishvili N. Making Georgian Pet Nat and studying its properties. *Intercultural Dialogues Transactions*. 2023. № 7. P. 58–62.
26. Master O. Compendium of International Methods of Wine and Must Analysis. Paris : International Organisation of Vine and Wine, 2024.

Дата першого надходження статті до видання: 26.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026

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





**Г. Каплан, Т. Манолі, О. Мирошніченко, Я. Баришева, Т. Афанасьєва**

*Одеський національний технологічний університет*

## **ПРОБЛЕМИ, ПЕРСПЕКТИВИ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА PÉT-NAT В УКРАЇНІ**

### *Анотація*

Сьогодні на споживчому ринку зростає популярність ігристого вина Pét-Nat, виробленого за технологією Ancestrale. В Україні й в усьому світі відсутнє законодавче регулювання виробництва вина типу Pét-Nat. Мета роботи – визначити обізнаність споживачів і перспективи виробництва Pét-Nat в Україні; дослідити використання різних штамів дріжджів у процесі ферментації для покращення якості вина; фізико-хімічні, органолептичні показники ігристого напою. Методологія: обізнаність споживачів і виробників про Pét-Nat проводилася за допомогою онлайн-опитування; для виробництва ігристих вин використовувалася класична технологія із застосуванням різних штамів дріжджів; фізико-хімічні показники визначалися за стандартними методами; органолептичні дослідження Pét-Nat проводилися з використанням системи оцінки Міжнародної організації виноградарства та вина OIV (баловий метод). Наукова новизна: уперше вивчено технологію виробництва ігристих вин Pét-Nat із сортів винограду, вирощених в українських умовах, і показники якості готового продукту. Висновки: опитування довело, що споживачі віддають перевагу тихим винам, але 14 % обрали Pét-Nat, а виробники відзначили проблеми з технологією та якістю вина. Фізико-хімічні показники вина Pét-Nat відповідали вимогам чинного стандарту для ігристих вин. Органолептичні показники зразків Pét-Nat визначалися за допомогою методів сенсорного аналізу. Найвищий бал отримав зразок вина, виготовлений зі штамом дріжджів EnartisFerm PERLAGE (аромат рожевого персика, барбарису й тривалий післясмак), найнижчий бал отримав зразок, виготовлений зі штамом дріжджів APRO-FERM SHAMP через слабший перляж та ознаки окислення. Найбільш збалансований зразок отримано за участю композиції штамів дріжджів EnartisFerm PERLAGE й Erbslöh Oenoferm Rose з квітковими ароматами. Наукові дослідження дали змогу вдосконалити технологію, покращити якість ігристого вина Pét-Nat шляхом використання, у тому числі певних штамів дріжджів у процесі ферментації, а також зробити цей асортимент більш конкурентоспроможним на ринку та зрозумілим для споживача.

**Ключові слова:** ігристе вино, Pét-Nat, удосконалення технології, параметри, сенсорний аналіз, методологія OIV.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-31>

УДК 664.68.002.237

Л. С. Ковальова, здобувачка вищої освіти

ORCID: 0009-0006-5507-9344

Н. А. Сова, канд. техн. наук, доц.

ORCID: 0000-0003-4750-2473

Е. Б. Алієв, д-р техн. наук, ст. дослідник

ORCID: 0000-0003-4006-8803

В. С. Кошулько, канд. техн. наук, доц.

ORCID: 0000-0002-0744-6318

*Дніпровський державний аграрно-економічний університет*

e-mail: sova.n.a@dsau.dp.ua

## ВПЛИВ ЦІЛЬНОЗЕРНОВОГО БОРОШНА НА ЯКІСТЬ І ПРОФІЛЬ ТЕКСТУРИ ЗАТЯЖНОГО ПЕЧИВА

*Анотація.* У статті обґрунтовано актуальність удосконалення рецептури затяжного печива в контексті зростання попиту на продукти раціонального харчування. Мета роботи – дослідження впливу рецептури печива затяжного з використанням цільнозернового пшеничного та спельтового борошна, у тому числі з чорнозерних сортів, на якісні показники й профіль текстури готових виробів. Дослідження проведено на п'яти зразках: контроль і чотири дослідні з повною заміною борошна на цільнозернове пшеничне, цільнозернове спельтове, чорнозерне цільнозернове пшеничне й чорнозерне цільнозернове спельтове. Установлено, що використання цільнозернових та особливо чорнозерних видів борошна зумовлює зниження світлоти готового печива та формування більш насиченого темного кольору, підвищення вмісту білка, клітковини й зольних речовин порівняно з контролем. Реологічні дослідження показали істотну модифікацію властивостей тіста. За сукупністю отриманих результатів найбільш перспективними визначено зразки на основі чорнозерного цільнозернового борошна пшениці та спельти.

*Ключові слова:* борошно цільнозернове, чорнозерна пшениця, чорнозерна спельта, печиво затяжне, реологічні властивості.

*Постановка проблеми.* Актуальність наукових досліджень щодо вдосконалення рецептури затяжного печива зумовлена все більшим інтересом споживачів до продуктів здорового та раціонального харчування, багатих на харчові волокна, мікронутрієнти й біологічно активні сполуки. Затяжне печиво є зручним для модифікації видом борошняних кондитерських виробів завдяки своїй структурі, низькому вологовмісту й тривалому терміну зберігання. Включення цільнозернового борошна до рецептури дає змогу підвищити поживну та біологічну цінність виробів за рахунок збереження оболонкових частин зерна, які містять клітковину, вітаміни групи В, мінеральні речовини й антиоксиданти. Водночас традиційні рецептури затяжного печива базуються переважно на традиційному сортовому борошні, що обмежує їх функціональний потенціал і неповною мірою відповідає сучасним рекомендаціям щодо структури щоденного раціону.

Разом із тим використання цільнозернового борошна може ускладнити технологічний процес виробництва печива затяжного, оскільки воно впливає на водопоглинальну здатність тіста, розвиток клейковинного каркаса, реологічні властивості, формування пористої структури й показники хрусткості готових виробів. Надмірний уміст оболонкових часток може призводити до підвищеної крихкості, погіршення формостійкості й зміни смако-ароматичного профілю печива. У зв'язку з цим актуальним є проведення комплексних наукових досліджень, спрямованих на вивчення можливості використання цільнозернового борошна в рецептурі печива затяжного з метою забезпечення високих органолептичних і структурно-механічних характеристик виробів. Результати таких досліджень сприятимуть створенню конкуренто-



спроможного асортименту зтяжного печива з підвищеною поживною цінністю й оздоровчим спрямуванням.

*Аналіз останніх досліджень.* Біоактивні рослинні пігменти – антоціани, фітомеланіни та каротиноїди – зумовлюють забарвлення рослинної сировини й належать до групи потужних природних антиоксидантів. Антиоксидантна активність харчових компонентів є одним із ключових чинників біологічної цінності харчових продуктів, оскільки ці сполуки здатні нейтралізувати вільні радикали та знижувати ризик розвитку захворювань, пов'язаних з оксидативним стресом (онкологічні, серцево-судинні, нейродегенеративні патології, ожиріння, запальні процеси), а також сповільнювати процеси старіння й захищати організм від ультрафіолетового випромінювання [1].

На відміну від овочів і фруктів, злакові культури не є традиційним джерелом антоціанів, однак продукти їх переробки становлять основу щоденного раціону населення світу. У зв'язку з цим злаки з кольоровим зерном (синім, фіолетовим, чорним), зокрема рис, пшениця та ячмінь, викликають все більший інтерес у споживачів, переробників, виробників функціональних продуктів і селекціонерів у багатьох країнах світу (Китай, Індія, США, Канада, Австралія, Японія, Корея, країни ЄС) [1].

Пшениця є базовою продовольчою культурою, тому створення сортів із підвищеним умістом антоціанів має значний потенціал для формування нових харчових моделей. Чорнозерна пшениця характеризується темним забарвленням зерна, зумовленим високою концентрацією антоціанів – антиоксидантів, подібних за дією до пігментів чорниці. Борошно з чорнозерної пшениці має інтенсивне темне забарвлення, нижчий глікемічний індекс і виражений горіховий смаковий відтінок.

Зерно та продукти переробки чорнозерної пшениці сприяють підвищенню антиоксидантного статусу, підтримці серцево-судинної системи, нормалізації рівня глюкози в крові, контролю маси тіла й поліпшенню травлення [2–7]. Вони містять значну кількість вітамінів групи В, білків, вуглеводів і мінеральних елементів (Fe, Zn, Cu, Ca, Mg, K, Se, P), перевершують традиційну пшеницю за зазначеними показниками й антиоксидантною активністю [2–4].

Особливу роль серед фенольних сполук відіграє ферулова кислота, що має виражений антиоксидантний ефект. У зерні чорнозерної пшениці ідентифіковано близько 225 метаболітів, переважно флавоноїдної природи, які формують його темне забарвлення [8]. Уміст глютену в чорнозерній пшениці є нижчим порівняно зі звичайною, однак вона не належить до безглютенових продуктів [9].

Борошно з чорнозерної пшениці відзначається підвищеним умістом харчових волокон, білків, мінеральних речовин та антоціанів, що зумовлює його вищу поживну й біологічну цінність порівняно з традиційним пшеничним борошном [10].

Спельта (*Triticum spelta* L.) є плівчастим різновидом м'якої пшениці. Озимий сорт спельти Білбері став першим в Україні сортом із кольоровим зерном, що характеризується підвищеною поживною цінністю. Зерно цього сорту містить 60–80 мг/кг фіолетових антоціанів, що забезпечує високу антиоксидантну активність і зумовлює його потенціал для використання в лікувально-профілактичному харчуванні та рецептурах функціональних продуктів [11].

Борошно з чорнозерної спельти має сірувато-білий відтінок і збалансований склад білків, вуглеводів, жирів, клітковини, мінеральних речовин і вітамінів. Воно є джерелом вітамінів групи В, а також мінеральних речовин (Mg, Zn, Fe, Mn, Cu та Se), характеризується зниженим умістом глютену у водорозчинній формі, що сприяє його кращому засвоєнню, а також містить як прості, так і складні вуглеводи, важливі для підтримки імунної системи [12].

Вітчизняні й зарубіжні дослідження у сфері кондитерського виробництва спрямовані на вдосконалення рецептур печива зтяжного шляхом збагачення його біологічно цінними інгре-



дієнтами. Для цього використовують овочеві порошки та пюре, ріпакове борошно, соєві ізоляти, шроти (гарбузовий, лляний, розторопші, ріпаковий) та інші нетрадиційні компоненти [13–19]. Водночас використання борошна цільнозернового, а особливо з пшениці та спельти чорнозерних, у рецептурах печива залишається недостатньо дослідженим, що обґрунтовує доцільність подальших наукових розробок у цьому напрямі.

*Формулювання мети статті (постановка завдання).* Метою роботи є дослідження впливу рецептури печива зтяжного з використанням цільнозернового пшеничного та спельтового борошна, у тому числі з чорнозерних сортів, на якісні показники й профіль текстури готових виробів.

Для досягнення поставленої мети передбачено виконання таких завдань: дослідити показники якості цільнозернового пшеничного та спельтового борошна, у тому числі отриманого з чорнозерних сортів; здійснити аналіз асортименту печива зтяжного, у тому числі оздоровчого призначення, представленого на споживчому ринку України; розробити й виготовити дослідні зразки печива зтяжного на основі обраного цільнозернового борошна, визначити вологість, колірні характеристики та реологічні властивості тіста; провести органолептичну оцінку готових виробів; визначити масову частку вологи, білків, жирів, клітковини та золи в дослідних зразках печива, а також розрахувати їх поживну й енергетичну цінність; дослідити реологічні властивості готових зразків печива зтяжного.

При проведенні дослідження за прототип обрано типову рецептуру печива зтяжного «Марія», у якій повністю замінювали борошно пшеничне вищого сорту на борошно цільнозернове пшеничне й спельтове, у тому числі з чорнозерних сортів.

У результаті одержано 5 зразків печива: зразок № 1 – контрольний зразок; зразок № 2 – із цільнозернового пшеничного борошна; зразок № 3 – із цільнозернового спельтового борошна; зразок № 4 – із чорнозерного цільнозернового пшеничного борошна; зразок № 5 – із чорнозерного цільнозернового спельтового борошна.

Виготовлення дослідних зразків печива зтяжного здійснювали таким чином. На першому етапі проводили зважування попередньо підготовлених інгредієнтів згідно з рецептурним складом. Далі борошно, цукор, крохмаль і гідрокарбонат натрію просіювали та поміщали в ємність для замішування тіста. До суміші сухих компонентів поетапно вводили маргарин, інвертний сироп, меланж, молоко й ароматизатор, після чого здійснювали замішування до отримання однорідної пластичної маси, придатної для формування тістових заготовок. На наступній стадії тісто розкочували до товщини 5 мм, після чого формували заготовки за допомогою форм для печива. Перед випіканням духову шафу попередньо розігрівали до температури 200 °С, сформовані заготовки переносили на лист, попередньо застелений пергаментним папером. Випікання здійснювали протягом 10 хв до утворення характерного золотистого забарвлення готових виробів.

Оцінювання органолептичних показників якості дослідних зразків печива зтяжного проводили відповідно до вимог ДСТУ 3781:2014 «Печиво. Загальні технічні умови». Масову частку вологи в зразках борошна визначали з використанням вагів-воломіра Radwag MA 110.R. Якість клейковини визначали за допомогою вимірювача деформації клейковини OLISLAB 6200 (ІДК-ЗМУ). Для дослідження колірних характеристик застосовували портативний колориметр Linshang LS173. Реологічні властивості тіста оцінювали за допомогою екстенсограм за загальноприйнятою методикою. Профіль текстури готових виробів оцінювали за допомогою відповідної методики й пристрою для його здійснення [20]. Масову частку білків, жирів, клітковини та золи в готових виробах визначали за стандартними методиками.

*Основна частина.* На першому етапі визначено якість борошна, обраного для дослідження, результати представлено на рис. 1. Масова частка вологи в досліджуваних зразках борошна

знаходилася в межах від 9,5 % (цільнозернове пшеничне борошно) до 12,8 % (чорнозерне цільнозернове спельтове борошно). Уміст сирової клейковини в борошні пшеничному вищого сорту становив 24,8 %, масова частка клейковини в зразках борошна цільнозернового варіювала від 21,60 % (чорнозерне цільнозернове пшеничне борошно) до 27,20 % (чорнозерне цільнозернове спельтове борошно). Установлено, що вміст клейковини в зразку чорнозерного цільнозернового спельтового борошна перевищував відповідний показник традиційного пшеничного борошна вищого сорту. Аналіз якості клейковини показав, що пшеничне борошно вищого сорту, цільнозернове спельтове борошно та чорнозерне цільнозернове спельтове борошно характеризувалися показниками вимірювача деформації клейковини в межах 63–68 од. ВДК, що відповідає першій групі якості (добра клейковина). Натомість цільнозернове пшеничне борошно та чорнозерне цільнозернове пшеничне борошно мали значення 30 од. ВДК, що, згідно з класифікацією, відповідає третій групі якості (незадовільно міцна клейковина).

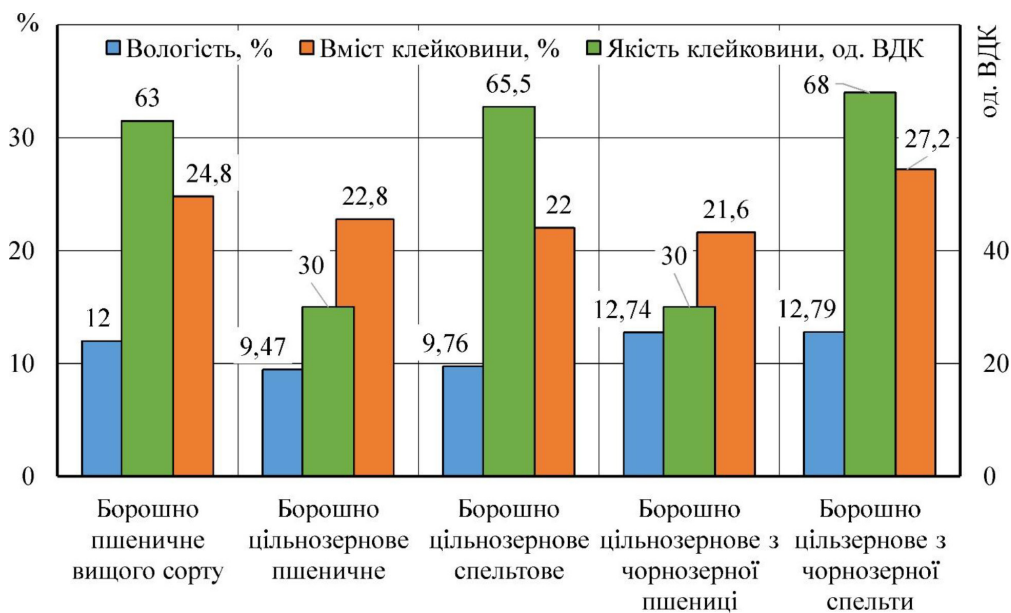


Рис. 1. Характеристика цільнозернового борошна, обраного для дослідження

Аналіз асортименту печива затяжного типу «Марія», що реалізують на ринку України, свідчить про досить широку представленість продукції різних виробників, серед яких – АТ «Житомирські ласощі», ТОВ «КФ «Ярич», ПКФ «Зов», ТОВ Фірма «Грона», ПрАТ «ХБФ», ТОВ «Кріоліт-Д», ПрАТ «Кондитерська фабрика «Лагода» тощо.

Близько третини представлених позицій виготовляють за типовою рецептурою без унесення функціонально збагачуючих компонентів. Це свідчить про стабільний попит на традиційний варіант печива «Марія» як базовий продукт масового споживання.

У двох позиціях («Diet Maria з фруктозою» АТ «Житомирські ласощі» й «Maria cookies with fructose» ПрАТ «Кондитерська фабрика «Лагода») застосовано фруктозу як замітник цукру. Така модифікація рецептури орієнтована на споживачів, які контролюють споживання сахарози та надають перевагу продуктам зі зниженим глікемічним навантаженням. Окремі виробники використовують йогурт-порошок і сухе знежирене молоко з кальцієм («Марія з йогуртом» і «Марія з молоком та кальцієм» ТОВ «КФ «Ярич»). Це дає змогу позиціонувати продукцію як джерело додаткових поживних речовин і формувати імідж функціонального або оздоровчого продукту. Частина асортименту представлена виробами з додаванням компонентів, що підвищують уміст харчових волокон і біологічно активних речовин: борошно пшеничне цільнозернове («Марія цільнозернове» ТОВ «КФ «Ярич»), висівки пшеничні («Марія з висівками» ТОВ «КФ «Ярич»,



«Maria with bran» ПрАТ «ХБФ»), насіння льону («Марія з насінним льону» ПКФ «Зов»), борошно соєве («Maria biscuit» ТОВ Фірма «Грона»), борошно кукурудзяне («Maria premium» ПрАТ «ХБФ»), кокосова стружка («Марія з кокосом» ТОВ «КФ «Ярич»). Зазначені інгредієнти спрямовані на підвищення поживної цінності, збагачення продукту клітковиною, рослинними білками та мінеральними речовинами. У деяких зразках рецептура доповнена какао-порошком («Марія печиво зтяжне з какао» ПрАТ «Кондитерська фабрика «Лагода»), що спрямовано переважно на розширення смакової лінійки, а не на функціональне збагачення.

У проаналізованому асортименті відсутні вироби із застосуванням борошна з чорнозерної пшениці або спельти, що свідчить про наявність ринкової ніші для розроблення інноваційної рецептури. Отже, аналіз підтверджує доцільність подальших досліджень, спрямованих на вдосконалення рецептур печива зтяжного шляхом використання цільнозернової сировини з підвищеним умістом біологічно активних сполук.

Визначено масову частку вологи в тісті дослідних зразків печива зтяжного, яка для зразка № 1 становила 20,7 %, зразка № 2 – 21,0 %, зразка № 3 – 20,4 %, зразка № 4 – 22,4 %, зразка № 5 – 21,8 %.

Проведено органолептичну оцінку готових виробів – печива зтяжного – і встановлено, що всі дослідні зразки відповідали основним вимогам до форми та зовнішнього вигляду: вироби не мали вм'ятин і механічних пошкоджень, характеризувалися правильними фігурними краями та збереженням геометрії після випікання. Це свідчить про коректно підібрані режими формування й термічної обробки тіста. Поверхня всіх зразків була гладкою та непідгорілою, без значних дефектів. Водночас у зразках № 2 і № 3 відмічено наявність дрібних тріщин і характерної зернистості, що зумовлено використанням цільнозернової сировини. Такі особливості є не технологічним браком, а, навпаки, підтверджують застосування нетрадиційних видів борошна й можуть розглядатися як ознака функціонального спрямування продукту. Смак і запах у всіх зразках відповідали характеристикам зтяжного печива, без сторонніх присмаків і запахів. При цьому зразки № 2–5 мали виражені зернові та горіхові нотки, а також легкий присмак цільнозернового борошна чи висівок, що сформувало більш насичений сенсорний профіль і може позитивно впливати на сприйняття виробів як продуктів оздоровчого спрямування. У розломі всі зразки були добре пропечені, з рівномірною пористістю, без пустот і слідів непромішування тіста. У зразках № 2 і № 3 відзначено наявність дрібних часточок оболонки зерна, що рівномірно розподілені в структурі м'якушки та не порушують її цілісності.

Крім визначення органолептичних показників якості традиційним способом, визначали колір борошна, тіста й готових виробів за допомогою портативного колориметра (таблиця 1).

Аналіз наведених даних свідчить про суттєвий вплив виду борошна на кольорові характеристики борошна, тіста й готових виробів за показниками  $L$  (світлота),  $a$  (червона складова) та  $b$  (жовта складова).

Найвищим значенням світлоти ( $L = 93,2$ ) характеризувалося борошно пшеничне вищого сорту, що підтверджує його високу ступінь очищення та мінімальний уміст оболонкових частинок. Цільнозернові зразки мали значно нижчі значення  $L$  (81,9–82,0 для традиційної пшениці та спельти й 73,1–74,7 для їх чорнозерних форм), що зумовлено наявністю висівкових частинок, пігментів і біологічно активних речовин. Показник  $a$  в цільнозернових зразках був вищим (3,4–6,3 проти 1,0 у борошна вищого сорту), що свідчить про більш виражений червонуватий відтінок. Найвищі значення  $b$  зафіксовано в цільнозернового спельтового борошна (22,4), що вказує на інтенсивніший жовтий тон, характерний для спельти.

Після замішування відбулося закономірне зниження світлоти в усіх зразках. Тісто з борошна вищого сорту мало  $L = 75,5$ , тоді як у цільнозернових зразків цей показник зменшувався до 56,2–57,9, а в чорнозерних форм – до 40,9–41,8. Це свідчить про посилення впливу пігментова-

Таблиця 1

Колірні характеристики борошна, обраного для досліджень, тіста й готових виробів

Назва показника	Пшеничне борошно вищого сорту	Цільнозернове пшеничне борошно	Цільнозернове спельтове борошно	Чорнозерне цільнозернове пшеничне борошно	Чорнозерне цільнозернове спельтове борошно
Колір борошна					
<i>L</i>	93,2	81,9	82,0	74,7	73,1
<i>a</i>	1,0	3,4	6,1	6,3	5,5
<i>b</i>	13,5	13,3	22,4	20,0	18,3
Колір тіста					
<i>L</i>	75,5	56,2	57,9	41,8	40,9
<i>a</i>	0,8	7,6	8,0	8,6	7,6
<i>b</i>	22,6	21,9	19,4	12,2	10,1
Колір готових виробів					
<i>L</i>	73,0	61,4	63,1	50,6	44,9
<i>a</i>	7,1	8,4	7,8	7,5	7,3
<i>b</i>	32,6	25,4	26,5	16,8	15,4

них оболонкових часток у зволоженому середовищі. Показник *a* зростав у всіх цільнозернових зразках (7,6–8,6), що вказує на формування більш насиченого червонувато-коричневого відтінку тіста. Водночас значення *b* у чорнозерних зразків значно нижче (10,1–12,2), ніж у традиційних (19,4–21,9), що свідчить про менш виражену жовтизну та більш темний загальний тон.

Після випікання світлота знизилася порівняно з борошном, але частково зросла порівняно з тістом за рахунок утворення рум'яної скоринки. Найсвітлішими залишалися вироби з борошна вищого сорту ( $L = 73,0$ ). Вироби з традиційного цільнозернового борошна мали середні значення світлоти (61,4–63,1), тоді як з чорнозерних форм – найнижчі (44,9–50,6), що сформувало насичений темно-коричневий колір. Показник *a* в усіх зразках після випікання набув подібних значень (7,1–8,4), що пов'язано з реакціями меланоїдиноутворення. Значення *b* було максимальним у виробів із борошна вищого сорту (32,6), що зумовлює виражений золотистий відтінок, тоді як у виробів із чорнозерного борошна цей показник суттєво нижчий (15,4–16,8), що надає їм більш темного, насиченого кольору.

Усі дослідні зразки зтяжного печива продемонстрували високий рівень органолептичних показників за результатами дегустації. Водночас дещо нижчі бали зафіксовані для зразка № 2, виготовленого з борошна пшеничного цільнозернового, і зразка № 3 – на основі спельтового цільнозернового борошна. Найкращі результати отримав контрольний зразок, а також зразки № 4 (з чорнозерного цільнозернового пшеничного борошна) та № 5 (з чорнозерного цільнозернового спельтового борошна), які характеризувалися найвищою сумарною оцінкою.

На рис. 2 наведено результати визначення масової частки вологи, білків, жирів, клітковини й золи в усіх дослідних зразках печива зтяжного.

Порівняльний аналіз хімічного складу п'яти зразків зтяжного печива свідчить про виражений вплив виду використаного борошна на вміст основних нутрієнтів – білків, жирів, клітковини та мінеральних речовин. Контрольний зразок № 1, виготовлений із пшеничного борошна вищого сорту, характеризувався найнижчою поживною цінністю, тоді як застосування цільнозернового й особливо чорнозерного борошна забезпечило формування більш збагаченого нутритивного профілю.

Уміст протеїну поступово зріс від 10,8 % у контрольному зразку до 13,6 % у зразку № 5. Найвищі показники зафіксовано в зразках № 4 та № 5, що узгоджується з підвищеною білковою чорнозерної пшениці та спельти. Це підтверджує доцільність використання зазначеної

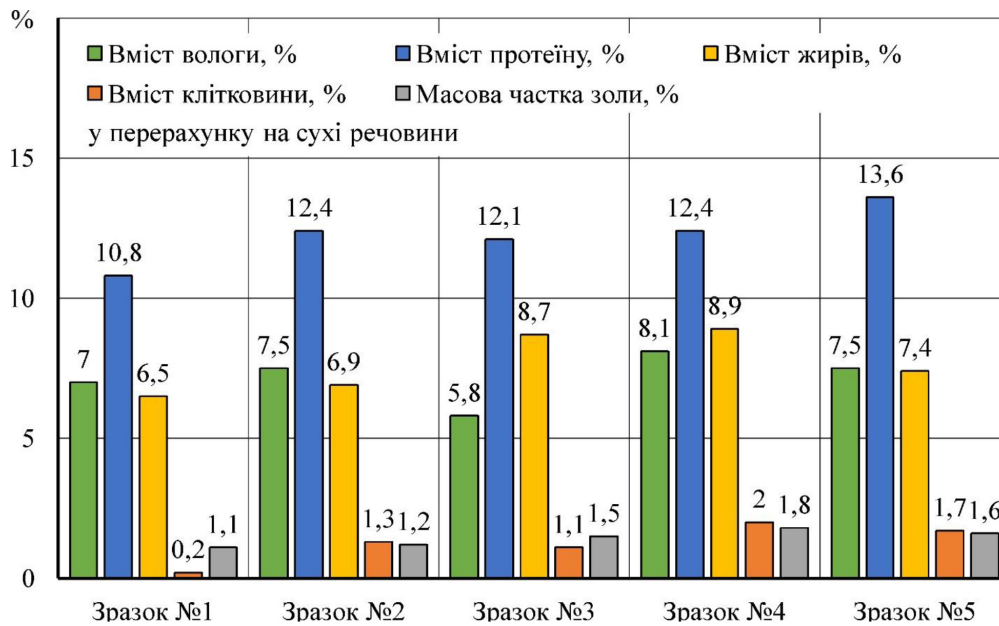


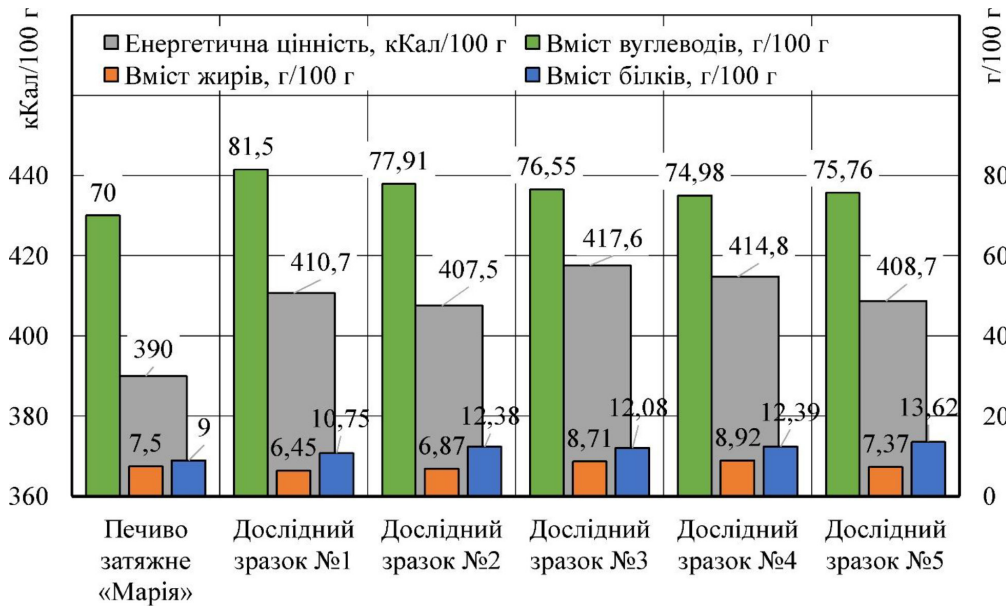
Рис. 2. Склад дослідних зразків печива затяжного

сировини для розроблення продуктів оздоровчого призначення з підвищеним вмістом білка. Масова частка жирів у контрольному зразку становила 6,5 %, тоді як у дослідних зразках вона зросла до 8,9 % (зразок № 4). Збільшення показника зумовлене наявністю оболонкових частинок цільного зерна, які містять природні ліпіди. Дещо нижчий рівень жиру в зразку № 5 (7,4 %) може бути пов'язаний із особливостями ліпідного складу чорнозерної спельти. Особливо показовими були зміни вмісту клітковини як ключового показника оздоровчої цінності. У контрольному зразку її кількість мінімальна (0,2 %), що характерно для сортового борошна. У зразках № 2 і № 3 цей показник перевищував 1 %, що зумовлено використанням цільнозернового борошна. Найвищі значення зафіксовано в зразках № 4 (2,0 %) та № 5 (1,7 %), що пояснюється більшою концентрацією оболонкових структур і харчових волокон у чорнозерних культурах. Підвищений уміст клітковини сприяє нормалізації травлення та формує функціональну спрямованість продукту. Зольність, яка відображає мінеральний склад виробів, також зростала при використанні цільнозернової сировини. Найнижче значення встановлено в контрольному зразку (1,1 %), тоді як у дослідних зразках воно коливалося в межах 1,5–1,8 %. Максимальний показник характерний для зразка № 4, що свідчить про підвищений вміст макро- та мікроелементів, властивих чорнозерній пшениці.

Порівняння поживної та енергетичної цінностей дослідних зразків затяжного печива з виробничими наведено на рис. 3.

Установлено, що дослідні зразки печива характеризувалися вищим умістом білків і вуглеводів порівняно з виробничим зразком, що свідчить про їх покращений нутритивний профіль. Водночас масова частка жиру в дослідних зразках була нижчою, ніж у промисловому аналозі, що можна розглядати як позитивний показник з огляду на тенденції зниження споживання насичених жирів у раціоні. Енергетична цінність дослідних зразків перебувала в межах 407–418 кКал/100 г, що перевищує показник виробничого зразка (390 кКал/100 г). Підвищення калорійності зумовлено насамперед більшим умістом білків і складних вуглеводів, притаманних цільнозернової і чорнозерній сировині, що забезпечує більш високу поживну та біологічну цінність розроблених виробів.

Досліджено реологічні властивості тіста й профіль текстури готових виробів (таблиці 2, 3).



**Рис. 3. Порівняльна характеристика поживної та енергетичної цінності дослідних зразків зтяжненого печива з промисловими**

Таблиця 2

Результати реологічних досліджень тіста

№ з/п	Максимальна стійкість $R_m$ , EU	Деформація при максимальній стійкості $E_m$ , мм	Стійкість при 50 мм деформації $R_{50}$ , EU	Розтяг $E$ , мм	Відношення $R_m/E$	Енергія $E_n$ , см <sup>2</sup>
1	255,8 ± 28,1	50,7 ± 19,2	140,4	92,7 ± 19,6	2,8 ± 0,4	21110,4 ± 4764,4
2	293,0 ± 40,1	3,7 ± 0,3	140,4	22,1 ± 2,8	13,5 ± 3,4	5113,1 ± 536,3
3	210,7 ± 2,1	7,1 ± 1,9	140,4	32,0 ± 2,9	6,6 ± 0,6	6490,8 ± 777,8
4	301,1 ± 61,1	4,0 ± 1,9	140,4	18,3 ± 3,8	16,5 ± 0,4	4202,1 ± 2290,5
5	310,51 ± 10,87	6,72	140,4	30,3 ± 2,7	10,3 ± 1,1	8017,0 ± 630,2

Аналіз результатів реологічних досліджень тіста свідчить про суттєвий вплив виду використаного борошна на показники його розтяжності й міцності. Максимальна стійкість до розриву ( $R_m$ ) зростала від 210,7 EU (зразок № 3) до 310,51 EU (зразок № 5). Найнижче значення зафіксовано в зразка № 3, що характеризує його як менш міцне тісто. Найвищі показники мали зразки № 4 і № 5 (301,1 та 310,51 EU відповідно), що свідчить про формування більш жорсткої та пружної структури клейковинного каркаса. Зразок № 1 також продемонстрував досить високу стійкість (255,8 EU), однак поступається зразкам № 4 та № 5. Деформація при максимальній стійкості ( $E_m$ ) була найбільшою в зразка № 1 (50,7 мм), що вказує на його високу пластичність і здатність до значного розтягування до моменту руйнування. Натомість у зразків № 2, № 4 й № 5 цей показник значно нижчий (3,7–6,7 мм), що характеризує їх як менш розтяжні та більш крихкі при навантаженні.

Загальна розтяжність тіста ( $E$ ) також істотно різнилася: максимальне значення мав зразок № 1 (92,7 мм), тоді як мінімальне – зразок № 4 (18,3 мм). Зразки № 2, № 3 і № 5 зайняли проміжне положення (22,1–32,0 мм). Таким чином, контрольний зразок сформував найбільш еластичне тісто, тоді як зразки № 2 й № 4 характеризувалися підвищеною жорсткістю та обмеженою розтяжністю. Показник співвідношення  $R_m/E$ , який відображає баланс між міцністю й розтяжністю, був найвищим у зразків № 4 (16,5) та № 2 (13,5), що свідчить про домінування пружних властивостей над пластичними. Найнижче значення характерне для зразка № 1 (2,8), що підтверджує його більш збалансовану, еластичну структуру.



Енергія деформації ( $E_n$ ), яка характеризує загальну силу, необхідну для руйнування тіста, була максимальною в зразка № 1 (21110,4 см<sup>2</sup>), що вказує на найвищу газотримувальну здатність і потенційну хлібопекарську цінність. У зразків № 2–5 енергія значно нижча (4202,1–8017,0 см<sup>2</sup>), причому мінімальне значення спостерігалось в зразка № 4.

Таблиця 3

## Результати досліджень профілю текстури готових виробів

№ з/п	Стійкість	Індекс пружності	Когезивність	Жувальність
1	4,3 ± 0,3	0,8 ± 0,03	0,7 ± 0,1	3936,9 ± 924,5
2	2,9 ± 0,2	0,6 ± 0,3	0,7 ± 0,04	5299,2 ± 2778,7
3	3,9 ± 1,6	0,8 ± 0,1	0,6 ± 0,03	2762,1 ± 1258,0
4	2,9 ± 0,5	0,8 ± 0,1	0,7 ± 0,1	72319,3 ± 3239,8
5	3,1 ± 0,3	0,8 ± 0,04	0,70 ± 0,02	6760,7 ± 1022,6

Аналіз показників профілю текстури готових виробів свідчить про суттєвий вплив виду використаного борошна на текстурні характеристики зтяжного печива. Показник стійкості (твердості) варіював у межах 2,9–4,3 од. Найвищу стійкість мав зразок № 1 (4,3), що характеризує його як більш щільний і структурно сформований виріб. Зразки № 2 й № 4 демонстрували найнижчі значення (по 2,9), що може свідчити про більш крихку або менш щільну структуру. Зразки № 3 та № 5 зайняли проміжне положення (3,9 і 3,1 відповідно), забезпечуючи збалансовану текстуру. Індекс пружності в більшості зразків становив 0,8, що свідчить про достатню здатність виробів відновлювати форму після деформації. Нижче значення зафіксовано в зразка № 2 (0,6), що може вказувати на менш еластичну структуру. У цілому всі зразки характеризувалися прийнятним рівнем пружності для зтяжного печива.

Когезивність (внутрішня зв'язність структури) перебувала у вузькому діапазоні 0,6–0,7. Найнижчий показник мав зразок № 3 (0,6), що може свідчити про дещо менш щільний зв'язок між структурними елементами. Інші зразки демонструють однаковий або близький рівень когезивності (0,7), що вказує на стабільність внутрішньої структури виробів. Найбільш диференційованим показником є жувальність. Найменше значення зафіксовано в зразка № 3 (2762,1), що свідчить про більш м'яку текстуру й менші зусилля при пережовуванні. Зразок № 1 мав середній рівень (3936,9), а зразки № 2 й № 5 – підвищені показники (5299,2 та 6760,7 відповідно), що характеризує їх як більш щільні й енергоємні при жуванні. Найвищий показник зафіксовано в зразка № 4 (72319,3), що значно перевищує інші значення й може свідчити про надмірну щільність структури.

*Висновки.* Масова частка вологи в досліджуваних зразках борошна знаходилася в межах від 9,5 % (цільнозернове пшеничне борошно) до 12,8 % (чорнозерне цільнозернове спельтове борошно). Уміст сирової клейковини в борошні варіював від 21,6 % (чорнозерне цільнозернове пшеничне борошно) до 27,2 % (чорнозерне цільнозернове спельтове борошно). Борошно пшеничне вищого сорту, цільнозернове спельтове й чорнозерне цільнозернове спельтове характеризувалися показниками вимірювача деформації клейковини в межах 63–68 од. ВДК, що відповідає першій групі якості (добра клейковина). Натомість борошно цільнозернове пшеничне та чорнозерне цільнозернове пшеничне мали значення 30 од. ВДК, що, згідно з класифікацією, відповідає третій групі якості (незадовільно міцна клейковина).

Асортимент печива «Марія» на ринку України представлений переважно класичними варіантами з обмеженим функціональним збагаченням. Інноваційні рецептурні рішення здебільшого пов'язані із заміною цукру фруктозою та додаванням харчових волокон. Частка продукції з використанням альтернативних видів борошна (соєвого, кукурудзяного, цільнозернового) є відносно



невеликою. В асортименті відсутні вироби із застосуванням чорнозерної пшениці або чорнозерної спельти, що свідчить про наявність ринкової ніші для розроблення інноваційної рецептури.

Усі дослідні зразки відповідали органолептичним вимогам до зтяжного печива. Зразок № 1 характеризувався класичними властивостями, тоді як зразки № 2–5 мали ознаки використання цільнозернової сировини, що сформувало більш насичений колір, зернисту структуру та виражені функціональні сенсорні характеристики без погіршення якості виробів.

Установлено чітку закономірність: зі збільшенням частки оболонкових компонентів і використанням чорнозерних сортів знижувалася світлота й жовтизна продукції та зростала інтенсивність червонувато-коричневих тонів. Найбільш світлі кольорові характеристики притаманні виробам із борошна вищого сорту, тоді як використання цільнозернового, особливо чорноземного, борошна формує більш темний, насичений колір, що може позитивно впливати на позиціонування виробів як продуктів оздоровчого спрямування.

Заміна борошна вищого сорту на цільнозернове та чорнозерне забезпечило статистично й технологічно обґрунтоване підвищення біологічної й поживної цінності зтяжного печива. Найбільш перспективними для виробництва продукції оздоровчого спрямування є зразки № 4 та 5, які поєднують підвищений уміст білка, клітковини й мінеральних речовин. Водночас показники вологості та масової частки жиру в усіх дослідних зразках відповідали вимогам ДСТУ 3781:2014 «Печиво. Загальні технічні умови».

Тісто зразка № 1 характеризувалося найкращим поєднанням еластичності й енергетичного потенціалу. Зразки № 4 й № 5 сформували більш міцну, але менш розтяжну структуру, що зумовлює їх підвищену жорсткість. Зразки № 2 й № 3 зайняли проміжне положення, демонструючи помірну міцність і розтяжність. Отримані результати підтверджують, що використання альтернативних видів борошна істотно змінює структурно-механічні властивості тіста, що необхідно враховувати при розробленні рецептур зтяжного печива.

Результати дослідження профілю текстури готових виробів свідчать, що зразки № 1, № 3 й № 5 сформували найбільш збалансовані текстурні характеристики. Зразок № 2 характеризувався меншою пружністю, тоді як зразок № 4 демонструє надмірно високий показник жувальності, що може впливати на споживчі властивості виробу. Загалом використання різних видів борошна суттєво впливає на структурно-механічні характеристики готового печива та потребує комплексної оцінки при розробленні рецептур оздоровчого спрямування.

За узагальненими результатами, отриманими під час виконання дослідження, рекомендованими до впровадження у виробництво визначені рецептури зтяжного печива на основі цільнозернового борошна з пшениці та спельти чорнозерних. Перспективними будуть подальші дослідження щодо визначення строку зберігання розробленого печива.

#### Список використаних джерел

1. Рибалка О. І., Моргун В. В., Моргун Б. В., Поліщук С.С. Вперше за тисячі років: кольорове зерно злаків як функціональна їжа майбутнього. *Вісник НАН України*. 2025. № 7. С. 7–27. DOI: <https://doi.org/10.15407/visn2025.07.007>
2. Kanno J. Ch., Devendera J., Manish T., Ritesh P., Ruchika Ch. Effect of Nano Urea vs Conventional Urea on the Nutrient Content, Uptake and Economics of Black Wheat (*Triticum aestivum* L.) along with Biofertilizers. *Biological Forum: An International Journal*. 2022. № 14(2a). P. 499–504.
3. Tian S.-Q., Chen Z.-C., Wei, Y.-C. Measurement of colour-grained wheat nutrient compounds and the application of combination technology in dough. *Journal of Cereal Science*. 2018. № 83. P. 63–67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.07.018>
4. Sharma N., Kumari A., Chunduri V., Kaur S., Banda J., Goyal A., Garg M. Anthocyanin biofortified black, blue and purple wheat exhibited lower amino acid cooking losses than white wheat. *LWT*. 2022. № 154. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112802>



5. Gupta R., Meghwal M., Prabhakar P. K. Bioactive compounds of pigmented wheat (*Triticum aestivum*): Potential benefits in human health. *Trends in Food Science & Technology*. 2021. № 110. P. 240–252. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.003>
6. Giordano D., Locatelli M., Travaglia F., Bordiga M., Reyneri A., Coisson J. D., Blandino M. Bioactive compound and antioxidant activity distribution in roller-milled and pearled fractions of conventional and pigmented wheat varieties. *Food Chemistry*. 2017. № 233. P. 483–491. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.065>
7. Dhua S., Kumar K., Kumar Y., Singh L., Sharanagat V.S. Composition, characteristics and health promising prospects of black wheat: A review. *Trends in food science & technology*. 2021. № 112. P. 780–794. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.04.037>
8. Kumari A., Sharma S., Sharma N., Chunduri V., Kapoor P., Kaur S.. Influence of bio-fortified colored wheats (purple, blue, black) on physicochemical, antioxidant and sensory characteristics of chapatti (Indian flatbread). *Molecules*. 2020. № 25(21). DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules25215071>
9. Saini P., Kumar N., Kumar S., Mwaurah P. W., Panghal A., Atkan A. K. Bioactive compounds, nutritional benefits and food applications of colored wheat: A comprehensive review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2021. № 61(19). P. 3197–3210. DOI: 10.1080/10408398.2020.1793727
10. Kumari S., Tzudir L. Black wheat: next big thing in India's Agricultural landscape. *Biotica Research Today*. 2021. № 3(4). P. 240–242.
11. Рибалка О. І., Поліщук С. С., Червоніс М. В., Моргун В. В., Моргун Б. В. Унікальна пшениця спельта (*Triticum aestivum ssp. spelta L.*) з темно-фіолетовим зерном. *Фізіологія рослин і генетика*. 2024. Т. 56, № 5. С. 419–430. DOI: <https://doi.org/10.15407/frg2024.05.419>
12. Majewska K., Dąbkowska E., Grabowska E., Tyburski J., Czaplicki S. Composition of fatty acids in dark flour from spelt and common wheat grain grown organically in Poland. *Polish Journal of Natural Sciences*. 2018. № 33(1). P. 75–88.
13. Попова Д. О., Петренко М. М., Дорохович А. М., Попова Д. О. Використання рослинних шротів у виробництві зтяжного печива спеціального призначення. *Технологічні аспекти підвищення конкурентоспроможності хліба і хлібобулочних виробів та Здобутки та перспективи розвитку кондитерської галузі* : матеріали міжнародних науково-практичних конференцій. Київ : НУХТ, 2016. С. 137–139.
14. Дорохович А. М., Носенко Т. Т., Волощенко Т. О., Петренко М. М. Дослідження впливу ріпакового борошна на якість та поживну цінність зтяжного печива. *Здобутки та перспективи розвитку кондитерської галузі* : матеріали міжнародної науково-практичної конференції. Київ : НУХТ, 2015. С. 82–86.
15. Зтяжне печиво дієтично-функціонального призначення: пат. 12038 Україна: МПК А21D 13/80 (2017.01). №и 201703862; заявл. 19.04.17; опубл. 25.10.17, Бюл. № 20.
16. Ганцова І. О., Козонова Л. І. Розробка технології зтяжного печива з використанням продуктів переробки грибів. *Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті* : матеріали 72-ї Міжнародної наукової конференції молодих вчених, аспірантів і студентів (м. Київ, 6–7 квіт. 2017 р.). Київ : НУХТ, 2017. С. 186–187.
17. Зтяжне печиво дієтично-функціонального призначення: пат. 120149 Україна: МПК А21D 13/80 (2017.01), А23L 33/10 (2016.01). №и 201703666; заявл. 17.04.17; опубл. 10.10.17, Бюл. № 19. 4 с.
18. Зтяжне печиво дієтично-функціонального призначення: пат. 101439 Україна: МПК А21D 13/80 (2016.01), А23L 19/00 (2016.01). №и 201502476; заявл. 20.03.15; опубл. 10.09.15, Бюл. № 17. 2 с.
19. Mashau M. E., Ramalisa T., Ramashia S. E., Mshayisa V. V. Development of high-protein biscuits by the enrichment with morpane worm (*Gonimbrasia belina*) flour. *Food Science and Technology International*. 2024. № 23. 39308452. DOI: 10.1177/10820132241283322
20. Спосіб автоматичного визначення структурно-механічних властивостей харчових мас і пристрій для його здійснення: пат. на винахід 130136 Україна: МПК (2006) G01N33/02, G01N3/02, G01N3/44. № а202106597; заявл. 22.11.2021; опубл. 26.11.2025, Бюл. № 48/2025.

Дата першого надходження статті до видання: 27.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026

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





**L. Kovaliova, N. Sova, E. Aliiev, V. Koshulko**

*Dnipro State Agrarian and Economic University*

## **EFFECT OF WHOLE GRAIN FLOUR ON THE QUALITY AND TEXTURE PROFILE OF HARD BISCUITS**

### *Summary*

The article substantiates the relevance of improving hard biscuit (semi-sweet biscuit) formulations in the context of growing consumer demand for balanced nutrition products enriched with dietary fiber and biologically active compounds. The aim of the study is to investigate the effect of hard biscuit formulations using whole grain wheat and spelt flours, including black-grain varieties, on the quality indicators and texture profile of the finished products. The scientific novelty of the study lies in establishing the patterns of changes in sensory, color, and rheological characteristics of hard biscuits when whole-grain flour from black-grain wheat and black-grain spelt is used as the main flour raw material, as well as in confirming the existence of a market niche for such products in Ukraine. The practical significance consists in the proposed formulation solutions and technological parameters for producing hard biscuits with enhanced nutritional and biological value, suitable for positioning as health-oriented products. The study was conducted on five samples: a control sample (standard “Maria” recipe) and four experimental samples with complete replacement of flour by whole wheat flour, whole spelt flour, black-grain whole wheat flour, and black-grain whole spelt flour. Flour quality indicators (moisture content, quantity and quality of gluten), dough moisture parameters, sensory characteristics of finished products, color characteristics of flour, dough, and biscuits, as well as chemical composition (proteins, fats, fiber, ash) and rheological properties of dough and finished products were determined. It was found that the use of whole-grain and especially black-grain flours resulted in reduced lightness of the finished biscuits and the formation of a more intense dark color, as well as increased protein content (up to 13.6 %), fiber content (up to 2.0 %), and ash content (up to 1.8 %) compared with the control sample, confirming the enhanced nutritional and mineral value of the products. Rheological studies revealed significant modifications in dough properties: the control sample demonstrated the highest extensibility and deformation energy, whereas samples made from black-grain flour formed a stronger but less extensible structure. Based on the overall quality indicators and nutritional composition, samples produced from black-grain whole wheat and black-grain whole spelt flour (№ 4 and № 5) were identified as the most promising.

**Keywords:** whole grain flour, black-grain wheat, black-grain spelt, semi-sweet biscuit, rheological properties.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-32>

UDC 663.95:541

I. L. Koretska, Cand. of Tech. Sci., As. Prof.

ORCID: 0000-0001-5680-5789

V. V. Polyovyk Cand. of Tech. Sci., Senior Lecturer

ORCID: 0000-0001-8760-3813

R. V. Matyushenko, Senior Lecturer

ORCID: 0000-0006-4900-1241

*National University of Food Technologies*

e-mail: R1940@ukr.net

## ANTIOXIDANT FOOD AND DRINKS AS AN INNOVATIVE DIRECTION OF RESTAURANT BUSINESS DEVELOPMENT AND THE ROLE OF PR IN THEIR POPULARIZATION

*Summary.* The article considers a new direction in the development of the restaurant business, which consists in introducing dietary dishes and drinks enriched with antioxidants into the menus of establishments. This corresponds to global trends in the growth of demand for healthy food, which includes dishes with a high content of biologically active substances that have a positive effect on human health. Particular attention is paid to the analysis of modern methods of using raw materials rich in antioxidants, such as berries, nuts, herbs, spices, as well as other natural ingredients that provide a balance of taste and benefits. This approach not only improves the organoleptic properties of dishes, but also has a significant impact on improving the health of consumers: reducing the risk of developing cardiovascular, oncological and other chronic diseases, as well as maintaining a high level of immunity.

An important component of the article is the consideration of the importance of antioxidants for the human body. Antioxidants, in particular vitamins (C, E), flavonoids, polyphenols and other active compounds, play a key role in neutralizing free radicals, which prevents oxidative processes and helps slow down cell aging. Based on such an analysis, the conclusion is provided that the restaurant business, which implements an antioxidant menu, not only satisfies the requirements of modern consumers, but also becomes an important agent in promoting a healthy lifestyle.

*Keywords:* antioxidants, restaurant business, biologically active substances, PR strategy, healthy eating, innovative technologies.

*Problem statement and its relevance.* In modern conditions of globalization, urbanization and acceleration of the pace of life, the population's nutrition is increasingly characterized by imbalance, excessive consumption of refined products and insufficient intake of biologically active substances, in particular antioxidants. The lack of these compounds in the daily diet is considered by scientists and nutritionists as one of the factors of the increase in the level of chronic non-communicable diseases, premature aging of the body, decreased immune defense and deterioration of the quality of life of the population. At the same time, the social demand for healthy, functional and preventive nutrition is growing, which creates new challenges and opportunities for the restaurant industry. Despite the presence of a significant number of scientific studies devoted to antioxidants in the context of medicine and food technologies, the issue of their systematic introduction into the menu of restaurant establishments remains insufficiently studied. In particular, it requires an in-depth analysis of the use of local raw materials with high antioxidant activity, technological aspects of preserving biologically active substances during culinary processing, as well as the possibility of enhancing their synergistic effect in the composition of dishes and beverages. The communication aspect of this problem has also not been sufficiently studied – the role of PR strategies in forming consumer awareness, trust and loyalty to establishments that position themselves as leaders of healthy eating.

The relevance of the study is also due to the increase in competition in the restaurant services market, which encourages establishments to look for new ways of differentiation and creation of a unique value proposition for consumers.



The introduction of an antioxidant menu can be not only a tool for increasing the nutritional value of products, but also an important element of the restaurant's image and marketing policy. Consumer interest in the topic of healthy eating, confirmed by the dynamics of search queries and the popularity of relevant establishments, indicates the feasibility of an integrated approach that combines technological, nutritional and communication solutions. Thus, there is an objective need for scientific substantiation of the feasibility of using antioxidants in the restaurant industry, identification of promising types of local raw materials, analysis of their properties and development of effective PR tools for popularizing antioxidant dishes and drinks. Solving the outlined problem will contribute not only to increasing the competitiveness of restaurant business establishments, but also to the formation of a culture of conscious nutrition and improving the health of the population in general.

*Analysis of recent studies and publications.* In recent years, the scientific literature has seen an increase in interest in the problem of antioxidant protection of the body and the role of biologically active substances in the formation of a healthy and preventive diet. A significant number of studies in the field of nutrition, food chemistry and medicine are devoted to the study of the mechanisms of action of antioxidants, their ability to reduce oxidative stress and prevent the development of chronic non-communicable diseases.

The theoretical foundations of antioxidant protection of the body are highlighted in the fundamental works of B. Halliwell and J. Gutteridge, which substantiate the role of free radicals in the development of pathological processes and prove the preventive significance of natural antioxidants in human nutrition [1]. Further development of these provisions is presented in the works of L. Packer and C. Rice-Evans, which thoroughly studied the biological properties of polyphenols, flavonoids, carotenoids and antioxidant vitamins, as well as their contribution to maintaining the immune system and slowing down the aging process [2].

A separate direction of modern scientific research is related to the quantitative assessment of the antioxidant activity of food products. A significant contribution to this area was made by R. Prior, G. Cao, A. Martin and other scientists who developed and applied the ORAC (Oxygen Radical Absorbance Capacity) method for the comparative analysis of plant raw materials [3]. Their works proved that fruits, berries, nuts, spices and their processed products are characterized by high antioxidant potential. Meta-analyses published in the American Journal of Clinical Nutrition confirm the relationship between regular consumption of products with a high content of antioxidants and a decrease in the risk of cardiovascular and inflammatory diseases [4]. At the same time, the feasibility of using local and seasonal raw materials is emphasized, which is of great importance for the development of regional restaurant industry. In the field of food technology, research is focused on the preservation of biologically active substances during cooking. The works of F. Toldrá, J. Ruiz, M. Estevez prove that the use of gentle cooking technologies, in particular sous-vide, low-temperature heat treatment and fermentation, contributes to the preservation of antioxidant activity of products and an increase in the nutritional value of ready-made dishes [5]. Domestic scientists N. V. Prytul'ska, O. I. Cherevko, L. P. Malyuk substantiate the prospects of using plant raw materials of Ukrainian origin for the creation of dietary and functional dishes and drinks in restaurant establishments [6]. Along with technological aspects, more and more attention is paid in scientific publications to the implementation of the concept of healthy and functional nutrition in the restaurant business. Foreign authors J. Pine and J. Gilmore consider the orientation towards consumer health as an element of the formation of the unique consumer value of a restaurant product [7]. Studies published in the Journal of the American College of Nutrition, in particular the works of D. Jacobs and M. Gallaher, confirm the positive effect of dishes with a high content of antioxidants on the antioxidant status of the body and indicators of inflammation [8]. At the same time, the issue of the systematic introduction of an antioxidant menu into the activities of restaurants remains insufficiently covered in domestic



scientific sources. A separate group of studies is made up of scientific works devoted to PR and marketing communications in the restaurant industry. The works of P. Kotler, K. Keller, S. Hudson emphasize the importance of communicating the values of a healthy lifestyle for the formation of a positive brand image and increasing consumer loyalty [9]. Domestic researchers I. M. Pisarevsky, O. M. Azaryan, O. V. Kravchenko focus on the role of social media, influencer marketing and educational events in the popularization of healthy eating and increasing the competitiveness of restaurant establishments [10]. However, comprehensive studies that combine the technological aspects of creating antioxidant dishes with PR tools for their promotion are limited in the scientific literature.

Thus, the analysis of recent studies and publications demonstrates the existence of a solid theoretical basis for antioxidants and their importance for human health, as well as a growing interest in using this knowledge in restaurant practice. At the same time, the issues of a comprehensive combination of food technologies, nutrilogy and PR communications remain insufficiently developed, which directly justifies the purpose of this article and determines the direction of further research.

*Purpose of the article.* The purpose of the article is a comprehensive study of the possibilities of using antioxidants in the restaurant industry as a component of dietary and functional nutrition, as well as substantiation of the feasibility of introducing dishes and drinks with a high content of antioxidant compounds in the menu of restaurant establishments, taking into account modern trends in a healthy lifestyle. The study includes an analysis of scientific approaches to assessing the antioxidant activity of food raw materials, in particular those of local origin, determining its nutritional and biological value, as well as studying the influence of technological processes and culinary methods on the preservation of biologically active substances in finished products.

Particular attention in the article is paid to the study of the synergistic effect of antioxidants in the composition of multi-component dishes and drinks, their effect on organoleptic indicators, shelf life and consumer properties of restaurant products. In addition, the purpose of the study is to analyze the role of PR and marketing communications in forming a positive image of restaurant establishments that implement an antioxidant menu, as well as to identify effective tools for promoting healthy eating, increasing consumer awareness and strengthening their loyalty. The implementation of this goal is aimed at developing practical recommendations for restaurant establishments on combining technological, nutritional and communication approaches in order to increase the competitiveness and social significance of the restaurant business.

One of the key conditions for the proper functioning of the human body, according to the theory of rational and balanced nutrition adopted in international practice, is the mandatory presence of biologically active substances (BAS) in the diet. The main sources of BAS are vegetables, fruits, berries, as well as products of their processing. Today, innovative technologies and formulations using this raw material are being actively developed, which makes it possible to improve the quality of finished products, increase their nutritional value, and enhance sensory characteristics.

The demand for dietary food products with a high level of antioxidants is increasing, as the deficiency of these compounds is a significant public health problem. Antioxidants protect cells from the action of free radicals, which can damage DNA, accelerate aging processes, and contribute to the development of cardiovascular diseases, cancer, skin disorders, and other pathologies. The issue of incorporating antioxidants into the diet is discussed not only among specialists in food technology and medicine, but also within the restaurant industry, which can offer innovative solutions for enriching consumers' diets.



Dietary nutrition implies an optimal balance of nutrients, which depends on product diversity, cooking methods, a specific dietary regimen, and the selection of a diet in accordance with the physiological needs of the body [11; 12].

According to the ORAC (Oxygen Radical Absorbance Capacity) index, the average daily requirement for antioxidants for an adult is approximately 5,000 units, although the exact value depends on individual factors such as age and lifestyle [13; 14].

An analysis of local raw materials used by food service establishments for the preparation of dishes and beverages in bars has been conducted. Accordingly, the combination of technological ingredients enhances the synergistic effect of antioxidants, contributes to extending the shelf life of finished products, and improves their sensory properties [15; 16].

Table 1

## Local raw materials with high antioxidant activity and their properties

Ingredient	Value per 100 g (ORAC, mmol/100 g or equiv.)	Properties
Fruits and berries		
Blueberry	up to 9.2 mmol	Low-calorie; supports brain function and cardiovascular health
Cranberry	~7.8 mmol	Powerful natural antiseptic; supports immune function
Plum	~5.0 mmol	Improves digestion; contains phenolic antioxidants
Raspberry	~6.1 mmol	Exhibits anti-inflammatory properties; contains ellagic acid
Strawberry	~4.2 mmol	Supports heart health; source of vitamin C
Vegetables		
Artichoke	~9.4 mmol	Promotes detoxification; high antioxidant activity
Broccoli	~2.1 mmol	Anticarcinogenic properties; source of sulforaphane
Spinach	~1.5 mmol	Contains lutein; supports vision and vascular function
Avocado	~2.0 mmol	Source of beneficial monounsaturated fats; anti-inflammatory effect
Beetroot	~1.7 mmol	Improves blood circulation; contains betalains
Nuts		
Pecan nut	up to 10.6 mmol	Source of healthy fats; reduces oxidized LDL levels
Walnut	~7.7 mmol	Rich in omega-3 fatty acids; supports brain function
Hazelnut	~4.5 mmol	Supports heart health; contains vitamin E
Almond	~4.4 mmol	Antioxidant protection of the skin; reduces cholesterol levels
Peanut butter	~3.0 mmol	Source of plant protein and healthy fats
Spices and herbs		
Clove	~27–30 mmol	One of the most powerful antioxidants; antimicrobial activity
Cinnamon	~17 mmol	Regulates blood glucose levels
Turmeric	~10 mmol	Strong anti-inflammatory effect due to curcumin
Oregano	~20 mmol	Antiseptic properties; high concentration of polyphenols
Caraway	~5 mmol	Promotes digestion; antibacterial properties
Parsley	~1.3 mmol	Source of vitamin C and flavonoids
Basil	~1.0 mmol	Exhibits antibacterial and anti-inflammatory properties
Dried fruits		
Prunes	~8–9 mmol	Regulates digestion; contains phenolic compounds
Raisins	~3 mmol	Source of energy; contain organic acids
Dried apricots	~4.0 mmol	Supports vision and immune function; source of beta-carotene
Dark chocolate and cocoa		
Dark chocolate (70 %+)	up to 15 mmol	Reduces inflammatory processes; moderately lowers blood pressure
Cocoa powder	~26 mmol	Contains flavanols; improves vascular tone and mood

Source: compiled by the authors.



Table 1 below presents completed indicators and characteristics of the main local ingredients. The data are provided as an example based on average values of antioxidant activity (ORAC) and known nutritional properties.

Under modern conditions characterized by high stress levels and the adverse impact of environmental factors, the inclusion of foods rich in antioxidants in the diet is particularly important, as they are a key component of dietary nutrition. Antioxidants protect cells from damage and effectively reduce the negative effects of free radicals [18].

Antioxidants contribute to lowering the risk of developing chronic diseases such as cancer, cardiovascular pathologies, Alzheimer's disease, and age-related degenerative processes. In addition, their consumption improves immune function, supports the digestive system, enhances overall health status, and reduces signs of aging [17].

Incorporating antioxidant-rich dishes into the diet is a simple and effective way to improve health and reduce the risk of chronic diseases [21; 22]. Although the concept of including antioxidant-rich ingredients in menus may appear to be a relatively recent trend, many restaurants and food service chains have applied this approach for years [19]. Their success stories, combined with a growing body of scientific research, illustrate the benefits and innovative use of antioxidants in the restaurant industry, for example, Kappa Chakka Kandhari and The Secret Kitchen.

Based on the principles of an anti-inflammatory diet, True Food Kitchen has built its reputation on dishes filled with vibrant fruits, vegetables, whole grains, and healthy fats – primary sources of antioxidants. A study published in the *Journal of the American College of Nutrition* (2019) analyzed the effects of consuming meals at True Food Kitchen. The researchers found that the restaurant's dishes led to significant improvements in markers of antioxidant status and a reduction in chronic inflammation among participants. This real-world example demonstrates that restaurants can not only offer “antioxidant-rich” dishes but also actively promote their health benefits through menu design [20; 25; 26].

The fast-casual restaurant chain Sweetgreen in Boston has gained a loyal following due to its made-to-order salads and soups prepared with high-quality ingredients, predominantly sourced locally. Its menu prominently features antioxidant-rich foods such as kale, spinach, blueberries, and beetroot. The success of Sweetgreen, as well as similar chains, indicates a growing consumer demand for convenient food options that align with healthy lifestyle priorities [25; 26].

Antioxidant-rich ingredients are not limited to fruits and vegetables. Aromatic spices, widely used in cuisines around the world, are also powerful sources of antioxidants. For instance, turmeric, with its active compound curcumin, plays a central role in Indian cuisine and exhibits anti-inflammatory properties confirmed by scientific studies. Similarly, ginger, commonly used in many East Asian cuisines, has been studied for its antioxidant and antiemetic effects. These examples highlight the potential for increasing antioxidant content while enhancing flavor in global cuisine [24].

Modern restaurants in Kyiv and public catering chains also actively use products with a high antioxidant content. Typical dishes and beverages rich in antioxidants commonly offered by contemporary restaurants in Kyiv include:

Restaurant	Antioxidant-rich dishes and beverages (examples)
1. Milk Bar	Berry smoothies; quinoa bowl with avocado and spinach; matcha latte
2. Honey Café	Green buckwheat and beet salad; pomegranate fresh juice; ginger and mint tea
3. The Naked Room Café	Chia pudding with blueberries; green smoothie; hibiscus (karkade) infusion
4. Samna	Fattoush salad with vegetables and herbs; turmeric lemonade; spiced hummus
5. 100 Rokiv Tomu Vpered	Fermented vegetables; sea buckthorn drink; wild greens salad
6. Orang+Utan Coffee	Matcha; blueberry smoothie; green bowls
7. Simple. Restaurant	Avocado and spinach salad; beetroot tartare; oolong tea
8. Vero Vero	Caprese salad with basil; berry dessert; jasmine tea
9. City Zen Café	Quinoa and salmon bowl; açai smoothie; matcha shake
10. FreshLine (chain)	Leafy green salads; citrus and mint beverages; vegetable fresh juices
11. Basin Café	Quinoa and beet salad; mango and spinach smoothie; matcha tea
12. Healthy Habit	Quinoa, spinach, and berry bowl; kombucha; turmeric tea
13. Nebos	Avocado and arugula salad; berry fruit drink; ginger tea
14. Kyiv Food Market (various food corners)	Açai bowls; vegetable bowls; freshly squeezed juices
15. Žizn' Café	Green smoothie; chia pudding with berries; broccoli and nut salad
16. Dogs & Tails	Spinach and pomegranate salad; goji berry drink; oolong tea
17. Good Wine / Good Girl	Beetroot and orange salad; berry desserts; sencha tea
18. Not Only Fish	Tuna and avocado poke; jasmine tea; pomegranate fresh juice
19. Altruist	Green buckwheat bowl; berry smoothie; herbal tea
20. Imbir (vegetarian restaurant)	Pumpkin and turmeric cream soup; blueberry smoothie; ginger-lemon drink
21. Living Room Cafe	Green smoothie with spinach and apple; broccoli salad; matcha latte
22. Turquoise	Tabbouleh salad; pomegranate fresh juice; thyme tea
23. Fujiwara YOSHI	Salmon and avocado poke; green tea; wakame seaweed
24. Win Bar	Beetroot and cheese salad; blueberry dessert; herbal teas
25. Catch Seafood Restaurant	Quinoa and tuna salad; sencha tea; citrus lemonade
26. Tres Brut	Green buckwheat and herb salad; berry fruit drink; matcha tea
27. O' Café	Chia pudding with berries; açai smoothie; green tea
28. Very Well Cafe	Quinoa, spinach, and avocado bowl; beetroot fresh juice; ginger tea
29. Mingle Café	Green detox smoothie; berry bowl; oolong tea
30. Idealist Coffee	Matcha; orange and carrot fresh juice; berry tart

Source: developed by the authors.

Scientific literature increasingly supports the view that a diet enriched with antioxidants has protective effects against chronic diseases. A meta-analysis published in the *American Journal of Clinical Nutrition* identified a correlation between high dietary antioxidant intake and a reduced risk of cardiovascular diseases [22]. Further studies emphasize the potential role of antioxidants in improving cognitive function and slowing age-related decline. In technological modeling of a specific product, food item, dish, or beverage, the combined use of antioxidant-rich ingredients makes it possible to enhance synergistic antioxidant activity, extend shelf life, improve bioavailability, optimize the chemical composition, and increase the sensory evaluation of a new or improved dish. This opens opportunities for restaurateurs to engage the average consumer, influence consumer perception, and emphasize the antioxidant properties of their products.

Product promotion is not possible without a PR component [23]. Restaurants have numerous opportunities to influence consumer opinions through public relations by promoting the positive health effects of antioxidant-rich dishes. They can introduce special menus featuring dishes rich in antioxidant compounds that highlight their health benefits. This may be part of a temporary promotional campaign or become a permanent element of the menu. Another effective approach is collaboration with dietitians or other nutrition experts to obtain recommendations and validation of



the health benefits of antioxidant-rich dishes. This may also include partnerships with celebrities or influencers who publicly support a healthy lifestyle and diets high in antioxidant components.

Social media and active blogging can be used to disseminate information about the benefits of antioxidants and to attract consumer attention to dishes with a high antioxidant content. Educational events or master classes can also be organized to explain to consumers the advantages of consuming such dishes and how they contribute to improved health. These strategies can help restaurants raise consumer awareness of the positive effects of antioxidants and encourage the selection of healthier food options. A restaurant can create a clear and compelling message about its commitment to a healthy lifestyle and protection against free radicals, reinforcing this message across all communication channels.

An establishment may also create its own community or club for individuals committed to a healthy lifestyle, where participants can exchange advice and ideas on nutrition and health, as well as organize themed events or special evenings dedicated to healthy eating. This can further emphasize the restaurant's commitment to these values.

The implementation of advertising campaigns highlighting the benefits of restaurant dishes can attract new visitors who value a healthy lifestyle [23]. For this purpose, press releases and other media communication tools may be used to disseminate information about antioxidant-rich dishes and their health benefits.

In the modern context, where fast-paced lifestyles and stressful environments have become integral to everyday life, the issue of balanced nutrition has gained particular relevance. Contemporary scientific research emphasizes the importance of including antioxidants in the diet as an effective means of protection against free radicals that can lead to various diseases.

The initiative to introduce such products into menus can become an important step toward improving consumers' quality of life and a strategic business decision in the food service and food retail sectors. It represents a development stage for restaurants, cafés, and food stores in attracting customers who prefer conscious and health-oriented eating. Consideration of consumer health and benefits can not only contribute to the popularity of an establishment but also define its uniqueness in a competitive environment [18; 19; 23].

According to Google Trends query statistics over the past five years, the dynamics of searches related to antioxidants have increased more than twofold, indicating a growing public demand for products with enhanced antioxidant properties. Access to such statistics is a key element in developing effective PR methods for promoting antioxidant-rich products among potential consumers.

Under modern conditions, there is a rapid increase in the number of food service establishments – restaurants, cafés, and other formats – characterized by diverse specializations and cuisines capable of satisfying the tastes and preferences of even the most demanding visitors. This indicates the dynamic development of the industry and its significant role in the modern economy.

The restaurant business is a complex yet delicate field, as nutrition represents one of the basic human needs. This activity encompasses a wide range of aspects, including concept development, menu formation, procurement of raw materials, food preparation technologies, organization of customer service, marketing and advertising, financial management, and human resources policy.

Practice shows that the greatest popularity is achieved by establishments whose dishes combine high sensory quality with aesthetic appeal and possess high consumer value. The use of modern technologies and innovative equipment, such as sous-vide technology or Jospier ovens, enables the creation of unique gastronomic products and the achievement of new textures and aromas. Intangible factors also play an important role, including new service formats, a unique atmosphere, and a strong brand image concept.

The task of PR is to skillfully present these advantages and to create appealing promotional content that comprehensively and attractively reveals all the positive aspects of a restaurant. An effective and



high-quality PR strategy helps attract new customers and maintain the loyalty of regular visitors. This also includes cooperation with bloggers and influencers who enjoy significant popularity among audiences of different age groups. Their publications, reviews, and feedback in the media space can substantially influence the image and popularity of an establishment. In crisis or problematic situations, PR can act as an effective tool for reputation management and maintaining a positive image.

One of the key features of PR activities in the restaurant business is their focus on achieving long-term results. The organization of themed evenings, gastronomic festivals, and culinary master classes not only increases brand awareness but also enhances the overall perception of the establishment among consumers. In particular, organizing master classes led by chefs can become an effective means of attracting guests and increasing interest in the restaurant's cuisine. Partnerships and cooperation with other local businesses are also important, as they may lead to mutually beneficial promotions and joint events.

Thus, PR plays a key role in shaping and sustaining the success of the restaurant business. It helps attract the attention of potential customers, increases brand recognition, creates a positive image, and strengthens the restaurant's brand. PR in the restaurant sector requires a creative and integrated approach, the ability to analyze current gastronomic trends, and effective interaction with the public and the media.

Practical recommendations on public relations presented in scientific literature indicate that the visual attractiveness of a restaurant's presence on social media – particularly through the use of well-designed graphic content – significantly influences consumer decision-making by generating interest even before a direct visit. This visual perception has not only an aesthetic but also a strategic nature, as it creates a narrative that resonates with the target audience and defines priority directions of PR efforts to achieve maximum engagement and loyalty. Moreover, a deep understanding of the evolution of the food industry and its interconnection with tourism contributes to the formation of best-practice typologies which, when applied to social media strategies, increase a restaurant's visibility and attractiveness in the digital environment. This approach aligns with the concept of customer loyalty management, according to which – despite the high costs of acquiring new consumers – the effective use of social media in PR activities can become a cost-efficient tool for maintaining stability and fostering the development of restaurant enterprises.

*Conclusions.* Health and time are valuable resources of human existence. The restaurant industry is one of the sectors capable of supporting a high quality of life by reducing the time spent on home cooking while providing opportunities for recreation and entertainment. The use of high-quality technological equipment, modern methods of creative food presentation, and an expanded assortment of new dishes and culinary products with antioxidant properties makes it possible to improve health while simultaneously enjoying the leisure experience.

The initiative to introduce menu items with an increased antioxidant content may become an important stage for restaurants in attracting the attention of the average consumer who prefers a conscious and health-oriented diet. Consideration of consumer health and benefits can not only contribute to the promotion of an establishment but also define its uniqueness within a competitive environment.

The list of references still requires verification and alignment within the text.

#### **Bibliography**

1. Halliwell B., Gutteridge J. M. C. Free radicals in biology and medicine. 4th edition. Oxford : Oxford University Press, 2007.
2. Packer L., Rice-Evans C. Flavonoids and polyphenols in health and disease. Boca Raton : CRC Press, 2001.
3. Prior R. L., Cao G., Martin A. Antioxidant capacity and polyphenolic content of fruits and vegetables. *American Journal of Clinical Nutrition*. 1999. Vol. 69, № 1. P. 1–14.



4. Jacobs D. R., Gallaher D. D. Whole grain intake and cardiovascular disease: a meta-analysis. *American Journal of Clinical Nutrition*. 2004. Vol. 80, № 6. P. 1252–1259.
5. Toldrá F., Ruiz J., Estevez M. Antioxidant properties of food and beverages and their impact on health. *Food Research International*. 2016. Vol. 81. P. 107–115.
6. Prytul'ska N. V., Cherevko O. I., Malyuk L. P. Functional products based on plant raw materials: prospects and realities in Ukraine. Kharkiv : Inzhek, 2019.
7. Pine J., Gilmore J. The experience economy: work is theatre and every business a stage. Boston : Harvard Business Press, 1999.
8. Kotler P., Keller K., Hudson S. Marketing for hospitality and tourism. 5th edition. Harlow : Pearson, 2009.
9. Pysarevsky I. M., Azaryan O. M., Kravchenko O. V. The role of social media in promoting healthy eating in the restaurant business. Kyiv : Nauka, 2021.
10. Sweeney L. Food technology and nutritional impact: exploring the interface. Cham : Springer, 2015.
11. Kucheruk T. L., Melnyk O. M. Antioxidants in food: role in disease prevention and health maintenance. *Food Science and Technology*. 2020. Vol. 14, № 3. P. 25–33.
12. Melnychuk S. D., Sydorenko I. V. Biologically active substances in food technologies: functional aspects. *Bulletin of Agricultural Science*. 2021. № 6. P. 47–52.
13. Prior R. L., Wu X., Schaich K. Standardized methods for the determination of antioxidant capacity and phenolics in foods and dietary supplements. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2005. Vol. 53, № 10. P. 4290–4302.
14. Cao G., Prior R. L. Measurement of oxygen radical absorbance capacity in biological samples. *Methods in Enzymology*. 1999. Vol. 299. P. 50–62.
15. Singh R., Rao V. Antioxidant potential of culinary herbs and spices: a review. *Journal of Food Biochemistry*. 2021. Vol. 45, № 5. Article e13672.
16. Berezovska N. I. Innovative technologies in the restaurant business: current trends. *Economics of the Food Industry*. 2019. Vol. 11, № 2. P. 89–96.
17. Kucheruk T. L., Melnyk O. M. Antioxidants in nutrition: role in disease prevention and health maintenance. *Food Science and Technology*. 2020. Vol. 14, № 3. P. 25–33.
18. Melnychuk S. D., Sydorenko I. V. Biologically active substances in food technologies: functional aspects. *Bulletin of Agricultural Science*. 2021. № 6. P. 47–52.
19. Berezovskaya N. I. Innovative technologies in the restaurant business: modern trends. *Economics of the Food Industry*. 2019. Vol. 11, № 2. P. 89–96.
20. Singh R., Rao V. Antioxidant potential of culinary herbs and spices: a review. *Journal of Food Biochemistry*. 2021. Vol. 45, № 5. Article e13672.
21. Allen J. M., Lee S. Evaluating antioxidant-rich menu items: a study of True Food Kitchen restaurants. *Journal of the American College of Nutrition*. 2019. Vol. 38, № 4. P. 325–333. DOI: <https://doi.org/10.1080/07315724.2018.1554372>
22. Kim H. J., Park S. Dietary antioxidants and cardiovascular health: a meta-analysis. *American Journal of Clinical Nutrition*. 2020. Vol. 112, № 6. P. 1445–1455.
23. Ivanchenko Y. P., Kravets V. O. PR communications in the restaurant business: modern approaches and tools. *Marketing and Innovation Management*. 2023. № 3. P. 112–120.
24. Google Trends. Antioxidants – search interest over time. 2024. URL: <https://trends.google.com>
25. True Food Kitchen. Official website. 2024. URL: <https://www.truefoodkitchen.com>
26. Sweetgreen. Healthy menu and local sourcing approach. 2023. URL: <https://www.sweetgreen.com>

Дата першого надходження статті до видання: 09.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 02.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026

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





**І. Корецька, В. Польовик, Р. Матюшенко**

*Національний університет харчових технологій*

## **АНТИОКСИДАНТНІ ПРОДУКТИ Й НАПОЇ ЯК ІННОВАЦІЙНИЙ НАПРЯМ РОЗВИТКУ РЕСТОРАННОГО БІЗНЕСУ ТА РОЛЬ PR У ЇХ ПОПУЛЯРИЗАЦІЇ**

### *Анотація*

У статті розглянуто новий напрям розвитку ресторанного бізнесу, що полягає в упровадженні меню закладів дієтичних страв і напоїв, збагачених антиоксидантами. Це відповідає глобальним тенденціям зростання попиту на здорове харчування, що включає страви з високим умістом біологічно активних речовин, які позитивно впливають на здоров'я людини. Особливу увагу приділено аналізу сучасних методів використання сировини, багатой на антиоксиданти, таких як ягоди, горіхи, зелень, спеції, що забезпечують баланс смаку й користі. Такий підхід покращує органолептичні властивості страв, має значний вплив на зміцнення здоров'я: зменшення ризику розвитку серцево-судинних, онкологічних захворювань, а також підтримання високого рівня імунітету.

Розглянуто значення антиоксидантів для людського організму, а саме: вітаміни (С, Е), флавоноїди, поліфеноли, які відіграють ключову роль у нейтралізації вільних радикалів, це запобігає окислювальним процесам і сприяє уповільненню старіння клітин. Окрема увага приділена маркетинговим і PR-стратегіям, які сприяють популяризації здорового харчування через антиоксидантне меню.

Визначено ключові напрями комунікаційних стратегій, зокрема співпрацю з дієтологами та фахівцями з харчування, організацію освітніх заходів і майстер-класів для потенційних відвідувачів. З огляду на стрімке зростання популярності соціальних мереж та інфлюенсерів, вивчається вплив цифрових платформ на формування лояльності клієнтів і популяризацію здорового харчування серед молоді. Окремо акцентовано увагу на використанні соцмереж для залучення нових відвідувачів, завдяки організації акцій, конкурсів, онлайн-курсів, що підвищують зацікавленість до продуктів з високим умістом антиоксидантів.

Додатково розглянуто можливості ресторанного бізнесу для створення довготривалих взаємин зі споживачами через інтеграцію дієтичних страв у меню ресторанів і барів.

Отже, сучасні комунікаційні й маркетингові стратегії, з огляду на нові вимоги до харчування, дають змогу залучити новий контингент, створюючи лояльну аудиторію, яка обирає ресторани, що підтримують їхні цінності здоров'я та благополуччя.

**Ключові слова:** антиоксиданти, ресторанний бізнес, біологічно активні речовини, PR-стратегія, здорове харчування, інноваційні технології.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-33>

УДК 664.682

Н. В. Новікова, канд. с.-г. наук

ORCID: 0000-0002-3324-965X

Г. Ю. Проценко, здобувач освіти

ORCID: 0009-0002-9934-8797

*Херсонський державний аграрно-економічний університет*

e-mail: novikova\_n@ksaeu.kherson.ua

## ДОСЛІДЖЕННЯ ОРГАНОЛЕПТИЧНИХ І ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ СУПЕРФУД-ГРАНОЛИ

*Анотація.* У роботі обґрунтовано доцільність розробки функціонального харчового продукту суперфуд-граноли з додаванням природних рослинних компонентів адаптогенної дії в умовах підвищеного психоемоційного навантаження населення. Метою роботи було дослідження органолептичних і фізико-хімічних показників розробленого продукту.

У статті наведено результати оцінювання мінерального складу розробленого суперфуду-граноли з додаванням натуральних рослинних інгредієнтів. Показано, що збагачення рецептури сприяє суттєвому підвищенню вмісту макро- та мікроелементів у готовому продукті й забезпечує значний рівень покриття добової потреби організму при споживанні 100 г граноли. Найвищі показники встановлено для магнію (66 %), кальцію (33 %) та цинку (30 %). Визначено, що вміст цинку становить 3,719 мг, що підтверджує функціональну спрямованість продукту з огляду на його роль у регуляції обмінних процесів, підтриманні нервової системи та стресостійкості організму. Обґрунтовано фізіологічне значення калію, кальцію, магнію та заліза й показано, що розроблена гранола забезпечує до 20 % добової потреби в залізі. Отримані результати підтверджують доцільність використання натуральних рослинних інгредієнтів для створення функціональних харчових продуктів із підвищеною мінеральною цінністю.

*Ключові слова:* рослинні компоненти, нутрієнти, продукт, властивості.

*Постановка проблеми.* Воєнні дії на території України призвели до загострення хронічних захворювань і зростання кількості патологій, зумовлених тривалим психоемоційним напруженням. Порушення принципів раціонального харчування в умовах постійного стресу сприяє розвитку серцево-судинних та аліментарно залежних захворювань, що суттєво погіршують стан здоров'я та якість життя дорослого населення.

Використання харчових продуктів оздоровчого спрямування дає змогу підтримувати й відновлювати здоров'я, особливо після тривалого впливу стресових чинників, які спричинили зростання аліментарно залежних патологій. У зв'язку з цим перспективним напрямом харчової промисловості є створення функціональних продуктів з покращеним нутрієнтним складом, зокрема граноли з додаванням природних адаптогенів, що сприяє підвищенню адаптаційних можливостей організму до зовнішніх викликів і прискорює відновлення після фізичних і психічних навантажень [2, с. 34].

Суперфуд-гранола є інноваційним продуктом, який поєднує традиційні вівсяні пластівці із сучасними джерелами біологічно цінних речовин, такими як цукати обліпихи, волоські горіхи, амарант, ягоди годжі, кокосова олія, імбир і мед.

Відмінною рисою цього продукту є використання рослинних інгредієнтів (цукатів обліпихи, імбиру, меду), що сприяють підвищенню стійкості організму до стресових факторів і покращують його здатність витримувати фізичні й психоемоційні навантаження. Завдяки високому вмісту вітамінів, мінеральних елементів і біоактивних сполук суперфуд-гранола з адаптогенами є оптимальним продуктом для людей, які перебувають у складних умовах або потребують додаткової підтримки організму. Збереження корисних властивостей усіх інгредієнтів



забезпечується застосуванням технології низькотемпературного сушіння, що мінімізує втрати вітамінів та антиоксидантів і забезпечує їх високу біологічну активність.

*Аналіз останніх досліджень.* У сучасних наукових дослідженнях значна увага приділяється впливу хронічного стресу на стан здоров'я людини, особливо в умовах соціальних і воєнних потрясінь. За даними численних вітчизняних і зарубіжних наукових праць, тривалий психоемоційний стрес є одним із ключових чинників розвитку серцево-судинних, метаболічних та аліментарно залежних захворювань. Дослідники зазначають, що порушення харчової поведінки, дефіцит мікро- й макронутрієнтів, а також зниження антиоксидантного захисту організму суттєво погіршують адаптаційні можливості людини [5, с. 88].

Окремий напрям досліджень присвячений розробці та впровадженню функціональних харчових продуктів як засобу профілактики й корекції стрес-індукованих порушень. Наукові дані підтверджують, що продукти з підвищеним умістом харчових волокон, вітамінів, мінералів і біологічно активних речовин позитивно впливають на метаболічні процеси, імунний статус і нервову систему. Особливу увагу вчені приділяють використанню рослинної сировини, зокрема злакових культур, горіхів, ягід і меду, як джерел природних антиоксидантів і фітонутрієнтів [3, с. 47].

У наукових працях останніх років зростає інтерес до адаптогенів рослинного походження, які здатні підвищувати стійкість організму до несприятливих чинників довкілля, знижувати негативний вплив стресу та покращувати фізичну й розумову працездатність. Дослідження підтверджують ефективність таких інгредієнтів, як обліпиха, імбир, ягоди годжі й амарант, завдяки їх високому вмісту вітамінів, поліфенолів, мінеральних речовин і незамінних жирних кислот.

Значну увагу науковці приділяють технологічним аспектам виробництва функціональних продуктів. Зокрема, доведено, що застосування щадних технологій переробки, таких як низькотемпературне сушіння, дає змогу зберегти біологічну цінність сировини, мінімізувати втрати термолабільних сполук і забезпечити високу антиоксидантну активність готового продукту. Це є особливо важливим при створенні продуктів оздоровчого призначення.

Таким чином, аналіз наукових досліджень свідчить про доцільність і перспективність розробки функціональних харчових продуктів, зокрема граноли з додаванням природних адаптогенів. Такі продукти можуть ефективно використовуватися для підтримки здоров'я населення в умовах підвищеного стресового навантаження, сприяти профілактиці аліментарно залежних захворювань і покращенню якості життя.

*Формулювання мети статті (постановка завдання).* Метою роботи є вивчення органолептичних і фізико-хімічних показників якості суперфуд-граноли. Завдання дослідження: обґрунтувати доцільність розробки рецептури гранул з інгредієнтами підвищеної цінності; на основі аналізу літературних джерел і власних експериментальних даних вибрати перспективні інгредієнти; провести органолептичний аналіз розробленої рецептури; визначити хімічний склад отриманих продуктів.

*Основна частина.* Розроблений продукт характеризується легкою солодкістю з нотками кокосу, меду й фруктовому аромату обліпихи та ягід годжі. Гранола зберігає хрустку текстуру завдяки низькотемпературній обробці. Натуральний золотисто-коричневий відтінок суперфуду забезпечується вівсяними пластівцями й медом, із яскраво-червоними вкрапленнями ягід годжі.

Для оцінювання органолептичних показників проведено анкетування 10 респондентів, у якому вони визначили за допомогою 5-бальної шкали властивості граноли (зовнішній вигляд, колір, смак, запах, вид у готовому вигляді), від 1 до 5, де 1 – це погано, 5 – дуже добре (таблиця 1)

Загальна оцінка за усіма показниками суперфуду-граноли – 4,74 бала з 5,0, що свідчить про дуже високі показники.

Профілограма бальної оцінки розробленого суперфуду граноли зображена на рис. 1.

Таблиця 1

## Оцінювання органолептичних показників розробленого суперфуд-граноли

Номер дигистатора	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Назва показника										
Зовнішній вигляд	4	5	4	4	5	5	5	5	5	5
Колір	5	5	5	5	5	3	4	4	5	5
Смак	5	4	4	4	5	5	5	5	5	5
Запах	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Вид у готовому вигляді	4	5	5	5	5	5	5	4	4	5
Середній бал	4.6	4.8	4.6	4.6	5.0	4.6	4.8	4.6	4.8	5.0

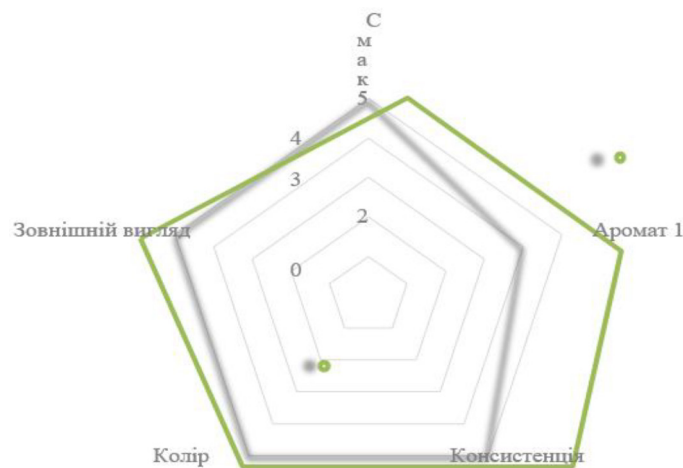


Рис. 1. Профілограма бальної оцінки

Додавання до рецептури суперфуду-граноли натуральних рослинних інгредієнтів дало змогу суттєво підвищити вміст макро- та мікроелементів у готовому продукті. Найвищий рівень покриття добової потреби при споживанні 100 г граноли відзначено для магнію – 66 %, кальцію – 33 %, цинку – 30 % (таблиця 2).

Згідно з результатами досліджень, вміст цинку в розробленому суперфуді становить 3,719 мг, що забезпечує задоволення добової потреби людини на рівні 30,991 %. Цинк відіграє важливу роль у регуляції обмінних процесів, сприяє покращенню психоемоційного стану, підтримує живлення мозкової тканини, захищає клітини мозку від негативного впливу зовнішніх чинників, а також бере участь у синтезі білків, відповідальних за стійкість організму до стресу та нервового напруження.

Калій є ключовим елементом у регуляції м'язової збудливості, насамперед серцевого м'яза. Його дефіцит може спричинити порушення серцевого ритму та виникнення судомних скорочень міокарда. Кальцій бере участь у внутрішньоклітинних процесах і є необхідним компонентом системи гомостазу, забезпечуючи нормальне згортання крові. Магній, у свою чергу, відіграє важливу роль у підтриманні нормального функціонування нервової системи. Уміст калію та магнію в розробленій гранолі становить, відповідно, 560,514 мг і 266,411 мг [7, с. 16].

Залізо є незамінним мікроелементом, необхідним для транспортування кисню еритроцитами, забезпечення роботи м'язової та імунної систем, яка сприяє мобілізації внутрішніх резервів організму в умовах дії екстремальних факторів. Розроблена рецептура суперфуду забезпечує покриття добової потреби в залізі на рівні близько 20 %.

Таблиця 2

## Мікронутрієнтний склад розробленої граноли

Мікронутрієнти	Добова потреба	Гранола	Задоволеність від добової потреби (у 100 г граноли), %
I, мкг	150	29,30	19,533
Fe, мг	18	3,538	19,656
Zn, мг	12	3,719	30,991
Na, мг	1300	65,907	5,070
K, мг	2500	560,514	22,421
Mg, мг	400	266,411	66,603
Ca, мг	1000	343,689	33,368
Вітаміни			
B6, мг	2	0,305	15,237
B9, мкг	400	65,171	16,293
B12, мкг	2,4	1,1	45,833
PP, мг	20	5,569	27,847
C, мг	90	18,179	20,199

Мед та амарант є цінними джерелами вітамінів групи В, зокрема В1, В2, В3, В5, В6, В9 і В12, які відіграють важливу роль у регуляції функціонування нервової системи. Вітаміни цієї групи сприяють зниженню рівня стресу, покращенню психоемоційного стану й беруть участь у синтезі нейромедіаторів, що регулюють емоційні реакції. Зокрема, вітамін В6 залучений до утворення серотоніну – одного з ключових нейромедіаторів, пов'язаних із відчуттям психологічного комфорту.

Вітамін В9 (фолієва кислота) є необхідним для синтезу й репарації ДНК, а також для процесів клітинного відновлення, потреба в яких зростає в умовах стресового навантаження. Вітамін В12 (кобаламін) відіграє важливу роль у процесах кровотворення, зокрема в утворенні еритроцитів, а також у підтриманні нормального функціонування нервової системи [2, с. 130].

За результатами досліджень встановлено, що вміст вітамінів В6, В9 і В12 у розробленому суперфуді-гранолі становить, відповідно, 0,35 мг, 65,171 мкг та 1,1 мкг.

Вітамін В6 є необхідним для нормальної діяльності нервової системи, оскільки бере участь у синтезі таких нейромедіаторів, як серотонін і дофамін, що позитивно впливає на емоційний стан і сприяє зниженню проявів тривожності й депресивних станів. Крім того, він підтримує функціонування імунної системи та серцево-судинне здоров'я. Вітамін В9 забезпечує нормальний ріст і поділ клітин, зокрема еритроцитів, є важливим компонентом процесів синтезу ДНК. Його дефіцит може негативно позначатися на психічному здоров'ї, зумовлюючи підвищення рівня тривожності й депресії.

Вітамін С, що міститься в ягодах годжі й обліпісі, є потужним антиоксидантом, який сприяє зменшенню негативного впливу стресових факторів на організм. Він бере участь у регуляції рівня кортизолу – гормону стресу, підтримує функцію надниркових залоз і допомагає знизити прояви втоми та психоемоційного напруження [4, с. 25].

Показники забезпечення добової потреби у вітамінах при споживанні 100 г граноли наведено на рисунку 2.

Аналіз хімічного складу розробленої граноли (таблиця 3) свідчить про те, що за масовою часткою вуглеводів продукт перевищує рекомендоване співвідношення основних інгредієнтів відповідно до норм фізіологічних потреб населення України в основних поживних речовинах та енергії. З огляду на те що розроблена страва вживається на сніданок, коли необхідно забезпечити організм основними енергетичними речовинами, наявність харчових волокон і загальну

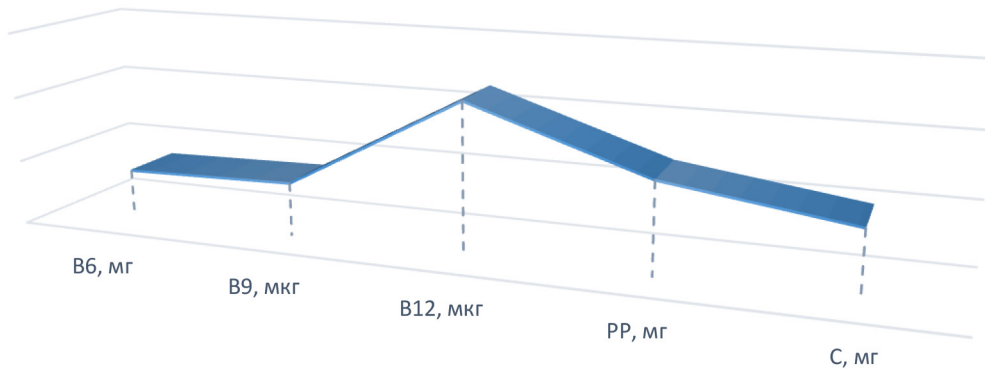


Рис. 2. Задоволеність від добової потреби у вітамінах розробленого суперфуду-граноли

калорійність, що знаходиться в межах рекомендованих значень (800–900 ккал), нова рецептура відповідає цільовій функції та прийнятним обмеженням.

Таблиця 3

#### Хімічний склад граноли

Показник	Уміст, г/100 г
Білки, г	9,98
Жири, г	17,08
Вуглеводи, г	49,66
Харчові волокна, г	7,43
Зола, г	3,44
Вологість, г	15,85
Q, ккал	439,3

*Висновки.* Отже, на основі викладеного вище можемо резюмувати таке:

1. Дослідження підтверджують, що поєднання суперфудів, таких як амарант, ягоди годжі, кокосова олія, грецькі горіхи та сушена журавлина, забезпечує високий рівень поживних речовин, включаючи антиоксиданти й мінерали, що є важливим для людей, які перебувають в екстремальних ситуаціях.

2. Додавання до рецептури суперфуду-граноли натуральних рослинних компонентів дало можливість підвищити в них кількість макро- та мікроелементів. Найкращу задоволеність від добової потреби (в 100 г граноли) становив магній на рівні 66 %, кальцій, відповідно, 33 %, цинк – 30 %.

#### Список використаних джерел

1. Башта А. О. Розробка рецептури граноли оздоровчого призначення з оптимальними технологічними режимами отримання. *Харчова наука і технологія*. 2020. № 4. С. 26–32.
2. Бодак М. П. Можливості поліпшення вітамінного складу нових виробів. *Обладнання та технології харчових виробництв*. 2013. № 30. С. 326–331.
3. Бондаренко Л. М., Савчук Н. С. Функціональне харчування на основі суперфудів для підтримки психоемоційного здоров'я. *Журнал психічного здоров'я*. 2022. № 1. С. 59–66.
4. Горбачова А. С., Сидоренко І. П. Сухі сніданки з використанням суперфудів для підвищення імунітету та стресостійкості. *Харчова промисловість України*. 2021. № 5. С. 21–27.
5. Калугіна І. М., Тележенко Л. М., Дзюба Н. А. Розробка граноли з фейхоа для профілактики йододефіциту у населення України. *Сучасні проблеми харчових технологій*. 2021. № 6. С. 12–18.
6. Лисиця І. О., Ковальчук М. А., Руденко С. В. Застосування рослинних адаптогенів у функціональних продуктах харчування для підвищення стійкості до стресу. *Функціональне харчування*. 2018. № 3. С. 45–52.



7. Петренко О. В., Лещенко Т. В. Використання суперфудів для підвищення поживної цінності продуктів харчування. *Продукти здорового харчування*. 2020. № 4. С. 13–20.

*Дата першого надходження статті до видання: 04.02.2026*

*Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.02.2026*

*Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026*

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



**N. Novikova, H. Protsenko,**

*Kherson State Agrarian and Economic University*

## INVESTIGATION OF ORGANOLEPTIC AND PHYSICOCHEMICAL QUALITY INDICATORS OF SUPERFOOD GRANOLA

### *Summary*

The paper substantiates the feasibility of developing a functional food product – superfood granola enriched with natural plant components of adaptogenic action – under conditions of increased psycho-emotional stress among the population. The relevance of the study is determined by the growing demand for foods that support mental performance, stress resistance, and overall physiological adaptation.

The aim of the research was to investigate the organoleptic and physicochemical characteristics of the developed product. The study assessed sensory properties, nutritional composition, and key quality indicators to confirm the functional value of the granola.

The research results demonstrated that the incorporation of plant-based ingredients significantly increases the content of macro- and microelements, particularly magnesium, calcium, potassium, zinc, and iron, enabling the product to meet a substantial share of the recommended daily intake. The content of B-group vitamins and vitamin C was also determined, which play a crucial role in supporting the nervous system, reducing stress levels, and enhancing the body's adaptive capacity. The application of low-temperature drying technology contributed to the preservation of biologically active nutrients and ensured high nutritional quality of the final product.

In addition, the developed granola exhibited favorable organoleptic properties, including balanced taste, pleasant aroma, and appealing texture, which positively influence consumer acceptance. The combination of high nutritional value and sensory attractiveness confirms the competitiveness of the product and its potential for industrial implementation.

The developed superfood granola can be recommended as a functional food product for individuals experiencing increased mental and emotional loads and may serve as a promising component of a health-oriented diet.

**Keywords:** functional food, superfood granola, adaptogenic plant components, psycho-emotional stress.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-34>

УДК 664.8.037:634.723:577.16

О. П. Прісс<sup>1</sup>, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-6395-4202

Л. М. Кюрчева<sup>1</sup>, канд. с.-г. наук

ORCID: 0000-0002-8225-3399

Д. І. Сердюк<sup>1</sup>, аспірант

ORCID: 0009-0006-5026-3919

М. М. Гудзенко<sup>2</sup>, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-7959-3627

<sup>1</sup> Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного<sup>2</sup> Національний університет біоресурсів і природокористування України

e-mail: denisserduik@gmail.com

## ВПЛИВ ОБРОБКИ БІОЛОГІЧНО АКТИВНИМИ РЕЧОВИНАМИ НА СТРУКТУРУ ВТРАТ І ВИХІД СТАНДАРТНИХ ПЛОДІВ ОБЛІПИХИ ПІД ЧАС ХОЛОДИЛЬНОГО ЗБЕРІГАННЯ

*Анотація.* Дослідження присвячені встановленню закономірностей впливу обробки плодів обліпихи біологічно активними речовинами та вакуумної дегазації на структуру втрат і вихід стандартної продукції під час холодильного зберігання в герметичних контейнерах. У результаті дослідження встановлено, що обробка плодів обліпихи біологічно активними речовинами є визначальним чинником формування частки стандартної продукції під час холодильного зберігання в герметичних контейнерах. Трифакторний дисперсійний аналіз підтвердив домінуючий вплив виду БАР-обробки ( $F(3,48) = 2143,51; p < 0,001; \eta^2 = 0,887$ ), що суттєво перевищує внесок дегазації ( $\eta^2 = 0,161$ ) та маси закладки ( $\eta^2 = 0,122$ ). Найвищу ефективність продемонструвала 0,1 % обробка хітозаном у поєднанні з дегазацією 50 кПа. Вакуумна дегазація й оптимізація маси закладки виконують підсилюючу функцію, зменшуючи інтегральні втрати.

*Ключові слова:* аскорбінова кислота, хітозан, розмарин, вакуумна дегазація, мікробіологічні захворювання, фізіологічні розлади, герметичні контейнери.

*Постановка проблеми.* Холодильне зберігання плодів обліпихи належить до найбільш складних етапів технологічного ланцюга їх реалізації через високий ризик зниження товарної якості. Висока вологість тканин, тонка шкірочка й низька стійкість до механічних ушкоджень сприяють розвитку мікробіологічних процесів і фізіологічних розладів навіть за умов знижених температур. Герметичне пакування певною мірою обмежує вплив зовнішніх чинників, проте не усуває внутрішніх біохімічних змін у тканинах плодів і не гарантує збереження їх якості впродовж періоду зберігання.

Дедалі ширше в практиці зберігання виробниками застосовуються обробки плодів біологічно активними речовинами (далі – БАР). Такі речовини володіють антиоксидантними й антимікробними властивостями, як наслідок, гальмують окисні та мікробіологічні процеси псування [1]. Однак наявні публікації переважно висвітлюють окремі аспекти впливу обробок БАР, зокрема зниження активності розвитку патогенної мікробіоти, уповільнення окисно-відновних процесів, збереження біологічно активних речовин, тоді як питання механізму їх комплексного впливу на рівень утрат плодів під час холодильного зберігання залишається практично не систематизованим.

Подібна тенденція простежується також у наукових публікаціях, які стосуються плодів обліпихи. Основні дослідження зосереджені на сучасних способах переробки й консервування плодів обліпихи або оцінюванні їх функціональних властивостей, натомість технологічні аспекти зберігання в охолодженому стані залишається поза увагою дослідників. Таким чином, відсутність системних досліджень, які стосуються саме способів і параметрів холодильного збері-



гання свіжих плодів обліпихи, зокрема з попередньою обробкою біологічно активними речовинами, зумовлює необхідність їх комплексного вивчення.

*Аналіз останніх досліджень.* Плоди обліпихи цінують не лише як локальну плодovu продукцію, що розширює сезонний асортимент, а також як природне джерело комплексу біологічно активних речовин, які визначають їх високу харчову та біологічну цінність і яскраво виражені функціональні властивості. Своєрідною ознакою плодів цієї культури вважається поєднання значної кількості аскорбінової кислоти з  $\beta$ -каротином, фенольними речовинами й багатою біологічно активні жирні кислоти ліпідною фракцією. Саме таке природне поєднання зумовлює потужний антиоксидантний потенціал плодів і їх здатність брати участь у регулюванні окисно-відновних процесів у організмі людини [1–3].

Поряд із тим високий уміст біологічно активних нутрієнтів зумовлює підвищену чутливість плодів до післязбирального метаболізму. Біологічно активні нутрієнти швидко окислюються, клітинні мембрани руйнуються, а внутрішня волога втрачається [4; 5]. З огляду на це, питання збереження якості й високих функціональних властивостей плодів обліпихи невід'ємно пов'язане з оптимізацією умов їх зберігання.

Одним із найбільш дієвих шляхів збереження якості плодової продукції, що підсилює дію низьких температур, вважається післязбиральна обробка захисними композиціями. У сучасних публікаціях зазначається, що такі захисні композиції повинні як володіти антиоксидантними властивостям, так і забезпечувати вагомий антимікробний ефект. Такі технології застосовуються при зберіганні різних видів плодової та овочевої продукції [6; 7]. Проте сьогодні систематизована інформація щодо зберігання свіжих плодів обліпихи в охолодженому стані з використанням біологічно активних речовин відсутня. Це й зумовило актуальність проведення досліджень.

*Формулювання мети статті (постановка завдання).* Метою досліджень було встановити закономірності впливу обробки плодів обліпихи біологічно активними речовинами та вакуумної дегазації на структуру втрат і вихід стандартної продукції під час холодильного зберігання в герметичних контейнерах.

Для досягнення поставленої мети сформульовані такі завдання: дослідити вплив типу обробки біологічно активними речовинами, рівня вакуумної дегазації та маси закладки на структуру втрат плодів обліпихи під час холодильного зберігання; визначити вихід стандартних плодів; оцінити силу впливу досліджуваних факторів і їх взаємодій методом дисперсійного аналізу.

*Основна частина.* Об'єктом дослідження були свіжозібрані плоди обліпихи (*Hippophae rhamnoides L.*) сорту «Чуйська», зібрані у фазі споживчої стиглості. Збір урожаю здійснювали механізованим способом із використанням струшувальних пристроїв, після чого плоди відокремлювали від гілочок та очищали від рослинних домішок. Перед закладанням на зберігання плоди інспектували за якістю й сортували за ступенем стиглості. При цьому видаляли механічно пошкоджені, недозрілі або перезрілі екземпляри, а також сторонні домішки. Потім плоди калібрували за розміром. Далі їх мили питною водою температурою 18...20 °C, з подальшим видаленням поверхневої вологи. Перед обробкою сировину витримували при температурі 18–20 °C впродовж 15–20 хв з метою вирівнювання температури й запобігання утворенню конденсату.

Дослідження виконували за схемою наукового експерименту, де факторами виступали тип обробки біологічно активними речовинами (БАР), рівень вакуумної дегазації та маса заповнення тари (рис. 1).

Робочі розчини БАР готували безпосередньо перед використанням.

Для приготування 0,3 % водного розчину аскорбінової кислоти 3,0 г речовини розчиняли в 1 л питної води. При приготуванні 0,05 % розчину розмарину використовували стандартизований екстракт розмарину в капсульованій формі, яка містить 400 мг екстракту з 25 % умістом розмаринової кислоти. Для забезпечення концентрації 0,05 % вміст капсул вилучали із желатинової оболонки, відважували 500 мг та розчиняли в 1 л питної води. Отриману суміш перемішували впродовж 10–15 хв до отримання однорідної суспензії, після чого за необхідності фільтрували для видалення сторонніх домішок. Хітозан розчиняли в слабокислому середовищі, яке готували шляхом додавання до питної води лимонної кислоти до рівня рН  $4,0 \pm 0,1$ . Кислотність контролювали потенціометрично.

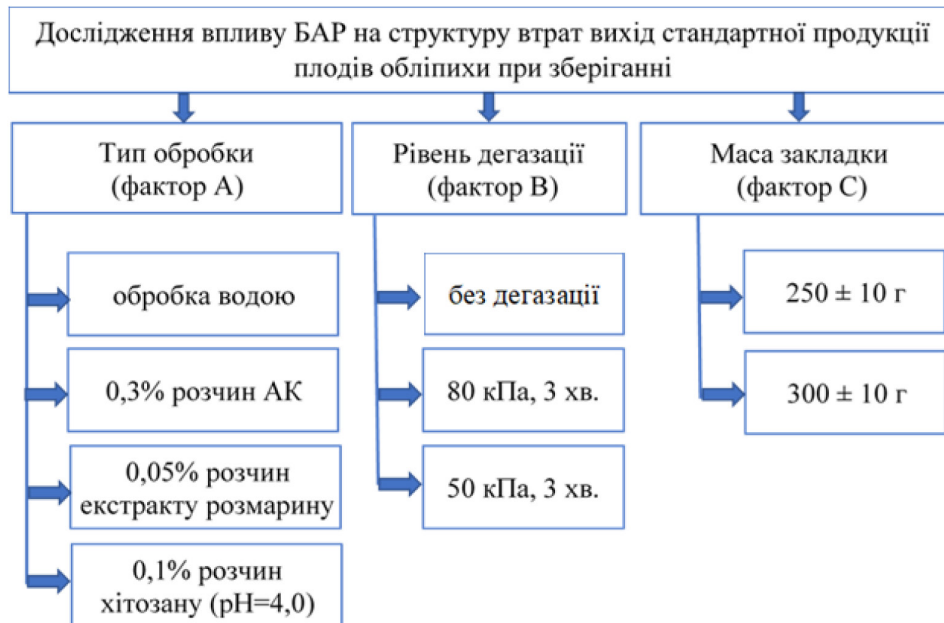


Рис. 1. Схема трифакторного наукового експерименту

Хітозан уносили порціями при постійному інтенсивному перемішуванні до повного розчинення й отримання однорідного розчину.

Обробку плодів здійснювали шляхом занурення у відповідний розчин із витримкою 2 хвилини. Температура розчину –  $19 \pm 1$  °С. Після обробки плоди залишали впродовж 10 хв на ситах з метою видалення залишкової вологи. Фасували оброблені та контрольні плоди обліпихи в жорсткі полімерні контейнери об'ємом 500 мл із герметичними кришками. Як показано на рис. 1, застосовували два варіанти фасування: перший – із заповненням 80 % об'єму тари ( $250 \pm 10$  г), другий – із заповненням 95 % об'єму тари ( $300 \pm 10$  г). Таке фасування забезпечує різний рівень механічного навантаження на плоди, що потенційно може бути вагомим фактором впливу на відсоток утрат під час зберігання. Вакуумну дегазацію зразків виконували в герметичній камері типу DZ-260. Після завершення циклу перевіряли герметичність упаковки й відсутність помітних деформацій. Зберігали контрольні та дослідні зразки в холодильній камері за температури  $2 \pm 1$  °С. Повторність варіантів досліду – триразова.

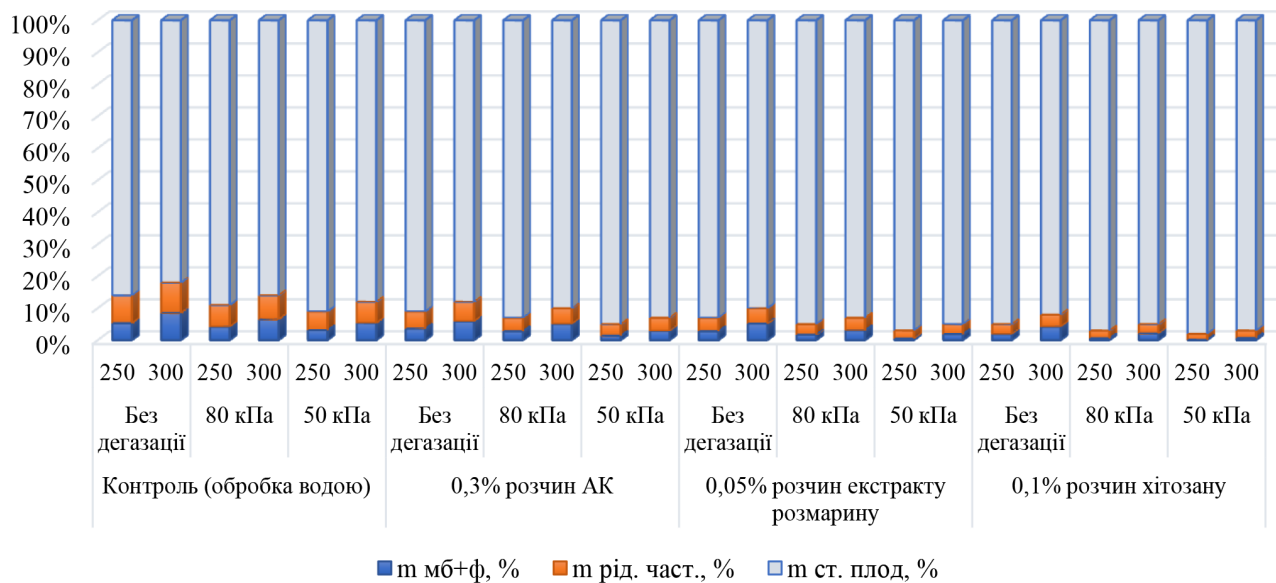
Оцінювання показників проводили перед закладанням на зберігання й на 30 добу зберігання. Під час оцінювання були визначені втрати маси, утрати від мікробіологічних захворювань і функціональних розладів із подальшим визначенням виходу стандартних плодів. Після завершення заданого терміну зберігання контейнери витримували за температури  $18 \dots 20$  °С для вирівнювання температури та стікання конденсату. Після відкриття вміст контейнера розділяли на дві фракції: плоди й рідка частина, що являла собою конденсат і виділений під час

зберігання клітинний сік. Кожну фракцію зважували на аналітичних вагах. Розрахунок утрат маси та визначення кількості продукції з ознаками мікробіологічних захворювань і фізіологічних розладів виконували за стандартними методиками [8].

Статистичну обробку результатів виконували із застосуванням багатофакторного дисперсійного аналізу. Результати вважали статистично достовірними при  $p < 0,05$ .

Структурний аналіз утрат плодів обліпихи під час холодильного зберігання з обробкою БАР у герметичних контейнерах дає змогу диференціювати три взаємопов'язані складові: частку стандартних плодів, рідку частину, яка є внутрішньою вологою плодів, що виділяється внаслідок механічного впливу дегазації, втрати від мікробіологічних захворювань і фізіологічних розладів (далі нестандартна продукція) та частку стандартних плодів. Сумарний баланс маси в кожному варіанті становить 100 %, що забезпечує коректність інтерпретації результатів як перерозподілу маси всередині системи «плоди – рідка фаза – нестандартна продукція» (рис. 2).

У контрольних варіантах без дегазації формується найбільш несприятлива структура втрат. За маси закладки 300 г інтегральні втрати становлять 18 % проти 14 % при 250 г, тобто є вищими на 4-відсоткові пункти (в.п.), що відповідає відносному їх зростанню приблизно на 29 % порівняно з меншою масою закладки. Частка нестандартної продукції при цьому зростає з 5,3 до 8,5 %, тобто в 1,6 раза, тоді як частка рідкої фази збільшується з 8,7 до 9,5 %, тобто лише на 0,8 відсоткового пункту. Отже, збільшення маси закладки насамперед зумовлює істотне зростання частки плодів із мікробіологічними та фізіологічними ознаками псування, тоді як частка рідкої фази змінюється менш виражено.



**Рис. 2. Структурний розподіл утрат і частки стандартних плодів обліпихи після холодильного зберігання за обробки біологічно активними речовинами та дегазації, %**

Застосування дегазації в контрольних варіантах суттєво змінює структуру втрат. Перехід від відсутності дегазації до 50 кПа при 250 г знижує інтегральні втрати на 5 в.п. (з 14 до 9 %), тобто на 36 %. Частка втрат від мікробіологічних захворювань і фізіологічних розладів скорочується в 1,7 раза, тоді як маса рідкої фази – в 1,5 раза. За маси 300 г інтегральні втрати зменшуються на 6 в.п., або на 33 %, при цьому кількість утрат від мікробіологічних захворювань і фізіологічних розладів знижується в 1,6 раза, а кількість рідкої фази – а 1,4 раза. Отже, дегація більшою мірою впливає на частку нестандартної продукції, ніж на перерозподіл води.



Застосування дегазації в контрольних варіантах суттєво змінює структуру втрат. Перехід від відсутності дегазації до режиму 50 кПа при масі закладки 250 г зменшує інтегральні втрати з 14 до 9 %, тобто на 5 відсоткових пунктів, або на 36 % стосовно початкового рівня. При цьому частка втрат, зумовлених мікробіологічними захворюваннями та фізіологічними розладами (нестандартна продукція), скорочується в 1,7 раза, тоді як частка рідкої фази – в 1,5 раза. За маси закладки 300 г аналогічна тенденція зберігається: інтегральні втрати зменшуються з 18 до 12 %, тобто на 6 відсоткових пунктів (33 %). Частка нестандартної продукції знижується в 1,6 раза, а частка рідкої фази – в 1,4 раза.

Використання 0,3 % аскорбінової кислоти забезпечує додаткове зменшення втрат порівняно з контролем за однакових режимів дегазації. Так, при 50 кПа і 250 г інтегральні втрати становлять 5 %, що в 1,8 раза менше, ніж у контролі (9 %). Частка нестандартної продукції при цьому знижується більше ніж удвічі, тоді як рідка фаза скорочується приблизно в 1,6 раза. Таким чином, антиоксидантна обробка істотно обмежує формування нестандартної продукції, однак не забезпечує настільки ж вираженого зменшення рідкої фази.

Застосування 0,05 % екстракту розмарину демонструє ще більш виражений структурний ефект. У режимі 50 кПа при 250 г інтегральні втрати становлять 3 %, що в 3 рази менше, ніж у контролі, і в 1,7 раза менше, ніж при використанні аскорбінової кислоти. Частка втрат від мікробіологічних захворювань в функціональних розладів (нестандартна продукція) зменшується з 1,4 до 0,5 %, тобто майже в 3 рази, тоді як рідка фаза скорочується приблизно в 1,4 раза порівняно з варіантом АК. Це свідчить, що основний внесок у покращення структури втрат забезпечує саме пригнічення мікробіологічного та фізіологічного псування.

Найбільш виражена оптимізація структури втрат відмічається у варіантах із 0,1 % хітозаном. У поєднанні з дегацією 50 кПа та масою 250 г інтегральні втрати становлять лише 2 %, що в 4,5 раза менше, ніж у контролі за аналогічних умов, і в 2,5 раза менше, ніж при використанні аскорбінової кислоти. Частка нестандартної продукції зменшується з 3,1 до 0,1 %, тобто в 31 раз, а рідкої фази – у 3,1 раза. Навіть при 300 г інтегральні втрати залишаються на рівні 3 %, що в 4 рази менше, ніж у контролі (12 %). Таким чином, хітозан мінімізує обидві складові втрат, проте найбільш радикально впливає саме на частку нестандартної продукції, поява якої пов'язана з мікробіологічними захворюваннями та фізіологічними розладами.

Аналіз впливу маси закладки підтверджує системну тенденцію: перехід від 250 до 300 г збільшує інтегральні втрати в середньому на 1–4 в.п. залежно від режиму, причому зростання відбувається переважно за рахунок нестандартної продукції (до 1,6 раза в контролі) і меншою мірою – за рахунок рідкої фази. Це вказує на визначальну роль механічного чинника у формуванні структури втрат.

Важливо підкреслити, що за умов герметичного пакування масові втрати, пов'язані з диханням, не формують самостійної складової в балансі. Навіть у контролі без дегазації зменшення інтегральних утрат при вакуумуванні на 33–36 % пов'язане не зі збереженням сухих речовин від дихання, а зі зменшенням частки нестандартної продукції в 1,6–1,7 раза та скороченням рідкої фази в 1,4–1,5 раза.

Отже, дихання опосередковано впливає на структуру втрат через інтенсифікацію фізіологічних розладів, але не є прямим джерелом масових утрат у герметичній системі.

Таким чином, застосування біологічно активних речовин і дегазації дає змогу зменшити інтегральні втрати в 4–5 разів порівняно з контролем і змінити їх внутрішню структуру, мінімізуючи як фізіологічну, так і мікробіологічну складову й забезпечуючи максимальний вихід стандартної продукції.

Для кількісної верифікації встановлених закономірностей і ранжування факторів за силою впливу застосовано трифакторний дисперсійний аналіз (таблиці 1).

Результатами трифакторного дисперсійного аналізу частки стандартних плодів після 30 днів зберігання виявив статистично значущий вплив виду обробки БАР ( $F(3,48) = 2143,51$ ;  $p < 0,001$ ), рівня дегазації ( $F(2,48) = 584,63$ ;  $p < 0,001$ ) та маси закладки ( $F(1,48) = 881,79$ ;  $p < 0,001$ ).

Таблиця 1

Результати дисперсійного аналізу при зберіганні плодів обліпихи з використанням БАР і вакуумної дегазації

Джерело	SS	df	MS	F	p-value	Fcrit (0,05)	$\eta^2$
Вид обробки (A)	535,92	3	178,64	2143,51	<0,001	2,76	0,887
Дегазація (B)	97,48	2	48,74	584,63	<0,001	3,15	0,161
Маса (C)	73,52	1	73,52	881,79	<0,001	3,99	0,122
A×B	4,21	6	0,70	8,41	<0,001	2,26	0,007
A×C	1,84	3	0,61	7,34	<0,001	2,76	0,003
B×C	0,96	2	0,48	5,77	0,005	3,15	0,002
A×B×C	0,88	6	0,15	1,80	0,11	2,26	0,001
Похибка	5,00	48	0,104	–	–	–	0,008
Загальне	719,81	71	–	–	–	–	1,000

Основний внесок у варіацію показника зумовлений видом обробки БАР ( $SS_A = 535,92$ ;  $\eta^2 = 0,887$ ), тоді як внесок дегазації ( $\eta^2 = 0,161$ ) та маси закладки ( $\eta^2 = 0,122$ ) є істотно меншим. Незважаючи на статистичну значущість двофакторних взаємодій, їх внесок у загальну варіацію не перевищує 1 %, що свідчить про домінування головних ефектів. Трифакторна взаємодія статистично не підтверджена ( $p > 0,05$ ).

Отримані результати переконливо доводять, що стабілізація частки стандартних плодів обліпихи визначається насамперед обраним розчином БАР, тоді як дегазація та оптимізація маси закладки виконують підсилюючу, але не визначальну функцію.

**Висновки.** Обробка плодів обліпихи біологічно активними речовинами є визначальним чинником формування частки стандартної продукції під час холодильного зберігання в герметичних контейнерах. Трифакторний дисперсійний аналіз підтвердив домінуючий вплив виду БАР-обробки ( $F(3,48) = 2143,51$ ;  $p < 0,001$ ;  $\eta^2 = 0,887$ ), що суттєво перевищує внесок дегазації ( $\eta^2 = 0,161$ ) та маси закладки ( $\eta^2 = 0,122$ ).

Найвищу ефективність продемонструвала 0,1 % обробка хітозаном у поєднанні з дегазацією 50 кПа. За такої обробки інтегральні втрати були в 4,5 раза меншими порівняно з контролем, а частка плодів з ознаками мікробіологічних уражень і фізіологічних розладів зменшувалася в 31 раз.

Вакуумна дегазація та оптимізація маси закладки виконують підсилюючу функцію, зменшуючи інтегральні втрати на 33–36 % у дослідних варіантах, однак не змінюють частки впливу факторів.

#### Список використаних джерел

1. Wang Z., Zhao F., Wei P., Chai X., Hou G., Meng Q. Phytochemistry, health benefits, and food applications of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.): A comprehensive review. *Frontiers in Nutrition*. 2022. Vol. 9. P.1036295. DOI: 10.3389/fnut.2022.1036295
2. Zhu P., Ren Y., Wei C., Luo J., Wu D., Ye X., Tian J. Compounds from sea buckthorn and their application in food: A review. *Food Chemistry*. 2025. Vol. 476. P. 143428. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.143428>
3. Зарецька Д. К., Сердюк М. Є., Кривонос І. А., Бандура В. М. Заморожений напівфабрикат з додаванням обліпихи, як сировина для продуктів функціонального призначення. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету* : наукове фахове видання. Запоріжжя : ТДАТУ, 2023. Вип. 23, Т. 1. С. 199–206. DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-1-199-206



4. Yu J., Wang M., Li Z., Tchuembou-Magaia F., Wani A. A., Zhu P., Liu Y. Preserving freshness: Innovations for fresh-eating fruit distribution and damage prevention – A review. *Food packaging and shelflife*. 2024. Vol. 44. P. 101323. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2024.101323>
5. Ali S., Nawaz A., Hussain B., Ejaz S., Sardar, H. Carboxymethyl cellulose coating maintains quality of harvested aonla fruit by regulating oxidative stress and ascorbate-glutathione cycle. *Postharvest Biology and Technology*. 2024. Vol. 207. P. 112621. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112621>
6. Krishnan R., Misra M., Subramanian J., Mohanty A. Emerging trends and application of edible coating as a sustainable solution for postharvest management in stone fruits: A comprehensive review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2025. Vol 24. № 3. P. e70179. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70179>
7. Ivanova I., Serdyuk M., Tymoshchuk T., Malkina V., Zinovieva O., Lisohurska D., Lisohurska O. Minimizing sweet cherry fruit losses during storage under the influence of hydrocooling and protective organic composition. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol.130. № 11. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.309595
8. Сердюк М. Є., Прісс О. П., Гапріндашвілі Н. А., Іванова І. Є. Дослідницький практикум. Ч. 1. Методи дослідження плодоовочевої та ягідної продукції. Мелітополь : Люкс, 2020. 364 с. URL: <http://elar.tsatu.edu.ua/handle/123456789/19207>

Дата першого надходження статті до видання: 02.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026

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



**O. Priss<sup>1</sup>, L. Kiurcheva<sup>1</sup>, D. Serdiuk<sup>1</sup>, M. Hudzenko<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University

<sup>2</sup> National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

## INFLUENCE OF TREATMENT WITH BIOLOGICALLY ACTIVE SUBSTANCES ON THE STRUCTURE OF LOSSES AND YIELD OF STANDARD SEA BUCKTHORN FRUITS DURING REFRIGERATED STORAGE

### Summary

The study is devoted to establishing the patterns of the influence of the treatment of sea buckthorn fruits with biologically active substances and vacuum degassing on the structure of losses and yield of standard products during refrigerated storage in hermetic containers. The results of the study showed that the treatment of sea buckthorn fruits with biologically active substances is a determining factor in the formation of the share of standard products during refrigerated storage in hermetic containers. Three-factor analysis of variance confirmed the dominant effect of the type of treatment ( $F(3,48) = 2143,51; p < 0.001; \eta^2 = 0,887$ ). It significantly exceeds the contribution of degassing ( $\eta^2 = 0,161$ ) and the mass of the bookmark ( $\eta^2 = 0,122$ ). The highest efficiency was demonstrated by 0.1 % chitosan treatment in combination with 50 kPa degassing. Vacuum degassing and optimization of the mass of the bookmark perform an amplifying function, reducing integral losses.

**Keywords:** ascorbic acid, chitosan, rosemary, vacuum degassing, microbiological diseases, physiological disorders, hermetic containers.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-35>

УДК 664.681

М. Є. Рацук, канд. техн. наук, доц.

Т. А. Юрова, ст. викл.

К. С. Рацук, здобувач вищої освіти

*Херсонський національний технічний університет*

e-mail: mr0581@ukr.net

ORCID: 0000-0002-1159-206X

ORCID: 0000-0002-8147-7024

ORCID: 0009-0004-5458-7078

## ОДЕРЖАННЯ ЗАТЯЖНОГО ПЕЧИВА З ФУНКЦІОНАЛЬНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

*Анотація.* Останнім часом значно зростає популярність функціональних продуктів харчування – особливої категорії харчової продукції, яка не лише виконує традиційну роль джерела поживних речовин, а й містить біологічно активні компоненти, що чинять позитивний вплив на фізіологічні або психологічні функції організму. Функціональні продукти мають відповідати вимогам не лише з точки зору функціональної ефективності, а й органолептичних властивостей, що дає змогу забезпечити регулярне споживання цих продуктів у рамках повсякденного харчування.

У статті розглянуто доцільність використання рослинної клітковини жита, коноплі та гарбуза в створенні борошняних кондитерських виробів оздоровчого призначення. Метою дослідження є встановлення впливу рослинних компонентів на органолептичні показники зтяжного печива.

У роботі розроблено варіанти рецептур зтяжного печива з різними компонентами й отримано дослідні зразки. Установлено, що за органолептичними показниками всі зразки приготованого печива відповідають вимогам ДСТУ 3781:2014 «Печиво. Загальні технічні умови». При визначенні найбільш смачного печива групою споживачів виділено печиво з додаванням гарбузової клітковини. З'ясовано, що додавання харчових волокон підвищує показник намокання зтяжного печива.

Практична цінність дослідження полягає у створенні збагаченого на нутрієнти продукту функціонального призначення, що дає змогу розширити асортимент борошняних кондитерських виробів і задовольнити потреби споживача в якісних харчових продуктах відповідно до здорового способу життя.

*Ключові слова:* борошняні кондитерські вироби, зтяжне печиво, харчові волокна, рослинна клітковина, експертиза, якість, безпека.

*Постановка проблеми.* Розроблення нових виробів дієтичного та функціонального призначення, здатних забезпечувати організм людини добовою потребою в біологічно активних речовинах, є одним із пріоритетних напрямів розвитку сучасної кондитерської промисловості. Сьогодні відмічається дефіцит основних макро- та мікронутрієнтів у харчуванні населення, що негативно позначається на стані імунної системи, погіршує загальне здоров'я та підвищує ризик виникнення різноманітних захворювань. У зв'язку з цим актуальним є споживання функціональних продуктів, збагачених біологічно активними компонентами, зокрема антиоксидантами, вітамінами, амінокислотами, мінеральними речовинами й харчовими волокнами, які характеризуються зниженою енергетичною цінністю, низьким умістом цукру та жиру. Уживання таких продуктів сприяє нормалізації фізіологічних процесів, зміцненню імунітету, покращенню загального функціонального стану організму та профілактиці хронічних захворювань.

Перспективним напрямом виробництва дієтично-функціональних харчових продуктів є збагачення традиційних кондитерських виробів біологічно активними речовинами шляхом використання харчових волокон. Серед борошняних кондитерських виробів найбільш придатним об'єктом для такого збагачення є зтяжне печиво, оскільки воно має більш збалансований уміст білків, жирів і вуглеводів порівняно з іншими видами печива [1].



В умовах сучасного ритму життя зтяжне печиво може слугувати зручним харчовим продуктом для швидкого перекушування. Воно забезпечує оперативне відновлення енергетичних потреб організму, характеризується тривалим терміном зберігання й не потребує спеціальних умов транспортування. Водночас його харчова та біологічна цінність визначається видом печива й загальною структурою раціону.

Зтяжне печиво доцільно зараховувати до продуктів дієтичного призначення, оскільки воно виготовляється із сухого шаруватого тіста й характеризується зниженим умістом цукру та жиру. Традиційною сировиною для його виробництва є пшеничне борошно. Підвищення харчової та функціональної цінності зтяжного печива можливе шляхом уведення до його рецептурного складу харчових волокон.

*Аналіз останніх досліджень.* Харчові волокна є невід'ємним компонентом раціону людини й відіграють важливу роль у забезпеченні нормального функціонування організму. Вони належать до природних харчових сорбентів, здатних здійснювати детоксикацію, сприяти виведенню радіонуклідів і важких металів, а також позитивно впливати на діяльність шлунково-кишкового тракту, знижувати рівень холестерину в крові. Останніми роками використання харчових волокон (харчових клітковин) набуває широкого поширення не лише в спеціалізованих продуктах харчування, а й у продуктах масового споживання.

Концептуальною основою їх застосування є збагачення раціону баластними речовинами, які сприяють покращенню процесів травлення за умов високого споживання рафінованих харчових продуктів. Крім того, харчові волокна характеризуються низькою енергетичною цінністю, здатністю зв'язувати вологу й жири, формувати необхідну структуру готових виробів, а також безпечністю використання як харчових інгредієнтів [2].

Користь рослинної клітковини важко переоцінити. Серед головних переваг варто виділити таке:

- підтримання травної системи. Харчові волокна сприяють нормальному функціонуванню кишківника, забезпечують регулярність випорожнення й запобігають діарей та закрепам;
- контроль рівня цукру в крові. Волокна сповільнюють поглинання цукру з їжі, що допомагає підтримувати стабільний рівень глюкози в крові та зменшити ризик розвитку цукрового діабету 2-го типу;
- зниження ризику розвитку ожиріння. Волокна допомагають досягти відчуття ситості й зменшують апетит;
- зниження ризику серцево-судинних захворювань. Рослинна клітковина знижує кількість шкідливого холестерину в крові й у такий спосіб зменшує ризик виникнення серцевих захворювань і гіпертонії;
- профілактика деяких видів раку. Сучасні дослідження доводять, що дієтичні волокна можуть знижувати ризик виникнення певних видів онкозахворювань, наприклад, раку товстої кишки;
- підтримання здоров'я загалом. Споживання їжі, яка багата на клітковину, допомагає забезпечити оптимальне середовище для росту й розмноження корисних бактерій у кишківнику. Це сприяє загальному здоров'ю та зміцненню імунної системи [3].

У наш час проведено низку досліджень щодо можливості використання харчових волокон для збагачення різних м'ясопродуктів (ковбас, сосисок і сардельок, напівфабрикатів, м'ясних консервів), соусів, молочних і кондитерських виробів [4–7].

*Формулювання мети статті (постановка завдання).* При створенні продуктів дієтичного або оздоровчого призначення поряд з вибором сировинних компонентів постає проблема вдосконалення технології. Перевага надається тим методам, які не потребують додаткових витрат на переоснащення виробництва. Тому розробка рецептур інноваційних харчових продуктів



з використання нетрадиційної сировини є доцільним та актуальним напрямом вирішення проблем здорового харчування.

У роботі, з огляду на наявність сировинної бази, з метою збагачення нутрієнтного складу зтяжного печива з пшеничного борошна пропонується додавання клітковин гарбуза, жита й коноплі.

Клітковина з насіння конопель є цінним джерелом рослинного білка, природного каротину, фітостеролів і фосфоліпідів. Вона відіграє важливу роль у забезпеченні нормального функціонування шлунково-кишкового тракту, сприяє покращенню кишкової моторики, виведенню з організму токсичних речовин і продуктів метаболізму, а також чинить позитивний вплив на стан органів дихання. Крім того, конопляна клітковина може бути корисною в профілактиці та комплексному лікуванні захворювань серцево-судинної системи й ожиріння [8].

Гарбузова клітковина характеризується широким спектром біологічної дії, зокрема сприяє покращенню функціонування травної системи, зниженню рівня холестерину та глюкози в крові, зміцненню імунної системи, детоксикації організму й підтриманню здоров'я серцево-судинної системи. Завдяки наявності вітамінів і мінеральних елементів гарбузова клітковина позитивно впливає на загальний фізіологічний стан організму та може сприяти зниженню маси тіла [9].

Житня клітковина (житні висівки) також має значну харчову й функціональну цінність. Вона сприяє покращенню процесів травлення, нормалізації рівня глюкози та холестерину в крові, підтримує процеси зниження маси тіла, зміцнює імунітет і позитивно впливає на стан шкіри. Крім того, житня клітковина може використовуватися з профілактичною метою для запобігання розвитку серцево-судинних захворювань, цукрового діабету й окремих онкологічних патологій [10].

Метою дослідження є встановлення впливу обраних рослинних компонентів на органолептичні показники зтяжного печива.

*Основна частина.* Приготування зтяжного печива має низку особливостей. Тісто для печива повинно бути добре перемішаним і мати пружноеластичні та пластично-в'язкі властивості. Багаторазова прокатка й складання пластів зтяжного тіста формують його шарувату й пористу структуру. Для випічки зтяжного печива застосовується температурний режим випічки-сушки, який відрізняється більшою тривалістю й зниженою температурою порівняно з випічкою інших видів печива, оскільки в зтяжному тісті міститься більше вологи, яка підлягає випаровуванню.

У межах дослідження виготовлено кілька видів печива: контрольний зразок із пшеничного борошна, а також зразки з додаванням гарбузової, житньої та конопляної клітковини. Установлено, що додавання рослинних клітковин не ускладнює процесу приготування печива.

Оцінювання органолептичних показників виготовленого печива здійснювали відповідно до вимог ДСТУ 3781:2014 «Печиво. Загальні технічні умови». Результати органолептичної оцінки наведено в таблиці 1.

Експериментальним шляхом визначено оптимальну масову частку рослинних волокон у рецептурі печива з метою забезпечення найкращих органолептичних характеристик готової продукції. Зокрема, оптимальною кількістю гарбузової клітковини визнано 5 % від загальної маси суміші, що забезпечує легкий приємний гарбузовий присмак у готовому виробі. Зменшення цієї кількості призводить до практичної відсутності характерного смаку, тоді як її надлишок зумовлює надмірну інтенсивність присмаку й погіршення текстурних властивостей виробу, зокрема підвищену крихкість і ламкість. Для житньої та конопляної клітковини оптимальною виявилася масова частка не більше ніж 3 %, що забезпечує задовільні показники смаку й консистенції тіста.

Аналіз отриманих даних свідчить, що всі дослідні зразки печива відповідають нормативним вимогам зазначеного стандарту. Вироби характеризуються правильною формою з фігурними

Таблиця 1

## Органолептичні характеристики приготованого печива з рослинною клітковиною

Показник	Затяжне печиво з пшеничного борошна			
	без додавання клітковин	з клітковиною гарбуза	з клітковиною жита	з клітковиною коноплі
Форма	Правильна, краї фігурні	Правильна, краї фігурні	Правильна, краї фігурні	Правильна, краї фігурні
Поверхня	Гладка з чітким малюнком на лицьовому боці, невідгоріла, без вкраплень і крихт. Нижня поверхня рівна	Гладка з чітким малюнком на лицьовому боці, невідгоріла, з поодинокими вкрапленнями волокон гарбуза. Нижня поверхня рівна	Гладка з чітким малюнком на лицьовому боці, невідгоріла, з вкрапленнями волокон жита. Нижня поверхня рівна	Гладка з чітким малюнком на лицьовому боці, невідгоріла, з вкрапленнями волокон коноплі. Нижня поверхня рівна
Колір	Світло-бежевий	Бежевий	Сіро-бежевий, із вкрапленнями волокон жита	Бежево-коричневий, із вкрапленнями волокон коноплі
Смак і запах	Смак у міру солодкий, властивий затяжному печиву. Запах приємний, без сторонніх ароматів	Смак у міру солодкий, з легким присмаком гарбуза, властивий затяжному печиву. Запах приємний, з легким ароматом гарбуза	Смак у міру солодкий, з присмаком жита, властивий затяжному печиву. Запах приємний	Смак у міру солодкий, властивий затяжному печиву. Відчувається наявність харчових волокон. Запах приємний
Вигляд у розламі	Пропечене, з рівномірною пористістю, без пустот і слідів непромішення	Пропечене, з рівномірною пористістю, без пустот і слідів непромішення	Пропечене, з рівномірною пористістю, без пустот і слідів непромішення	Пропечене, з рівномірною пористістю, без пустот і слідів непромішення

краями, чітким малюнком на лицьовій поверхні, гладкою нижньою поверхнею, рівномірною пористістю без пустот і слідів непромішування. Колір, смак і запах печива варіюють залежно від виду використаних харчових волокон, однак загалом усі зразки мають приємні органолептичні властивості.

Дегустаційним методом з використанням 5-бальної шкали проведено оцінювання органолептичних показників одержаних зразків затяжного печива. Результати дослідження наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

## Бальне оцінювання органолептичних показників зразків затяжного печива

Показник	Затяжне печиво		
	з клітковиною гарбуза	з клітковиною жита	з клітковиною коноплі
Запах	5	4	5
Смак	5	4	3
Поверхня	5	5	5
Колір	5	5	4
Вид на зломі	5	5	5
Разом	25	23	22

За одержаними даними побудовано органолептичний профіль дослідних зразків затяжного печива (рис. 1).

Дегустаційною комісією найкращими смаковими показниками відзначено зразок печива затяжного з клітковиною гарбуза. Зразок печива з волокнами коноплі за рахунок дещо специфічного смаку отримав найменшу кількість балів.

Важливим показником якості печива є намокання, оскільки побічно характеризує його пористість: чим краща пористість, тим більше намокання. Намокання визначають за збільшен-



Рис. 1. Органолептичний профіль дослідних зразків

ням маси борошняних кондитерських виробів при зануренні у воду з температурою 20°C на встановлений час. Цей показник характеризується відношенням маси виробів після намокання до маси сухих виробів (у масових частках відсотка).

Проведено дослідження здатності до намокання одержаних зразків печива. Визначені дані порівнювали з показниками, наведеними в ДСТУ 3781:2014.

Аналіз результатів, зведених у таблиці 3, дає змогу стверджувати, що додавання рослинних волокон сприяє збільшенню здатності зтяжного печива до намокання. Зокрема, значення показника намочуваності у виробі з клітковиною гарбуза становить 150 % проти 133 % у контролі, печива з додаванням клітковини коноплі – 175 %. У разі додавання до печива клітковини жита його здатність поглинати вологу дещо погіршується та наближується до контрольного зразка.

Таблиця 3

Показник намокання зтяжного печива

Вид печива	Намокання, %
Зтяжне печиво за вимогами ДСТУ 3781:2014	Не менше ніж 130
Зтяжне печиво без рослинних клітковин	133
Зтяжне печиво з клітковиною гарбуза	150
Зтяжне печиво з клітковиною жита	137
Зтяжне печиво з клітковиною коноплі	175

Уважаємо, що позитивний вплив харчових волокон на показник намокання печива пов'язаний з умістом основних поживних речовин (білки, жири, вуглеводи) і покращенням властивостей тіста в процесі приготування. Відмічено, що за значенням показника намокання всі досліджувані зразки відповідають вимогам ДСТУ (не менше ніж 130 %).

*Висновки.* Отже, на основі викладеного вище можемо підсумувати таке:

1. Доведена доцільність додавання харчових волокон гарбуза, жита й коноплі до складу печива зтяжного для надання виробам функціональних властивостей.
2. Установлено, що додавання харчових волокон не ускладнює технологічний процес виготовлення борошняного кондитерського виробу.
3. Показано, що всі зразки приготованого печива за органолептичними показниками відповідають умовам нормативної документації. Колір, смак і запах печива різняться залежно від волокон, які входять до його складу.



4. Найвищу оцінку за смаковими характеристиками одержав зразок печива зтяжного з клітковиною гарбуза, найменше балів у зразка печива зтяжного з волокнами коноплі за рахунок дещо специфічного смаку.

5. Визначено показник намокання одержаного печива й встановлено позитивний вплив харчових волокон на здатність виробів до поглинання вологи. Найнижчий відсотковий показник намокання в печива без додавання рослинних клітковин; найвищий відсоток намокання має печиво з клітковиною коноплі.

6. Надалі становить інтерес дослідження впливу харчових волокон на властивості тіста й терміни зберігання борошняних кондитерських виробів.

#### Список використаних джерел

1. Дорохович А. М., Петренко М. М. Розробка технології зтяжного печива спеціального призначення з врахуванням вимог нутриціології для людей похилого віку. *Збірник наукових праць Подільського державного аграрно-технічного університету. Серія «Технічні науки»*. 2016. Вип. 24, Ч. 2. С. 90–99.
2. Бажай-Жежерун С., Береза-Кіндзерська Л. Природні харчові сорбенти зерна. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського*. 2022. Т. 33 (72), № 6. С. 233–237.
3. Barber Thomas M., Kabisch S., Pfeiffer A.F.H., Weickert M.O. The Health Benefits of Dietary Fibre. *Nutrients*. 2020. Vol. 12(10). P. 3209. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33096647/>
4. Юрова Т. А., Рацук М. Є., Жадлун М. А. Використання рослинної сировини у виробництві ковбасних виробів. *Сталій ланцюг харчування та безпека крізь науку, знання та бізнес : тези доповідей II Міжнародної науково-практичної конференції, м. Харків, 15 травня 2025 р. Харків : Державний біотехнологічний університет, 2025. С. 127–128.*
5. Столбовой М. В., Рацук М. Є. Приготування кефіру із харчовими волокнами. *Ресурсозберігаючі технології легкої, текстильної і харчової промисловості : збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції молодих вчених та студентів, м. Хмельницький, 21 листопада 2024 р. Хмельницький : ХНУ, 2024. С. 256–257.*
6. Омельченко С. Б., Котляр О. В., Федак Н. В., Чорна Н. В., Пивоваров П. П., Лісниченко О. О. Використання клітковини соєвої як джерела харчових волокон у рецептурному складі соусів емульсійного типу. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*. 2025. Вип. 1(37). С. 30–46.
7. Дорохович А. М., Оболкіна В. І., Гавва О. О., Залевська Н. О., Кияниця С. Г. Дослідження використання рослинної сировини – джерела харчових волокон при виробництві кондитерських виробів. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Серія «Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв»*. 2004. С. 159–165.
8. Tănase Apetroaei V., Pricop E. M., Istrati D. I., Vizireanu C. Hemp Seeds (*Cannabis sativa* L.) as a Valuable Source of Natural Ingredients for Functional Foods-A Review. *Molecules*. 2024. Vol. 29(9). P. 2097. URL: <https://doi.org/10.3390/molecules29092097>
9. Nyam K. L., Lau M., Tan C. P. Fibre from pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) seeds and rinds: physico-chemical properties, antioxidant capacity and application as bakery product ingredients. *Malays J Nutr*. 2013. Vol. 19(1). P. 99–109. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24800388/>
10. Dziki D. Rye Flour and Rye Bran: New Perspectives for Use. *Processes*. 2022. Vol. 10. 293. URL: <https://doi.org/10.3390/pr10020293>

Дата першого надходження статті до видання: 10.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 08.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026

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





**M. Ratsuk, T. Yurova, K. Ratsuk**  
*Kherson National Technical University*

## **OBTAINING LONG-LASTING COOKIES WITH FUNCTIONAL PROPERTIES**

### *Summary*

Recently, functional foods have been growing in popularity. These are a special category of food products that not only serve as a traditional source of nutrients, but also contain biologically active components that have a positive effect on the physiological or psychological functions of the body. Functional foods must meet requirements not only in terms of functional effectiveness, but also in terms of organoleptic properties, which allows for regular consumption of these products as part of the daily diet.

The article discusses the feasibility of using plant fibers from rye, hemp, and pumpkin in the creation of flour confectionery products for health purposes. The aim of the study is to determine the effect of plant components on the organoleptic properties of long-life cookies.

The work develops recipes for long-life cookies with different components and obtains experimental samples. It was found that, in terms of organoleptic indicators, all samples of prepared cookies meet the requirements of DSTU 3781:2014 “Cookies. General technical conditions”. When determining the most delicious cookies, a group of consumers selected cookies with the addition of pumpkin fiber. It was determined that the addition of dietary fiber increases the moisture absorption index of long-lasting cookies.

The practical value of the study lies in the creation of a nutrient-enriched functional product that expands the range of flour confectionery products and meets consumer demand for high-quality food products in line with a healthy lifestyle.

**Keywords:** flour confectionery products, long-lasting cookies, dietary fiber, plant fiber, expertise, quality, safety.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-36>

УДК 663.2

О. Б. Ткаченко, д-р техн. наук, проф.

ORCID: 0000-0001-6969-6446

В. В. Алексович, здобувачка PhD

ORCID: 0009-0000-8561-8309

*Одеський національний технологічний університет*

e-mail: sobko-000@ukr.net

## УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ БІЛИХ ВИН ЗА ВИКОРИСТАННЯ ЕНОЛОГІЧНОЇ ДУБОВОЇ ДЕРЕВИНИ У ПРОЦЕСІ АЛКОГОЛЬНОЇ ФЕРМЕНТАЦІЇ

*Анотація.* У статті представлено результати дослідження впливу енологічної дубової деревини різного ступеня обпалення та дозування на формування хімічного складу та сенсорного профілю білого вина сорту Шардоне. Метою роботи було встановлення оптимальних технологічних параметрів застосування енологічної дубової деревини під час алкогольної ферментації для удосконалення якості білих вин. Для експерименту використано виноград сорту Шардоне та енологічну дубову деревину п'яти ступенів обпалення, внесена у дозуваннях від одного до п'яти грамів на літр.

Отримані результати засвідчили, що додавання енологічної дубової деревини позитивно впливає на перебіг алкогольної ферментації. Показники кислотності залишалися стабільними у всіх варіантах дослідження. Суттєві зміни зафіксовано у фенольному комплексі: індекс Фоліна–Чокальтеу, концентрації загальних поліфенолів, танінів та елагітанінів зростали залежно від ступеня обпалення і дозування енологічної дубової деревини. В ході дослідження зафіксовано зміни у комплексі органічних кислот, зокрема кавової, кафтарової та кумарової. Контакт з енологічною дубовою деревиною сприяв також помірним змінам інтенсивності та відтінку забарвлення. Сенсорний аналіз підтвердив, що застосування енологічної дубової деревини впливає на ароматичний та смаковий профіль білого вина, зокрема на розвиток фруктових, ванільних, пряних, димних і дубових нот, причому ступінь обпалення та дозування визначають інтенсивність цих змін.

Практичне значення роботи полягає у визначенні оптимальних технологічних параметрів застосування енологічної дубової деревини під час алкогольної ферментації білого вина. Це дає змогу цілеспрямовано регулювати формування фенольного комплексу, впливати на склад органічних кислот, інтенсивність і відтінки забарвлення, а також керувати формуванням сенсорного профілю відповідно до ступеня обпалення та дозування енологічної дубової деревини. У результаті технологія сприяє покращенню структури та ароматичної складності білого вина у процесі алкогольної ферментації без істотного збільшення виробничих витрат.

*Ключові слова:* енологічна дубова деревина, дубова щепка, алкогольна ферментація, білі вина, фенольний комплекс, поліфеноли, таніни, елагітаніни, органічні кислоти, інтенсивність забарвлення, сенсорний аналіз, ступінь обпалення.

*Вступ.* Розвиток виноробної галузі в другій половині ХХ століття, зокрема її індустріалізація та перехід до виготовлення вин у нейтральних ємностях (нержавіючі резервуари, бетон), стимулював пошук альтернативних способів надання вину характеристик дубової витримки.

Паралельно було досліджено й інші способи обробки деревини, зокрема вплив ультрафіолетового опромінення, ультразвуку, ферментних препаратів, а також різні режими термічного впливу. Ці технології були офіційно схвалені Міжнародною організацією винограду та вина [4] і дозволені до використання на стадіях бродіння та витримки відповідно до чинних резолюцій, а також нормативних актів Європейського Союзу [2].

Особливої актуальності питання використання енологічної дубової деревини постає під час алкогольної ферментації білих вин, що вирізняються делікатним ароматичним профілем та потребують максимально обережного технологічного втручання. Важливим завданням



є оцінка ефективності застосування енологічної дубової деревини у білих сортах. Сорт Шардоне було вибрано для дослідження завдяки його високій здатності гармонійно взаємодіяти з деревиною та відображати її технологічний вплив у хімічному і сенсорному профілі вина. У цьому контексті вивчення ролі різних ступенів обпалення та дозувань енологічної дубової деревини у модифікації хімічного та сенсорного профілю має суттєве значення для вдосконалення технології білих вин.

Традиційна алкогольна ферментація білих вин у нейтральних ємностях (нержавіюча сталь, бетон) дозволяє зберігати сортову ароматику та забезпечує точний температурний контроль. Введення енологічної дубової деревини під час алкогольної ферментації дає можливість цілеспрямовано збагачувати органолептичний профіль вина без зміни технологічного середовища: активізується екстракція фенольних сполук, з'являються тонкі ванільні, маслянисті, горіхові та димні відтінки. У результаті формується вино з більш комплексним ароматом і гармонійним смаковим профілем порівняно зі зразками, виготовленими без дубового контакту.

З метою порівняння отриманих у роботі результатів із сучасними науковими даними було проведено аналіз досліджень, присвячених фенольному комплексу вин, його кількісним і якісним характеристикам, а також динаміці змін під впливом технологічних чинників, зокрема контакту з енологічною дубовою деревиною.

У рамках цієї роботи важливим показником, який було проаналізовано, став індекс Фоліна–Чокальтеу – найбільш поширений метод визначення сумарного вмісту фенольних сполук. Він ґрунтується на спектрофотометричному визначенні кількості компонентів, здатних відновлювати фосфомолібденово-вольфрамний реагент, і широко застосовується у міжнародній практиці для оцінювання ступеня фенольної екстракції, технологічного впливу дубової деревини, а також потенційної стабільності вина під час витримки.

У дослідженні Rongbin Li та співавт. проаналізовано вплив дубової щепи різного ботанічного походження (французький, американський та яньшаньський дуб) і дозування (2–6 г/л) на формування фенольного комплексу сухого білого вина сорту Longyan протягом 60-денної витримки. Загальний вміст фенольних сполук визначали спектрофотометрично за методом Фоліна–Чокальтеу. Автори встановили чітку тенденцію до зростання концентрації фенольних речовин зі збільшенням кількості доданої енологічної дубової деревини: від  $\approx 0,038$  мг/мл у контрольному зразку до  $\approx 0,083$  мг/мл за умов застосування 6 г/л французького дуба. Отримані дані свідчать про інтенсивну екстракцію фенольних компонентів із деревини та їх вагомий внесок у підсилення кольору й формування більш комплексного ароматичного профілю вина. Таким чином, така робота доводить технологічну доцільність використання дубових чіпсів для збагачення білого вина фенольними сполуками та покращення його сенсорних характеристик [7].

У дослідженні Dimitrov та співавт. поставлено за мету оцінити вплив контакту білого сухого вина з дубовою деревиною різного походження та ступеня обпалення на його хімічний склад та структуру фенольного комплексу. Вино витримували у нових дубових бочках протягом 3–6 місяців. Аналіз проводили за такими ключовими параметрами фенольного профілю, як загальні фенольні сполуки (TPC), флавоноїдні феноли (FPC), нефлавоноїдні феноли (NPC) та загальний фенольний індекс (TPI). Експериментальна база дослідження включала вина сортів Chardonnay (врожаю 2020 і 2021 рр.) та Riesling (2021 р.), отримані з різних виноробних регіонів Болгарії та витримані у нових дубових бочках болгарського та французького походження з варіюванням ступеня обпалення.

У дослідженні Stegăruș та співавт. показано, що витримка білого вина Chardonnay у дубових бочках та контакт із дубовою щепою протягом 6 місяців призводили до підвищення титрованої та легкої кислотності та до трансформації летких фенольних сполук, зокрема утворення



ваніліну та р-вініл-гваяколу. Це підкреслює багатовекторний вплив деревини на кислотний та ароматичний баланс вина [5].

Chira & Teissedre досліджено екстракцію летких сполук і елагітанінів під час витримки вин із використанням французького дуба протягом 12 місяців, застосовуючи різні режими обпалення [3].

Різні види деревини по-різному впливають на фенольний склад і ароматичні характеристики білих вин навіть за короткого контакту тривалістю 15 днів, що зумовлено характером фенольної та легкої екстракції з деревини [6].

У серії досліджень Lukanin та співавт. описано механізми екстракції дубових речовин під час витримки виноматеріалів протягом 3–12 місяців, включаючи стадії, на яких першими екстрагуються фенольні сполуки, скополетин та ванілін. Ці результати підтверджують, що характер екстракції залежить як від тривалості контакту, так і від стану деревини та її попередньої обробки [3].

В оглядовій роботі [1] узагальнено результати сучасних досліджень, включно з особливостями контакту вина з енологічною дубовою деревиною як у короткотривалих технологічних режимах (до 30 днів), так і під час довготривалої витримки (6–18 місяців). Авторами наголошено на важливості типу деревини, способу її внесення та ступеня обпалення для керованої модифікації сенсорних характеристик вина.

Дослідження, проведені Courtegeon із застосуванням хроматографічних методів, продемонстрували, що зміна температури та тривалості термічного обпалення деревини формує різні профілі летких сполук, які надходять у вино впродовж типової витримки 6–12 місяців, це підтверджує ключову роль режимів обпалення у формуванні ароматичного потенціалу деревини [6].

Аналіз сучасних літературних джерел свідчить, що більшість наукових робіт зосереджена на вивченні змін фенольного та кольорового профілів вина під час витримки в контакт з енологічною дубовою деревиною, де закономірно фіксується зростання загального вмісту фенольних сполук із подовженням контакту та збільшенням дозування деревини.

Систематизація наявних публікацій також засвідчує, що дубова деревина впливає на кислотний склад вин безпосередньо шляхом екстракції органічних і летких кислот, що проявляється вже на ранніх етапах контакту. Паралельно дубова деревина істотно впливає на кольорові параметри вин, сприяючи формуванню стабільних пігментів, навіть за умови поступового зниження загальної інтенсивності забарвлення у процесі тривалої витримки. Таким чином, дубова деревина формує комплексний багатовекторний вплив, що охоплює фенольний, кислотний і кольоровий профіль вина та визначає його подальшу сенсорну еволюцію.

Комплексний підхід, що включає визначення фенольних індексів, органічних кислот та оптичних показників, дозволяє сформувати цілісне уявлення про роль енологічної дубової деревини у модифікації хімічного та сенсорного профілю білих вин і визначити оптимальні технологічні параметри її застосування.

*Мета дослідження* – визначення впливу енологічної дубової деревини різного ступеня обпалення та дозування на перебіг алкогольної ферментації, формування фенольного, кислотного та кольорового профілю білого вина сорту Шардоне, а також встановлення оптимальних технологічних параметрів її застосування для удосконалення якості білих вин.

*Матеріали і методи дослідження.* Матеріалом дослідження слугувала енологічна дубова деревина (*Quercus petraea* та *Quercus robur*) українського походження, виготовлена за запатентованою технологією «le Bousinage», що передбачає радіальне обпалення дубових заготовок над відкритим вогнем з подальшим швидким охолодженням. Такий режим забезпечує формування температурного градієнта в товщі деревини, який впливає на термоліз фенольних сполук



і розвиток летких ароматичних компонентів. Досліджувалися зразки енологічної дубової деревини Chalelure, які застосовуються у виноробстві для контакту з вином на етапах ферментації та витримки.

Дослідження проведено на базі мікровиноробного господарства Ференца Боркоці, розташованого в Берегівському районі Закарпатської області. Роботи виконувались у межах цеху мікровиноробства із дотриманням чинної нормативної документації, що регламентує переробку винограду та первинне виноробство.

Матеріалом дослідження також було вибрано виноград сорту Шардоне, отриманий з виноградників «ШАБО» (Одеська область, Білгород-Дністровський район, с. Шабо). Виноград переробляли за технологією білого вина без мацерації. Після відділення гребенів і дроблення ягід виконували негайне пресування із подальшим освітленням сусла природним осадженням за 12 год за температури 10–12°C. Освітлене сусло переносили у пластикові ємності об'ємом 5 л.

Експеримент алкогольної ферментації білого вина сорту Шардоне було проведено у 26 пластикових ємностях об'ємом по 5 літрів кожна із застосуванням чистої культури дріжджів *Saccharomyces cerevisiae* Enartis perlage у дозі 20 г на 100 л сусла, попередньо активованих у 5-кратному об'ємі води температурою 38–40°C. У кожному з 25 ємностей додавали дубову щепу фракції 6–20 мм, що відрізнялася ступенем обпалення: UN – необпалена, L – легке обпалення, M – середнє обпалення, M+ – середнє плюс обпалення, H – сильне обпалення. Щепу була попередньо термічно оброблена у печі за температури від 430 до 460 °C протягом 14–37 хвилин залежно від ступеня обпалення, що дозволяло досягти різного ступеня карамелізації та ароматичної складності. Щепу вносили безпосередньо перед інокуляцією дріжджів, забезпечуючи їй рівномірний контакт із сусликом на всьому етапі ферментації. Щодня проводили ручне перемішування для підтримання рівномірної екстракції фенольних сполук.

Щепу вносили у суслик у різному дозуванні: 1 г, 2 г, 3 г, 4 г та 5 г на 1 кг сусла, що дало змогу оцінити, як впливає концентрація енологічної дубової деревини на процеси ферментації та хімічний склад кінцевого продукту. Додавання енологічної дубової деревини здійснювали безпосередньо у суслик, що бродить, за контрольованої температури у межах 16–18 °C протягом 14 днів. Контрольним зразком була 26-а ємність, у яку щепу не додавали. Цей зразок дозволив порівняти результати оброблених варіантів із процесом ферментації без впливу енологічної дубової деревини (табл. 1).

Таблиця 1

Схема експерименту алкогольної ферментації вина сорту Шардоне

Ступінь обпалення	1 г/л	2 г/л	3 г/л	4 г/л	5 г/л
Необпалене/Untoasted	UN-1	UN-2	UN-3	UN-4	UN-5
Легке обпалення/Light toasting	L-1	L-2	L-3	L-4	L-5
Середнє обпалення/Medium toasting	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5
Середнє обпалення+/Medium + toasting	M <sup>+</sup> -1	M <sup>+</sup> -2	M <sup>+</sup> -3	M <sup>+</sup> -4	M <sup>+</sup> -5
Сильне обпалення/Heavy toasting	H-1	H-2	H-3	H-4	H-5

Після завершення алкогольної ферментації деревину вилучали шляхом фільтрування. Далі кожен зразок обробляли 5 % розчином діоксиду сірки до концентрації 60 мг/дм<sup>3</sup>, проводили освітлення бентонітом у дозуванні 150 г на 100 л, після стабілізації за температури 12 ± 1 °C протягом семи діб. Після стабілізації виноматеріали декантували, розливали у стерильні пляшки об'ємом 250 мл і герметично закупорювали. Маркування зразків виконували відповідно до схеми досліджу.



Хімічний аналіз здійснювали у лабораторії Laboratoire Études et Contrôles (Cognac, France), сертифікованій ISO/IEC 17025.

Методи включали:

1. Кислотний профіль

– рН вимірювали за допомогою ручного методу рН-метрії. Методика відповідає стандарту OIV-MA-AS313-15;

– летку кислотність ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) визначали методом парової дистиляції. Для проведення аналізу застосовували методику OIV-MA-AS313-02;

– загальну кислотність вимірювали методом ручного титрування з використанням рН-метрії відповідно до методики OIV-MA-AS313-01.

2. Фенольний комплекс

– Індекс Фоліна–Чокальтеу та Індекс загальних поліфенолів визначали спектрофотометричним методом. Для цього використовували спектрофотометр Lambda 25 UV (WinLab V6.0) з довжиною хвилі 750 нм;

– Індекс загальних поліфенолів вимірювали спектрофотометрично за 280 нм;

– Таніни та елагітаніни визначали шляхом аналізу на довжині хвилі 280 нм;

3. Органічні кислоти (кавову, кафтарову, кумарову) визначали методом високоефективної рідинної хроматографії (HPLC) з використанням хроматографічної системи Waters Alliance 2695, оснащеної діодним фотометричним детектором Waters 996.

4. Кольорові параметри вина вимірювали за методом суми абсорбцій за хвиль 420, 520 і 620 нм.

Обґрунтування вибору методів

– Спектрофотометричні та HPLC-методи є міжнародним стандартом для аналізу фенольного та кислотного профілів білих вин.

– Вибір ступенів обпалення ґрунтується на промисловій класифікації обпалення.

– Дозування 1–5 г/л відповідає діапазону, рекомендованому OIV і виробниками енологічної дубової деревини.

– Невеликі ємності (5 л) забезпечують точність відтворення та контроль екстракційних процесів.

Кожен аналіз виконували у трикратній повторності. Статистичну обробку здійснювали методами дисперсійного аналізу (ANOVA) з використанням програмного забезпечення Statistica 12.0. Відмінності між середніми вважали достовірними при  $p < 0,05$ .

Сенсорний аналіз проводили у Лабораторії сенсорного аналізу ОНТУ відповідно до міжнародних стандартів: ISO 5492:2008, ISO 8586:2012, ISO 13299:2016.

Методи включали:

1. Описовий метод (descriptive analysis), який передбачає визначення інтенсивності ключових дескрипторів за шкалою.

2. Метод флейвора (flavour profile), що дозволяє встановити загальний ароматичний та смаковий профіль зразків і виявити домінуючі сенсорні ознаки.

Таке поєднання підходів забезпечило всебічну характеристику зразків та підвищило надійність сенсорної оцінки.

*Результати та обговорення дослідження.* За результатами проведених досліджень було отримано експериментальні дані, які відображають динаміку змін хімічного складу та сенсорного профілю білого вина сорту Шардоне, залежно від дозування та ступеня обпалення енологічної дубової деревини, використаної під час алкогольної ферментації.

*Хімічний аналіз.* Для оцінки впливу дозування та ступеня обпалення енологічної дубової деревини на перебіг алкогольної ферментації, показники кислотності, фенольний комплекс, інтенсивність забарвлення та органічні кислоти білого вина сорту Шардоне було проведено



хімічний аналіз виноматеріалів. Дослідження виконували у лабораторії Laboratoire Études et Contrôles (Cognac, France), акредитованій за ISO/IEC 17025. Для дослідження застосовували методи спектрофотометрії, високоефективної рідинної хроматографії (HPLC), іонної хроматографії та стандартні методики OIV для визначення кислотного та кольорового профілів вина. Застосовані методи відповідають міжнародним стандартам аналізу білих вин та забезпечують високу точність оцінки змін, зумовлених контактом з дубовою деревиною.

**1. Показники кислотності.** Отримані результати визначення леткої, загальної кислотності та показника рН демонструють стабільність кислотного стану у всіх серіях зразків незалежно від ступеня обпалення та дозування енологічної дубової деревини. Летка кислотність варіювала в межах 0,26–0,34 г/дм<sup>3</sup> (у перерахунку на H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), що відповідає типовим значенням для молодих сухих білих вин після завершення алкогольної ферментації. Найвищі значення (до 0,34 г/дм<sup>3</sup>) зафіксовано у зразках без обпалення, тоді як у варіантах із середнім та сильним ступенем обпалення спостерігалася незначна тенденція до зниження показника (до 0,26–0,28 г/дм<sup>3</sup>). Це може бути зумовлено адсорбцією летких кислот фенольними сполуками дубової деревини або нейтралізацією частини кислоти дубильними речовинами, що вступають у реакцію з органічними кислотами вина.

Показник рН залишався практично незмінним у межах 3,58–3,65, що вказує на буферну здатність виноматеріалу та відсутність істотних зрушень кислотно-основної рівноваги під дією енологічної дубової деревини. Незначне підвищення рН у зразках із середнім та сильним ступенями обпалення може бути пов'язане з частковим переходом катіонів калію та кальцію з деревини, що сприяє осадженню винних солей і зниженню титрованої кислотності.

Показники загальної кислотності перебували у стабільних межах 3,0–3,2 г/дм<sup>3</sup>, що свідчить про незначний вплив енологічної дубової деревини на титровану кислотність вина. Таким чином, застосування енологічної дубової деревини під час алкогольної ферментації не призвело до суттєвих змін кислотного профілю виноматеріалу. Збереження стабільних значень кислотності є важливим технологічним показником, який підтверджує правильний перебіг алкогольної ферментації, оптимальну активність дріжджів і відсутність небажаних мікробіологічних процесів.

**2. Фенольний комплекс.** *Індекс Фоліна–Чокальтеу.* На цьому етапі дослідження проведено визначення поліфенольного комплексу виноматеріалів, що формувався під час алкогольної ферментації за участю енологічної дубової деревини різного ступеня обпалення. Отримані нами дані свідчать, що значення індексу Фоліна–Чокальтеу змінювалося залежно від ступеня термічної обробки енологічної дубової деревини, використаної під час алкогольної ферментації (NC, L, M, M<sup>+</sup>, H). Ці варіації наочно відображено на рис. 1, який демонструє різницю у загальному фенольному вмісті між серіями зразків та підтверджує технологічну чутливість фенольного комплексу до параметрів обпалення енологічної дубової деревини.

Отримані результати свідчать, що використання енологічної дубової деревини різного ступеня термічної обробки під час алкогольної ферментації вина суттєво впливає на формування фенольного комплексу, відображеного через значення індексу Фоліна–Чокальтеу. У контрольному зразку без додавання деревини показник становив 7,3 од., що відповідає базовому рівню фенольних сполук, екстрагованих із виноградної сировини без додаткового впливу деревини.

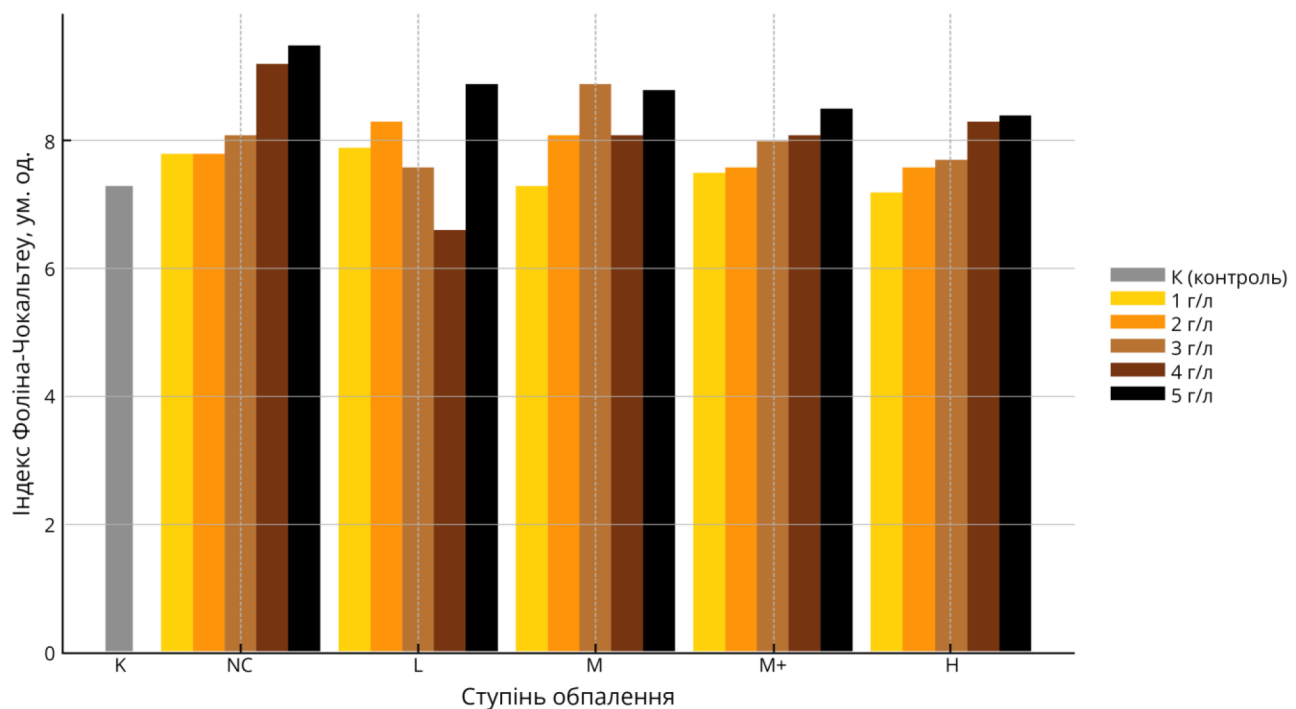
У разі застосування необпаленої деревини (NC) спостерігалася поступове підвищення індексу від 7,8 до 9,5 од. зі зростанням дозування з 1 до 5 г/л, що свідчить про активну екстракцію природних фенолів з деревини, зокрема елагової кислоти, танінів та гідролізованих поліфенолів, без участі термічно утворених компонентів.

Легкий ступінь обпалення (L) характеризувався коливаннями показника в межах 6,6–8,9 од. із вираженим максимумом у разі дози 5 г/л. Це може бути пов'язано з оптимальним співвідно-

шенням між природними фенольними сполуками та продуктами початкового термічного розкладу лігніну.

Для середнього ступеня обпалення (М) відзначено найвищі значення серед усіх серій – 8,9 од. у разі дозування 3 г/л. Така закономірність пояснюється активізацією процесів піролізу лігніну з утворенням фенольних альдегідів і кислот (сирингова, ферулова), що підвищують загальний рівень редуруючих сполук. У разі подальшого збільшення дозування концентрація залишалася стабільною (8,1–8,8 од.), що свідчить про досягнення насичення фенольної системи.

Для ступеня М<sup>+</sup> показники змінювались у межах 7,5–8,5 од., з тенденцією до зростання у разі підвищення дозування. Це вказує на стабільний, але менш інтенсивний вплив, імовірно пов'язаний із частковим термічним руйнуванням фенольних структур у разі сильнішого обпалення.



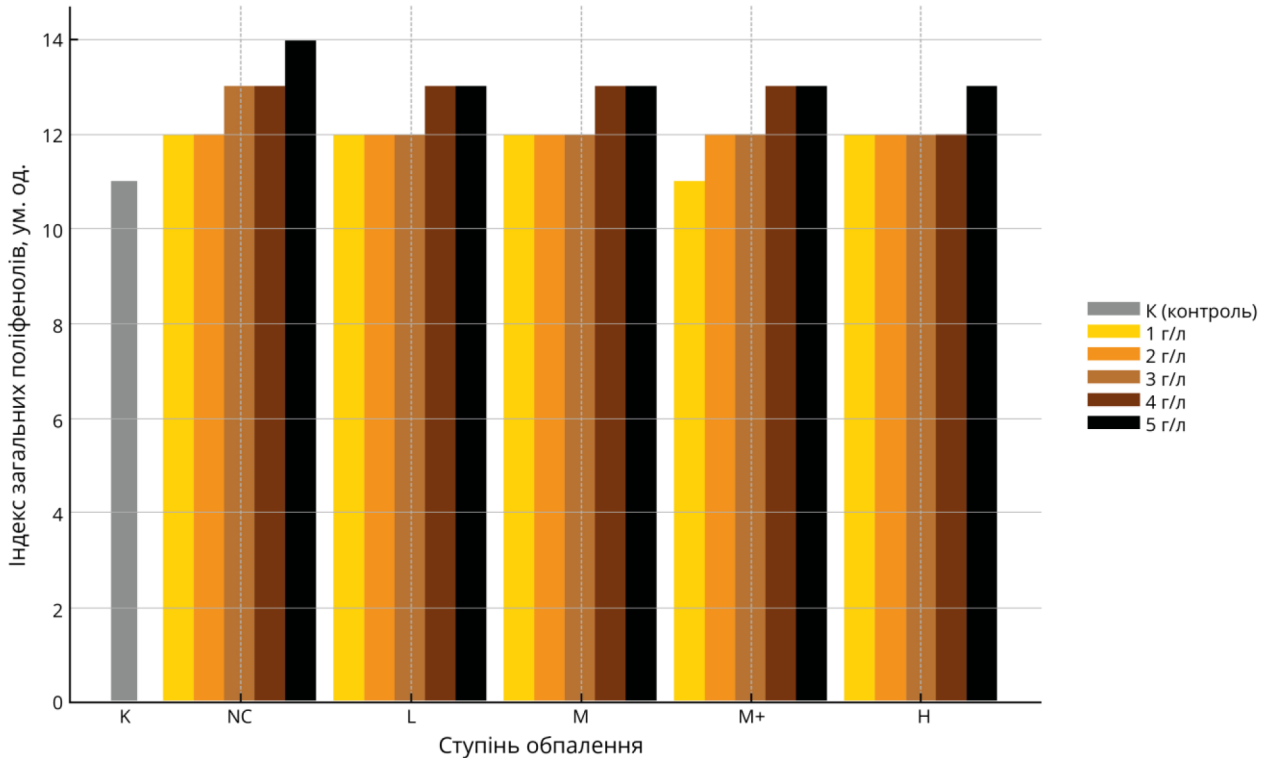
**Рис. 1. Показники індексу Фоліна–Чокальтеу зразків Шардоне після алкогольної ферментації з використанням енологічної дубової деревини марки «BOUSINAGE» різних ступенів обпалення (NC, L, M, M<sup>+</sup>, H) у разі дозувань 1–5 г/л**

Найменший рівень зростання зафіксовано для сильного ступеня обпалення (H) – 7,2–8,4 од., що пояснюється деградацією частини фенольних компонентів за високих температур піролізу (понад 250 °C) та зменшенням розчинних сполук у структурі деревини.

Загалом, найвищі значення індексу Фоліна–Чокальтеу спостерігалися у разі застосування середнього ступеня обпалення (M) у дозуванні 3 г/л, що свідчить про оптимальний баланс між екстрактивністю фенольних сполук і утворенням термічно модифікованих ароматичних компонентів.

Отже, експериментальні результати дозволяють визначити оптимальне поєднання параметрів енологічної дубової деревини – дозування 3–4 г/л у разі середнього або середнього + ступеня обпалення (M–M<sup>+</sup>), що забезпечує найкраще насичення вина фенольними речовинами. Отримані результати дослідження свідчать, що застосування енологічної дубової деревини різного ступеня термічної обробки під час алкогольної ферментації білого вина сорту Шардоне

впливає на формування загального поліфенольного комплексу, проте зміни цього показника є відносно помірними. У контрольному зразку, виготовленому без додавання деревини, індекс загальних поліфенолів становив 11,00 од., що відповідає базовому рівню фенольних сполук, притаманному виноматеріалу з винограду Шардоне.



**Рис. 2.** Показники індексу загальних поліфенолів зразків Шардоне після алкогольної ферментації з використанням енологічної дубової деревини марки «BOUSINAGE» різних ступенів обпалення (NC, L, M, M+, H) у разі дозувань 1–5 г/л

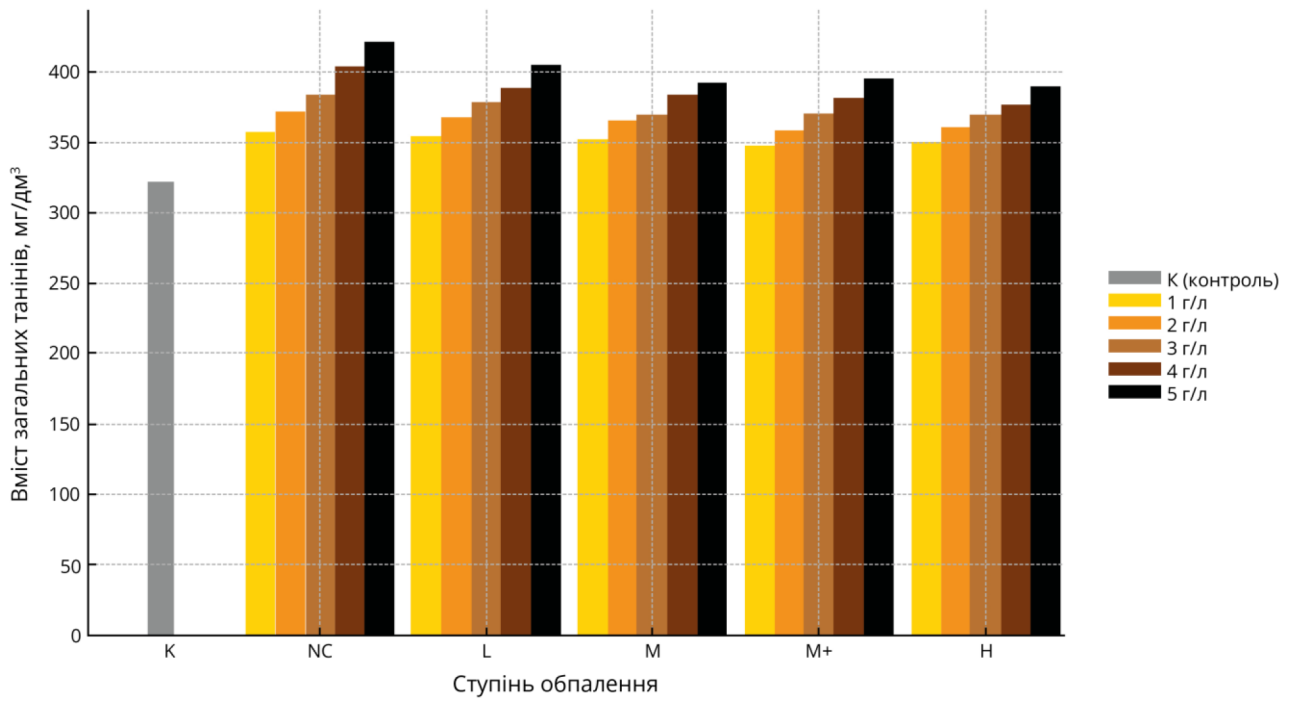
У разі використання необпаленої деревини (NC) зафіксовано поступове підвищення індексу від 12,00 до 14,00 од. зі зростанням дозування з 1 до 5 г/л. Це свідчить про активну екстракцію природних фенольних компонентів деревини (елагової кислоти, катехинів, танінів), що збагачують фенольний профіль вина без термічної деградації основних структур.

Для легкого (L) та середнього (M) ступенів обпалення значення індексу залишалися стабільними в межах 12,00–13,00 од., що вказує на досягнення рівноваги між екстракційними процесами та частковим термічним руйнуванням фенольних структур. За цих умов спостерігається збереження природного фенольного балансу вина без надмірної концентрації танінів.

Середній+ (M+) і сильний (H) ступені обпалення характеризувалися незначним підвищенням показників від 11,00–12,00 до 13,00 од., що свідчить про обмежену участь термічно модифікованих поліфенолів у збагаченні фенольного комплексу. За високих температур обпалення частина поліфенольних сполук зазнає конденсації або деградації, що зменшує їхню екстрактивність.

Загалом, отримані результати підтверджують, що найвищі значення індексу загальних поліфенолів спостерігалися у разі використання необпаленої деревини (NC) у дозуванні 5 г/л, тоді як подальше збільшення ступеня обпалення не сприяло суттєвому підвищенню поліфенольного вмісту. Таким чином, використання необпаленої або слабо обпаленої деревини під час ферментації білого вина є доцільним для помірної збагачення фенольного складу без ризику перевищення терпких або гіркуватих тонів у смаковому профілі.

Загальні таніни. Побудовані стовпчикові діаграми відображають динаміку зміни концентрації загальних танінів (у перерахунку на еквівалент галової кислоти) у зразках вина, отриманих із застосуванням енологічної дубової деревини різного ступеня обпалення – від необпаленої до сильної, що дозволяє простежити закономірності екстракції фенольних речовин під дією різного термічного впливу енологічної дубової деревини.



**Рис. 3. Показники загальних танінів зразків Шардоне після алкогольної ферментації з використанням енологічної дубової деревини марки «BOUSINAGE» різних ступенів обпалення (NC, L, M, M+, H) у разі дозувань 1–5 г/л**

Дослідження показало, що використання енологічної дубової деревини різного ступеня термічної обробки під час алкогольної ферментації вина Шардоне сприяє підвищенню вмісту загальних танінів порівняно з контролем, що свідчить про активну екстракцію фенольних сполук із деревини в процесі контакту. У контрольному зразку без додавання деревини концентрація загальних танінів становила 341 мг/дм<sup>3</sup>, що визначає базовий рівень цього класу сполук, характерний для виноматеріалів із білого винограду.

У разі застосування необпаленої деревини (NC) спостерігалось найбільш інтенсивне зростання показників – від 358 до 422 мг/дм<sup>3</sup> із підвищенням дозування з 1 до 5 г/л. Така закономірність зумовлена високою екстрактивною здатністю природних елагітанінів і катехінів, присутніх у не модифікованій термічно деревині, які легко переходять у водно-спиртове середовище вина.

Для легкого ступеня обпалення (L) зафіксовано поступове підвищення рівня танінів від 355 до 406 мг/дм<sup>3</sup>, що також свідчить про ефективну екстракцію, але з дещо меншими інтенсивностями, ніж у випадку необпаленої деревини. На цьому рівні обпалення відбувається часткове перетворення фенольних сполук у леткі ароматичні похідні, що знижує загальний вихід танінів, але підвищує ароматичний складник вина.

Середній (M) та середній+ (M+) ступені обпалення демонстрували близькі значення – у межах 352–396 мг/дм<sup>3</sup>, що вказує на стабільність процесів екстракції. З підвищенням температури обпалення частина танінів піддається термічній деградації або полімеризації, унаслідок чого їх розчинність у винному середовищі зменшується.

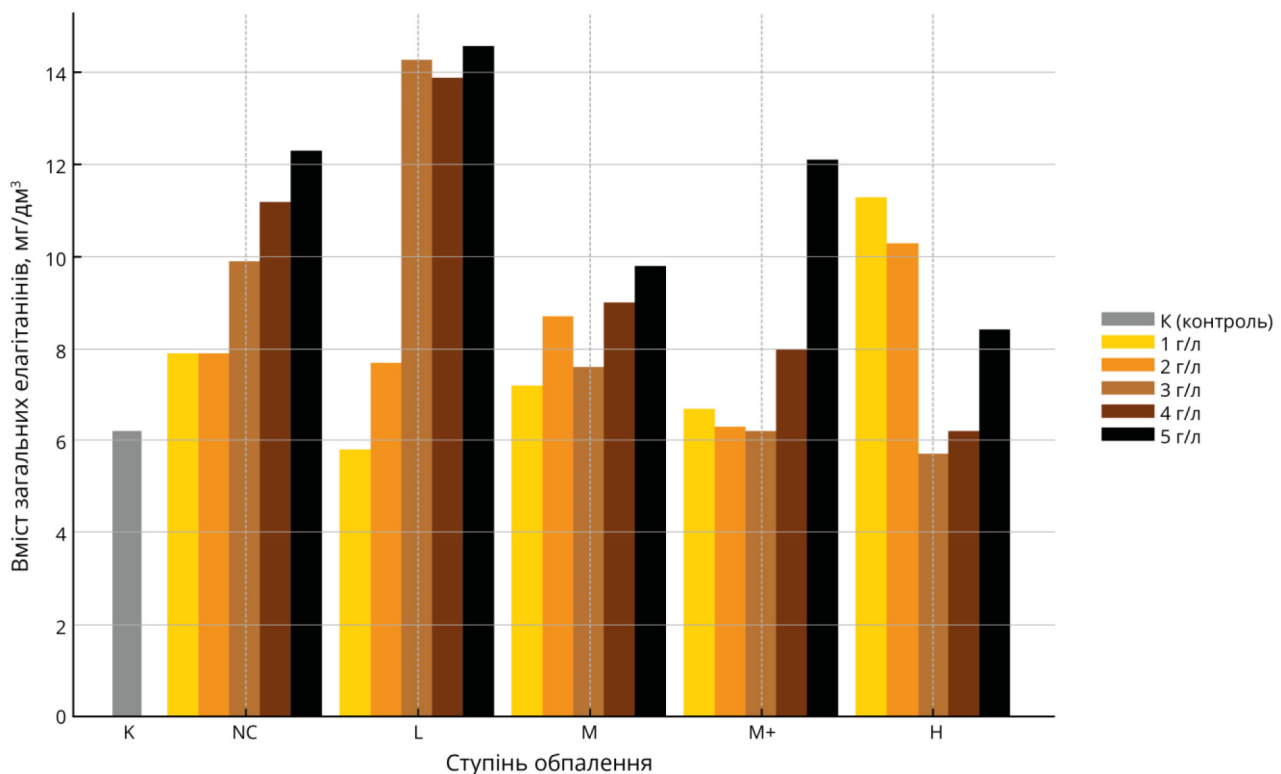
У разі сильного ступеня обпалення (Н) спостерігалось найменше зростання – від 351 до 390 мг/дм<sup>3</sup>, що узгоджується з літературними даними про зниження вмісту гідролізованих танінів за умов високотемпературного піролізу (>250 °С), коли структура лігніну та геміцелюлоз зазнає суттєвих руйнувань.

Загалом, із підвищенням дозування деревини спостерігалось стабільне наростання концентрації танінів для всіх ступенів обпалення, однак найбільш виражений ефект зафіксовано для необпаленої (NC) та легко обпаленої (L) деревини, що свідчить про оптимальне поєднання екстрактивності та збереження структури фенольних полімерів. Таким чином, використання необпаленої або слабо обпаленої енологічної дубової деревини у дозуванні 4–5 г/л забезпечує максимальне збагачення танінами вина Шардоне, сприяючи підвищенню його потенціалу та стабільності без ризику надмірної терпкості.

Загальні елагітаніни. Для оцінки впливу різних ступенів обпалення енологічної дубової деревини на перебіг екстракційних процесів у вині було проаналізовано загальний вміст елагітанінів. Цей показник відображає інтенсивність переходу фенольних сполук дуба у виноматеріал.

Отримані результати свідчать, що використання енологічної дубової деревини різного ступеня термічної обробки під час алкогольної ферментації вина Шардоне істотно впливає на накопичення елагітанінів – основної фракції гідролізованих танінів, які позитивно впливають на структуру вина. У контрольному зразку без додавання деревини вміст елагітанінів становив 6,2 мг/дм<sup>3</sup>, що відображає природний рівень цієї групи сполук, притаманний білим винам, які не контактували з деревиною.

У разі застосування необпаленої деревини (NC) спостерігалось поступове зростання показників від 7,9 до 12,3 мг/дм<sup>3</sup> зі збільшенням дозування з 1 до 5 г/л. Це вказує на активну екстракцію елагітанінів із необпаленої деревини.



**Рис. 4.** Показники загальних елагітанінів зразків Шардоне після алкогольної ферментації з використанням енологічної дубової деревини марки «BOUSINAGE» різних ступенів обпалення (NC, L, M, M<sup>+</sup>, H) у разі дозувань 1–5 г/л



Для легкого ступеня обпалення (L) зафіксовано найвищі показники серед усіх варіантів – 14,3–14,6 мг/дм<sup>3</sup> у разі дозувань 3–5 г/л. Це свідчить про оптимальне поєднання процесів термічної деструкції полімерів і підвищення екстрактивності.

Для середнього ступеня обпалення (M) показники залишалися помірними – 7,2–9,8 мг/дм<sup>3</sup>, із тенденцією до зростання у разі збільшення дозування. Це свідчить про часткову термічну модифікацію танінів і формування стійких конденсатів, які мають меншу розчинність, проте сприяють стабілізації кольору та структури вина.

Середній+ ступінь обпалення (M+) демонстрував низькі значення на початкових дозах (6,2–6,7 мг/дм<sup>3</sup>) і різке зростання до 12,1 мг/дм<sup>3</sup> у разі дозування 5 г/л. Така динаміка може бути зумовлена балансом між екстракцією термічно модифікованих сполук і деградацією частини елагітанінів за вищих температур (>230 °C).

Найнижчі показники зафіксовано у разі сильного ступеня обпалення (H), де концентрація елагітанінів зменшувалася до 5,7–8,4 мг/дм<sup>3</sup>. Це пов'язано з глибоким піролізом клітинних компонентів деревини, внаслідок якого елагітаніни частково переходять у леткі похідні та нерозчинні смолисті сполуки. Отже, максимальне збагачення вина Шардоне елагітанінами досягається у разі використання легко обпаленої деревини (L) у дозуванні 3–5 г/л, що забезпечує високу екстрактивність і стабільність фенольного профілю.

Таким чином, результати комплексного дослідження підтвердили, що застосування енологічної дубової деревини під час алкогольної ферментації білого вина сорту Шардоне істотно впливає на формування його фенольного профілю, зокрема на вміст загальних поліфенолів, танінів, елагітанінів та показник відновної здатності за індексом Фоліна–Чокальтеу.

Встановлено, що ступінь термічної обробки деревини визначає співвідношення між екстрактивністю природних фенольних сполук і рівнем їх термічної деградації:

- Необпалена (NC) деревина характеризується найвищою екстрактивністю елагітанінів і танінів, що зумовлює суттєве збагачення фенольного комплексу, але може надавати вину більш виражену терпкість;
- Легкий ступінь обпалення (L) забезпечує оптимальний баланс між екстракцією фенольних сполук та утворенням термічно модифікованих компонентів (фенольних альдегідів, ваніліну, гваяколу), що сприяє розвитку гармонійного смакового та ароматичного профілю;
- Середній (M) та середній+ (M+) ступені обпалення характеризуються стабільним, але менш вираженим збагаченням фенольної фази, водночас формують більш округлу структуру вина з м'якою терпкістю та складнішими ароматичними відтінками;
- Сильний ступінь обпалення (H) супроводжується зниженням концентрації фенольних сполук через піроліз поліфенолів, що призводить до формування вин із нижчим фенольним потенціалом, але більш делікатним смаком.

Загалом спостерігається чітка тенденція до підвищення показників фенольного комплексу зі зростанням кількості деревини у діапазоні 1–5 г/л, що вказує на ефективну екстракцію фенольних речовин у процесі алкогольної ферментації.

Оптимальні технологічні параметри:

- Ступінь обпалення: легкий (L) або середній (M);
- Дозування: 3–4 г/л;
- Тривалість контакту: у межах алкогольної ферментації (7–14 діб залежно від температурного режиму).

Саме за цих умов досягається збалансоване збагачення фенольного профілю, що проявляється у підвищенні загальних поліфенолів (до 13–14 од.), танінів (до 400–420 мг/дм<sup>3</sup>) та елагітанінів (до 14–15 мг/дм<sup>3</sup>) без надмірного накопичення грубих або гірких компонентів.



Таким чином, технологія використання легко або середньо обпаленої енологічної дубової деревини у процесі ферментації білого вина є ефективним методом підвищення органолептичної складності вина Шардоне, наближаючи його характеристики до ефекту витримки у бочці за нижчих економічних витрат.

**3. Інтенсивність забарвлення.** Для оцінювання оптичних властивостей білого вина було визначено показники загальної інтенсивності забарвлення та відтінку. Ці параметри слугують чутливими індикаторами хімічних змін, зумовлених екстракцією у тому числі фенольних сполук, які формують колір, перебігом окисно-полімеризаційних процесів, а також дією технологічних чинників, зокрема контакту з енологічною дубовою деревиною. Аналіз варіацій інтенсивності та відтінку забарвлення дає змогу комплексно оцінити внесок деревини у формування кольорових характеристик вина та ідентифікувати можливі відмінності між варіантами з різним ступенем обпалення й дозуванням деревини.

Загальна інтенсивність забарвлення зразків Chardonnay демонструє помірне, але стабільне підвищення порівняно з контролем (0,140) у всіх варіантах, де застосовувалася енологічна дубова деревина. Це свідчить, що сам факт контакту вина з деревиною, незалежно від ступеня її обпалення чи рівня дозування, забезпечує базовий рівень екстракції фенольних та кольороутворюючих сполук, відповідальних за зростання оптичної щільності.

Аналіз показників для різних ступенів обпалення (NC, L, M, M+, H) засвідчує відсутність різких або закономірних тенденцій: легке, середнє та сильне обпалення формують лише незначні коливання інтенсивності забарвлення, які не виходять за межі загальної варіабельності показника (0,170–0,270). Подібно й дозування 1–5 г/л не демонструє виразного ефекту. Хоч окремі пікові значення (наприклад, 0,270 для L-4 г/л) свідчать про можливий внесок обпалення у кольороутворення, ці відмінності є несистемними та статистично незначними.

Таблиця 2

Показники загальної інтенсивності забарвлення зразків Шардоне після алкогольної ферментації з використанням енологічної дубової деревини марки «BOUSINAGE» різних ступенів обпалення (NC, L, M, M+, H) у разі дозувань 1–5 г/л

Ступінь обпалення	1 г/л	2 г/л	3 г/л	4 г/л	5 г/л
NC – необпалена	0,190	0,200	0,210	0,230	0,250
L – легкий ступінь	0,190	0,220	0,210	0,270	0,230
M – середній ступінь	0,180	0,250	0,150	0,250	0,230
M+ – середній + ступінь	0,170	0,190	0,180	0,200	0,230
H – сильний ступінь	0,180	0,190	0,210	0,210	0,250
КОНТРОЛЬ – 0,14					

Таким чином, результати дозволяють стверджувати, що ні ступінь термічної обробки деревини, ні її кількість не є визначальними факторами формування інтенсивності забарвлення у білому вині.

Показники тону забарвлення зразків Chardonnay після алкогольної ферментації демонструють загальне зниження стосовно контролю (3,42) у всіх варіантах із застосуванням енологічної дубової деревини. Це свідчить, що сам факт контакту вина з деревиною сприяє формуванню більш теплого відтінку, незалежно від ступеня обпалення чи дозування.

Аналіз даних показує, що варіації відтінку між ступенями обпалення (NC, L, M, M+, H) залишаються відносно незначними, і різниця між ними не формує чіткої закономірності. Хоч окремі значення (наприклад, підвищений показник для середнього обпалення M у разі 3 г/л)

Таблиця 3

Показники відтінку забарвлення зразків Шардоне після алкогольної ферментації з використанням енологічної дубової деревини марки «BOUSINAGE» різних ступенів обпалення (NC, L, M, M+, H) у разі дозувань 1–5 г/л

Ступінь обпалення	1 г/л	2 г/л	3 г/л	4 г/л	5 г/л
NC – необпалена	2,480	2,790	2,880	3,020	2,970
L – легкий ступінь	2,760	2,600	2,770	2,450	2,830
M – середній ступінь	2,930	2,440	3,670	2,700	2,910
M+ – середній + ступінь	2,930	2,780	3,090	3,000	2,940
H – сильний ступінь	2,910	3,000	2,860	2,980	2,870
КОНТРОЛЬ – 3,42					

виділяються на тлі решти, ці відмінності є несистемними та не відображають стабільного технологічного ефекту.

Подібно до показників інтенсивності дозування енологічної дубової деревини у межах 1–5 г/л не демонструє чіткої тенденції змін: коливання тону забарвлення залишаються в межах природної варіабельності та не пов'язані з кількістю внесеної деревини. Це свідчить, що основний вплив на відтінок забарвлення зумовлений самим фактом контакту вина з деревиною, тоді як ані дозування, ані ступінь обпалення не є визначальними параметрами.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що енологічна дубова деревина стабільно знижує показник відтінку забарвлення порівняно з контролем, сприяючи формуванню більш стійкого відтінку, але внутрішні відмінності між варіантами деревини є мінімальними. Це підтверджує, що відтінок забарвлення у білому вині є менш чутливим до параметрів обпалення й дозування та відображає загальний, а не специфічний ефект деревини.

**4. Органічні кислоти.** Органічні кислоти відіграють ключову роль у формуванні хімічного та сенсорного профілю білого вина, визначаючи його смакову гармонію, свіжість, стабільність і здатність до подальшої еволюції. Вплив енологічної дубової деревини на кислотний баланс вин нині привертає значну увагу дослідників, оскільки взаємодія поліфенольних сполук деревини з кислотами здатна змінювати їх концентрацію та участь у реакціях пігментоутворення й полімеризації. У межах цього дослідження було зосереджено увагу на трьох фенольних кислотах – кавовій, кафтаровій та кумаровій, які є індикаторами поліфенольної екстракції та трансформації ароматогенних попередників. Кавова кислота бере участь у реакціях окиснення та формуванні ароматичних альдегідів; кафтарова кислота є ключовим компонентом глікозидних комплексів і чутливо реагує на вплив деревини, а кумарова кислота виступає попередником летких фенолів, що визначають пряно-тонкі ароматичні відтінки. Саме тому аналіз динаміки цих кислот дозволяє найбільш повно оцінити хімічні зміни, що відбуваються у вині під впливом енологічної дубової деревини різного ступеня обпалення та дозування.

*Кавова кислота.* Для оцінки впливу енологічної дубової деревини на органічний профіль білого вина було визначено вміст кавової кислоти – однієї з ключових фенольних кислот, що бере участь у формуванні ранніх етапів полімеризації фенольних сполук. Цей показник є чутливим індикатором екстракційних процесів, перебігу окисно-відновних реакцій та структурних змін у вині під впливом різного ступеня обпалення й дозування деревини. Аналіз динаміки вмісту кавової кислоти дозволяє оцінити як інтенсивність взаємодії вина з деревиною, так і загальний напрям хімічної еволюції фенольного комплексу.

Кавова кислота є однією з домінантних гідроксикоричних кислот у білих винах і відіграє ключову роль у формуванні їх реакцій окиснення та подальшого утворення хінонів, що беруть участь у полімеризаційних процесах. Вона чутливо реагує на контакт із дубовою деревиною, оскільки може як екстрагуватися з деревини, так і трансформуватися під впливом термічно модифікованих фенольних фракцій. Саме тому динаміка кавової кислоти виступає інформативним показником ступеня фенольної взаємодії вина з енологічною дубовою деревиною та дозволяє відстежити ранні хімічні зміни у вині.

Концентрація кавової кислоти у зразках Шардоне демонструє залежність від ступеня обпалення енологічної дубової деревини та рівня її дозування. Порівняно з контролем (9,718 мг/л) усі варіанти обробки деревиною призводять до зниження цього показника, але характер змін різниться між ступенями обпалення.

У серії NC (необпалена деревина) спостерігається найвиразніша тенденція до поступового зменшення кавової кислоти зі зростанням дози – від 9,202 мг/л (1 г/л) до 7,844 мг/л (5 г/л). Подібний спад характерний і для серії L, хоча значення на дозуванні 2 г/л (9,310 мг/л) дещо перевищують контроль, що може свідчити про короткочасний екстракційний ефект.

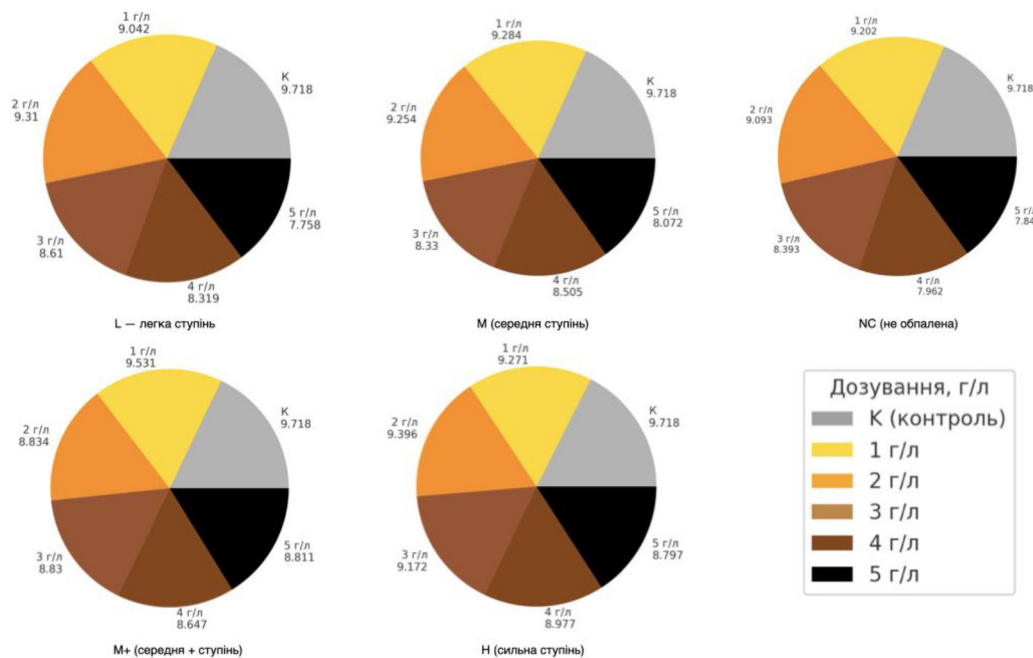


Рис. 5. Показники кавової кислоти зразків Шардоне після алкогольної ферментації з використанням енологічної дубової деревини марки «BOUSINAGE» різних ступенів обпалення (NC, L, M, M<sup>+</sup>, H) у разі дозувань 1–5 г/л

Для M та M<sup>+</sup> загальна динаміка плавніша: значення залишаються близькими між собою в межах 8,3–9,5 мг/л, без різких провалів у разі збільшення дози. Це може вказувати на більш збалансовані процеси екстракції та окиснення у середньообпаленій деревиці.

Найвищу стабільність показує H (сильне обпалення) – концентрації тримаються на рівні 9,271–9,396 мг/л у разі низьких дозувань і лише помірно знижуються до 8,797 мг/л у разі 5 г/л. Висока температура обпалення, ймовірно, зменшує кількість доступних фенольних попередників, тому зміни є менш різкими.

Загалом, збільшення дозування в усіх серіях спричиняє поступове зниження вмісту кавової кислоти, що може бути пов'язано з її участю у реакціях окиснення, полімеризації та адсорбції на деревиці. Найменший вплив на збереження кавової кислоти мають M<sup>+</sup> та H обпалення, тоді як NC та L сприяють швидшому зниженню цього показника зі зростанням кількості деревини.



*Кафтарова кислота.* Кафтарова кислота належить до групи фенольних сполук, що відіграють важливу роль у формуванні сенсорного профілю вин. Як проміжний продукт фенілпропаноїдного шляху вона бере участь у біосинтезі складніших поліфенолів, а її концентрація може відображати інтенсивність екстракційних процесів під час алкогольної ферментації та мацерації. У білому вині рівень кафтарової кислоти є чутливим індикатором взаємодії виноматеріалу з енологічною дубовою деревиною, зокрема у разі використання деревини різного ступеня обпалення. Зміни цього показника дозволяють оцінити вплив температурно-термічної обробки деревини на трансформацію фенольної фракції, стабільність кольору та потенційний ароматичний складник вина, забезпечуючи комплексне розуміння хімічних механізмів, що формують якість кінцевого продукту.

Концентрація кафтарової кислоти в дослідних зразках Шардоне суттєво перевищує контрольний рівень (54,853 мг/л), що свідчить про активну участь енологічної дубової деревини у формуванні фенольного профілю вина. Загалом усі ступені обпалення демонструють підвищення цього показника, однак характер змін відрізняється між ступенями обпалення.

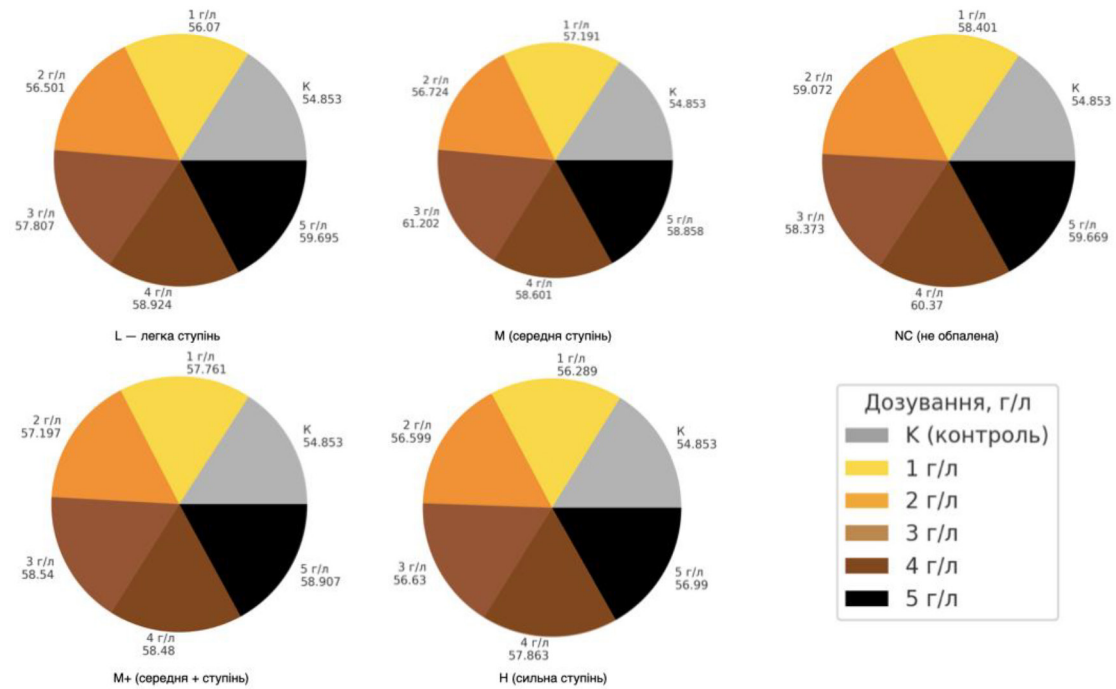
Необпалена деревина (НС) забезпечує найвищі значення серед усіх серій, з піком на дозуванні 4 г/л (60,370 мг/л). Динаміка є хвилеподібною, проте весь діапазон 58,4–60,4 мг/л стабільно перевищує інші ступені. Це може бути пов'язано з мінімальною деградацією фенольних попередників у деревині без термічної обробки. У серії L спостерігається поступове наростання кафтарової кислоти від 56,070 до максимальних 59,695 мг/л у разі 5 г/л, що свідчить про ефективну екстракцію фенольних кислот за м'яких режимів нагрівання деревини. М демонструє найбільш виражений піковий стрибок – 61,202 мг/л у разі дозування 3 г/л, що є найвищим значенням серед усіх варіантів. Це свідчить про оптимальне співвідношення між рівнем термічного розкладу та здатністю деревини вивільняти зв'язані фенольні сполуки. У серії М+ значення тримаються в діапазоні 57,2–58,9 мг/л без різких коливань. Така рівномірність може свідчити про стабільні процеси екстракції у разі М+ обпалення. Н навпаки демонструє найнижчі показники серед усіх серій – 56,3–57,9 мг/л. Високі температури обпалення, очевидно, зменшують кількість доступних фенольних попередників для утворення кафтарової кислоти.

Узагальнюючи, зазначимо, що найвищі значення кафтарової кислоти забезпечують середній ступінь обпалення (3 г/л) та необпалена деревина, тоді як сильне обпалення знижує цей показник.

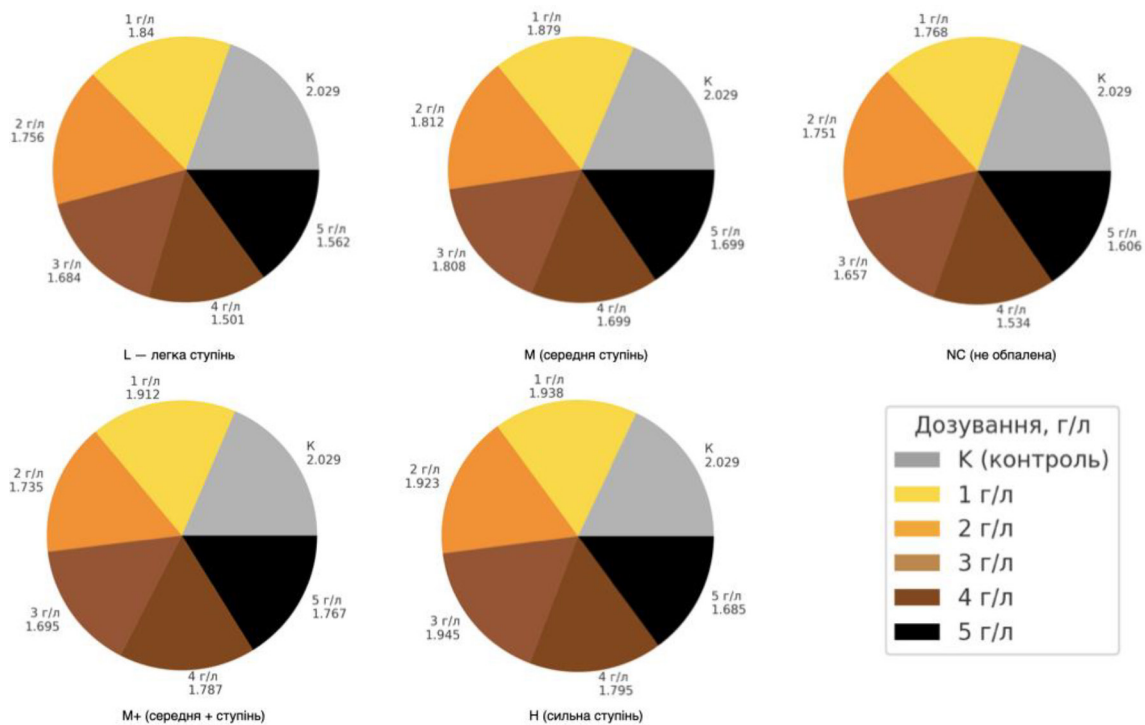
*Кумарова кислота.* Кумарова кислота належить до групи гідроксикоричних кислот і є важливою складовою частиною фенольного комплексу вин. Вона відіграє роль попередника ароматичних сполук, що утворюються під час ферментації та витримки. Концентрація кумарової кислоти чутливо реагує на технологічні фактори, зокрема контакт із деревиною, ступінь її обпалення та інтенсивність окисно-відновних процесів.

Концентрація кумарової кислоти в дослідних зразках системно нижча порівняно з контролем (2,029 мг/л), що свідчить про загальне зменшення цього показника внаслідок контакту вина з енологічною дубовою деревиною.

НС (необпалена деревина) показує плавне спадання від 1,768 до 1,534 мг/л, що є найнижчим значенням у серії. Мінімальна термічна обробка деревини, ймовірно, сприяє сильнішій адсорбції гідроксикоричних кислот. У серії L (легке обпалення) спостерігається подібна динаміка: максимальні значення у разі 1–2 г/л (1,840–1,756 мг/л) та поступове падіння до 1,501 мг/л на дозуванні 4 г/л, після чого відзначається невелике підвищення на 5 г/л (1,562 мг/л). Легке обпалення, очевидно, не забезпечує стабільної екстракції, але підсилює зниження через адсорбційні процеси. Для М (середнє обпалення) характерні найбільш збалансовані значення – 1,879–1,699 мг/л. Показники залишаються досить вирівняними без різких коливань, що може вказувати на оптимальне співвідношення екстракції та деградації фенольних кислот



**Рис. 6.** Показники кафтарової кислоти зразків Шардоне після алкогольної ферментації з використанням енологічної дубової деревини марки «BOUSINAGE» різних ступенів обпалення (NC, L, M, M+, H) у разі дозувань 1–5 г/л



**Рис. 7.** Показники кумарової кислоти зразків Шардоне після алкогольної ферментації з використанням енологічної дубової деревини марки «BOUSINAGE» різних ступенів обпалення (NC, L, M, M+, H) у разі дозувань 1–5 г/л



у разі помірною обпалення. У серії М+ (середнє+ обпалення) значення змінюються в межах 1,695–1,912 мг/л. На відміну від NC і L, зразки М+ не демонструють чіткої тенденції до зниження, навпаки, коливання є нерівномірними, а дозування 4–5 г/л дають помітно вищі показники (1,787 і 1,767 мг/л), що може бути проявом активнішої екстракції продуктів термічної трансформації. Найвищі значення серед усіх серій дає Н (сильне обпалення) – 1,938–1,945 мг/л на дозуваннях 1–3 г/л. Це близько до контрольного рівня і свідчить, що сильна термічна обробка знижує здатність деревини утримувати гідроксикоричні кислоти, натомість сприяє їх вивільненню у вино. На високих дозуваннях (4–5 г/л) рівень знижується, але залишається вищим за інші серії.

Загалом, найменше зниження кумарової кислоти спостерігається у серіях М+ та Н, які найкраще зберігають рівень цього компонента. Найбільш виражені втрати характерні для NC та L, що вказує на домінування адсорбційних та окисних процесів у необпаленій та слабо обпаленій деревині.

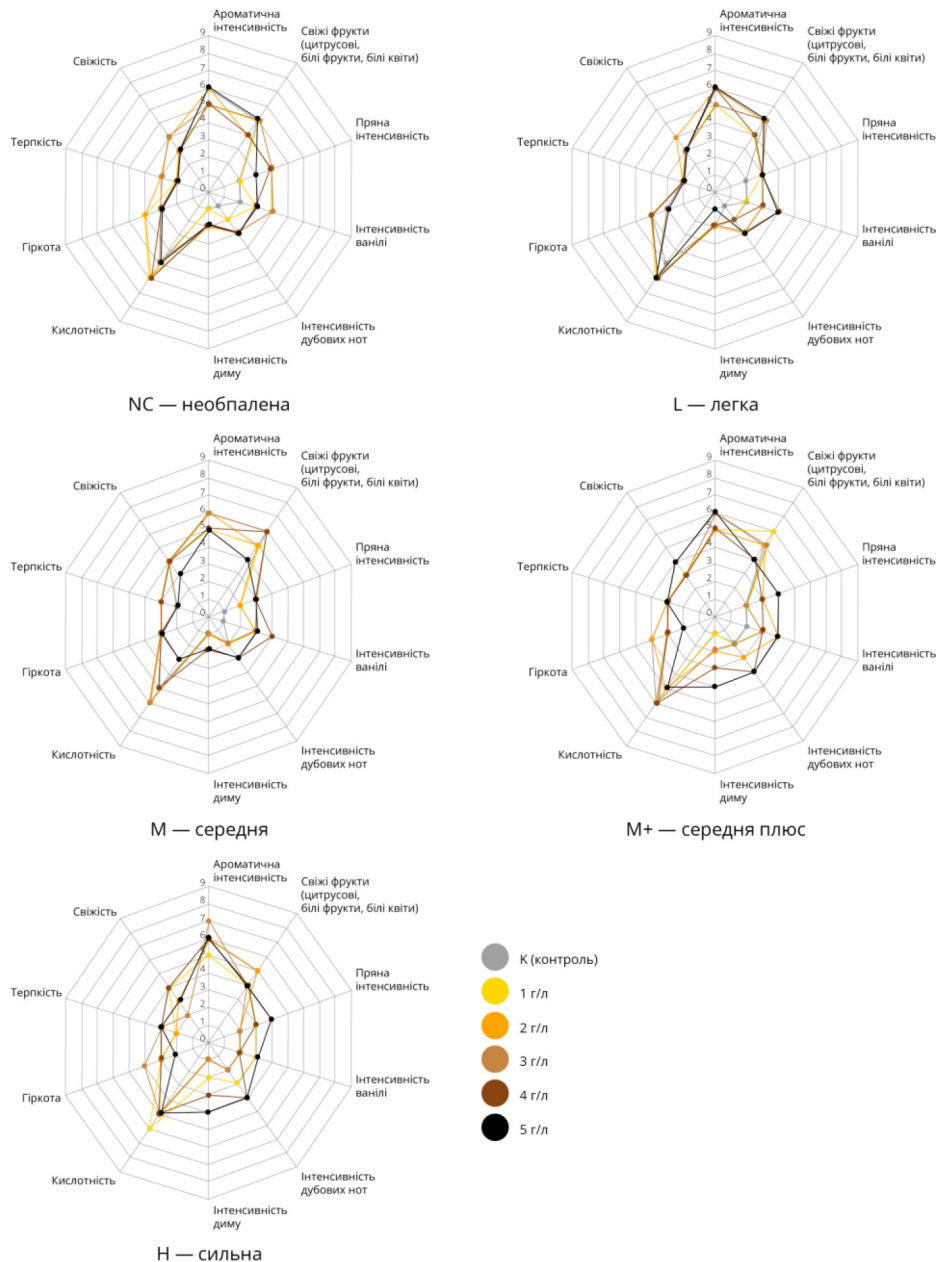
**Сенсорний аналіз.** Для комплексної оцінки впливу енологічної дубової деревини різного ступеня обпалення на формування органолептичних властивостей вина під час алкогольної ферментації було проведено сенсорний аналіз у Лабораторії сенсорного аналізу ОНТУ. Сенсорне дослідження мало на меті встановити зміни ароматичного та смакового профілю білого вина сорту Шардоне, залежно від кількості й інтенсивності термічної обробки енологічної дубової деревини. Для оцінювання застосовували стандартизовані методики, зокрема описовий метод (descriptive analysis) для визначення інтенсивності ключових дескрипторів та метод профілю флейвора (flavour profile). Для проведення сенсорної оцінки була сформована дегустаційна комісія відповідно до вимог міжнародних стандартів ISO 8586 та ISO 5492, які регламентують підготовку, кваліфікацію та роботу дегустаторів у сенсорних дослідженнях. Склад комісії забезпечував достатню репрезентативність і відтворюваність результатів, що дозволило об'єктивно оцінити вплив енологічної дубової деревини різного ступеня обпалення на ароматичні та смакові характеристики вин.

Надалі наведено приклад сенсорного аналізу білого вина сорту Шардоне після алкогольної ферментації. Представлені профілі відображають узагальнені результати оцінювання, отримані на основі середніх балів дегустаційної комісії, сформованої відповідно до міжнародних стандартів сенсорного аналізу. Таке подання дає змогу порівняти характерні ароматичні і смакові особливості та простежити вплив різних ступенів обпалення енологічної дубової деревини марки «BOUSINAGE».

На рисунку представлено п'ять радарних діаграм («павутин»), що відображають сенсорні характеристики вин сорту Шардоне після алкогольної ферментації з енологічною дубовою деревиною різних ступенів обпалення (NC, L, M, М+, Н) марки «BOUSINAGE» у дозуваннях 1–5 г/л.

Сенсорна оцінка Chardonnay після алкогольної ферментації з додаванням необпаленої енологічної дубової деревини показала, що зміни смаку й аромату залежали від дозування. Ароматична інтенсивність у більшості варіантів залишалася близькою до контролю, тоді як свіжі фруктові ноти найкраще проявилися у контролі, 1 і 3 г/л та зменшувалися у разі дозування 2 і 4 г/л. Ноти прянощів та ванілі посилювалися зі збільшенням кількості деревини, особливо у варіантах 2 і 3 г/л, що підтверджує активну передачу ароматичних компонентів навіть без термічної обробки. Дубові й димні ноти були помірними, але чіткішими у варіантах з 2–5 г/л. Кислотність зростала у зразках 1, 2 і 4 г/л, гіркота й терпкість підвищувалися у разі середніх доз. Найвища свіжість спостерігалася у варіантах 2 і 3 г/л.

Застосування енологічної дубової деревини легкого обпалення (L) спричинило деякі зміни у сенсорному профілі. Ароматична інтенсивність залишалася стабільною, а свіжі фруктові тони найкраще проявлялися у разі доз 2 і 3 г/л. Пряні ноти посилювалися у всіх варіантах, тоді



**Рис. 8. Сенсорний профіль вин сорту Шардоне після алкогольної ферментації з енологічною дубовою деревиною марки «BOUSINAGE», визначений за описовим методом та методом профілю флейвора, для різних ступенів обпалення (NC, L, M, M+, H) та дозувань 1–5 г/л порівняно з контролем**

як ваніль вирізнялася чіткіше у разі 3 і 5 г/л. Дубові та димні ноти були слабкими, але виразнішими у зразках з 2–5 г/л деревини. Кислотність підвищувалася незалежно від дозування, гіркота й терпкість залишалися низькими, а свіжість найкраще зберігалася у варіанті 2 г/л.

Середній ступінь обпалення (M) забезпечив незначні зміни профілю вина. Ароматична інтенсивність у більшості варіантів залишалася на рівні контролю, фруктові ноти добре зберігалися у разі середніх доз, але слабшали у разі максимального внесення. Пряні, ванільні, дубові й димні ноти були ледь помітними й з'являлися лише у вищих дозах. Кислотність залишалася стабільною, зміни гіркоти й терпкості були незначними, а свіжість зберігалася у більшості варіантів, знижуючись лише у разі дози 5 г/л.



Використання енологічної дубової деревини ступеня М+ зумовило більш помітні зміни. Ароматична інтенсивність залишалася близькою до контролю, з окремими підсиленнями у разі середніх та високих доз. Фруктові ноти добре зберігалися у разі малих доз, але поступово слабшали у разі внесення 4–5 г/л. Пряні, ванільні, дубові й димні ноти проявлялися чіткіше зі збільшенням кількості енологічної дубової деревини. Кислотність, терпкість та свіжість зберігалися без суттєвих коливань, а гіркота дещо знижувалася у разі найбільших доз.

Деревина сильного обпалення (Н) спричинила найпомітніші зміни серед усіх варіантів. Ароматична інтенсивність посилювалася переважно у разі дози 3 г/л, фруктові тони зберігалися за малих доз, але слабшали у разі збільшення кількості деревини. Пряні й ванільні ноти виявлялися чіткіше зі зростанням дозування, а дубові й димні ноти ставали виразнішими у варіантах 4–5 г/л. Кислотність залишалася стабільною, гіркота та терпкість проявлялися інтенсивніше у разі більших доз, тоді як свіжість знижувалася через посилення теплих деревних нот.

Сенсорний аналіз показав, що вплив енологічної дубової деревини на Chardonnay після алкогольної ферментації загалом має м'який і контрольований характер, а інтенсивність змін залежить як від ступеня обпалення, так і від дозування. Необпалена та легка деревина вносять найделікатніші модифікації, добре зберігаючи фруктовість і свіжість. Середній та середній+ ступені обпалення формують більш структурований аромат з помірними пряними й ванільними нотами, зберігаючи баланс кислотності. Сильне обпалення найвиразніше впливає на профіль, посилюючи деревні й димні ноти та зменшуючи фруктовість у разі високих доз. Оптимальні сенсорні характеристики загалом відповідають середнім дозуванням (2–3 г/л), які забезпечують гармонійне поєднання аромату, структури та свіжості без надмірного впливу деревини.

*Висновки.* Результати дослідження підтверджують, що енологічна дубова деревина є ефективним інструментом удосконалення технології білих вин, оскільки забезпечує збагачення фенольного комплексу, стабільний перебіг алкогольної ферментації та формування більш розвиненого ароматичного профілю. Встановлено, що контакт вина з деревиною не лише не порушує хід ферментації, але і стимулює активність дріжджових клітин, сприяючи швидшому споживанню цукрів. Найвиразніше збагачення фенольної фази спостерігалось у варіантах із застосуванням необпаленої та легкого обпалення енологічної дубової деревини, тоді як середній ступінь обпалення забезпечив максимальні значення індексу Фоліна–Чокальтеу. Деревина сильного обпалення, навпаки, характеризувалася нижчою екстрактивністю поліфенолів, однак забезпечувала стабільні показники кислотності та мінімальні зміни у вмісті органічних кислот.

Ступінь обпалення деревини продемонстрував чіткий вплив на концентрації кавової, кафтарової та кумарової кислот. Інтенсивність забарвлення та його відтінок змінювалися переважно внаслідок самого факту контакту з деревиною, тоді як роль ступеня обпалення та дозування була менш вираженою.

Сенсорний аналіз показав, що застосування енологічної дубової деревини сприяє формуванню більш структурованого смакового профілю, посиленню прямих, ванільних, деревних і димних нот без порушення кислотної рівноваги. Найбільш гармонійні сенсорні характеристики відповідали середнім дозуванням – 3–4 г/л та ступеням L і M, які забезпечували м'яке збагачення аромату і смаку без втрати фруктовості та свіжості.

Оптимальними технологічними параметрами застосування енологічної дубової деревини під час алкогольної ферментації визначено легкий або середній ступінь обпалення у кількості 3–4 г/л та контакт протягом усього періоду ферментації (приблизно 14 діб). Загалом використання енологічної дубової деревини дозволяє досягти ефекту, подібного до баричної витримки, водночас забезпечуючи суттєво нижчі економічні витрати та високу технологічну гнучкість.

**Список використаних джерел**

1. Aleksovych V., Tkachenko O. Use of oak alternative products in vinification. *Food Science and Technology*, 18(1), 39–50. DOI: <https://doi.org/10.15673/fst.v18i1.2856>. Vol. 18, Issue 1. 2024. P. 39–50.
2. Assembly T. H. E. G. RESOLUTION OIV-OENO 675B-2022. SPECIFIC MONOGRAPHS FOR ELLAGITANNINS. Specific monograph for oenological tannins containing ellagitannins. Method for the determination of sub-class affiliations. Characterisation by high-performance liquid chromatography (HPLC). *Issue April*. 2001. P. 1–12.
3. Id O., Id O. Аналіз впливу дубової витримки на органолептичні показники моносортних вин з різних винних регіонів України. 2025. P. 198–215. ISBN 0009000774065.
4. Oiv-oeno R. International Organisation of Vine and Wine (OIV). (2022). Specific monographs for ellagitannins: OIV-OENO 675B-2022. In *Oenological tannins*. 2016. P. 1–11. URL: <https://www.oiv.int/node/2890/download/pdf>
5. Romano R., Manzo N., Rivas-gonzalo J. C. LWT – Food Science and Technology Effect of size and toasting degree of oak chips used for winemaking on the ellagitannin content and on the acutissimin formation. Vol. 60, 2015. P. 934–940. DOI: 10.1016/j.lwt.2014.10.046
6. Jackson R. S. *Wine Science: Principles and Applications* (3rd ed.). San Diego : Academic Press. 2008.
7. Vivas N. *Manuel de tonnellerie à l'usage des utilisateurs de futaille*. Bordeaux : Editions Féret. 2002.

Дата першого надходження статті до видання: 20.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026

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



**O. Tkachenko, V. Aleksovych**

*Odesa National University of Technology*

## **IMPROVEMENT OF WHITE WINE TECHNOLOGY USING ENOLOGICAL OAK WOOD DURING ALCOHOLIC FERMENTATION**

### *Summary*

The article presents the results of a study on the influence of enological oak wood of different toasting degrees and dosages on the formation of the chemical composition and sensory profile of Chardonnay white wine. The aim of the work was to determine the optimal technological parameters for the use of enological oak wood during alcoholic fermentation in order to improve the quality of white wines. The experiment was conducted using Chardonnay grapes and enological oak wood of five toasting levels, applied at dosages ranging from one to five grams per liter.

The results demonstrated that the addition of enological oak wood exerted a positive effect on the progression of alcoholic fermentation. Acidity indicators remained stable across all experimental variants. Significant modifications were recorded in the phenolic complex: the Folin–Ciocalteu index and the concentrations of total polyphenols, tannins, and ellagitannins increased depending on the toasting degree and dosage of the enological oak wood. Changes were also observed in the profile of organic acids, particularly caffeic, caftaric, and p-coumaric acids. Contact with enological oak wood contributed to moderate shifts in color intensity and hue. Sensory analysis confirmed that the use of enological oak wood affects the aromatic and taste profile of white wine, enhancing fruit, vanilla, spicy, smoky, and woody notes, with the toasting degree and dosage determining the intensity of these modifications.

The practical significance of the study lies in identifying the optimal technological parameters for the application of enological oak wood during alcoholic fermentation of white wine. This approach enables targeted regulation of the phenolic complex, modification of organic acid composition, adjustment of color intensity and hue, and controlled shaping of the sensory profile in accordance with the toasting degree and dosage of the oak wood. As a result, the technology improves the structural and aromatic complexity of white wine during alcoholic fermentation without a substantial increase in production costs.

**Keywords:** enological oak wood, oak chips, alcoholic fermentation, white wines, phenolic complex, polyphenols, tannins, ellagitannins, organic acids, color intensity, sensory analysis, toasting level.



**ПРАЦІ**  
**Таврійського державного агротехнологічного університету**

Наукове фахове видання

**Випуск 26, том 1**

*Заснований у 1998 р*  
*Виходить три рази на рік*  
*Мови розповсюдження: українська, англійська*

Відповідальний за випуск – д.т.н., професор Панченко А.І.

Дата розміщення онлайн: 28.04.2026. Дата друку: 05.05.2026.  
Формат 60x84/8. Гарнітура Times New Roman.  
Папір офсет. Цифровий друк. Ум. друк. арк. 37,20. Замов. № 0326/278. Наклад 300 прим.

Видавництво і друкарня – 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