

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 2
Issue 26, volume 2

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

DOI: 10.32782/2078-0877-2026-26-2



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, 2026. Вип. 26, т. 2. 216 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., Prof. (Ukraine)
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. (Jordan)
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 2

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 № 9 від 28.04.2026 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: 10.32782/2078-0877-2026-26-2

**PROCEEDINGS OF TAVRIA STATE
AGROTECHNOLOGICAL UNIVERSITY**

Issue 26, volume 2

Founder

Dmytro Motornyi 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 Motornyi 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 Motornyi Tavria State
Agrotechnological University
Record No. 9, dated April 28, 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 adress: 72312, Zaporizhzhia region
Melitopol, 18, B. Khmelnytskyi Ave.
Actual address: 69600, Zaporizhzhia region Zaporizhzhia,
66, Zhukovskiyi Str.
<https://oj.tsatu.edu.ua>,
DOI: 10.32782/2078-0877-2026-26-2

ЗМІСТ

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

Л. В. Мельнікова, А. І. Шестака, А. О. Бойко

РОЗПОДІЛ МЕХАНІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ
ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИХ ПРИВОДІВ8

П. Є. Михаліченко, Є. Ю. Маркова, М. М. Марков

СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ
ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З НЕЛІНІЙНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ
АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ..... 19

А. V. Nadtochiy, V. A. Nadtochii

THEORETICAL BASIS OF ELECTRIC DRIVES WITH INHERENT
NONLINEARITIES..... 31

В. П. Савінов, С. В. Галько

ВПЛИВ МАГНІТНО-ВИХРЕВОЇ ОБРОБКИ ДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА
НА ПРОЦЕС СУМІШОУТВОРЕННЯ ТА ГОРІННЯ В ДИЗЕЛЬНОМУ ДВИГУНІ.....36

КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ

С. М. Григоренко, Л. І. Протасова, О. В. Євсєєв

БІОНІЧНО-ОРІЄНТОВАНИЙ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИЙ ПЛАНУВАЛЬНИК
ПЕРЕМІЩЕННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ У ДВОВИМІРНОМУ ПРОСТОРІ.....48

Є. В. Місько

АРХІТЕКТУРНІ ПІДХОДИ ДО РОЗШИРЕННЯ КІНЕМАТИКИ ПЕРСОНАЖА
В СЕРЕДОВИЩІ UNREAL ENGINE..... 59

А. В. Швед, Є. О. Давиденко

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ СИТУАЦІЙНОГО УПРАВЛІННЯ
В СКЛАДНИХ СИСТЕМАХ ДЛЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В УМОВАХ
ПОЗАШТАТНИХ СИТУАЦІЙ 64

МАШИНОБУДУВАННЯ (ЗА СПЕЦІАЛІЗАЦІЯМИ)

Я. В. Білокін, В. В. Дідур

ОБҐРУНТУВАННЯ ТА РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ ВІДТИСКУ РІДКОЇ ФАЗИ
З КАПЛЯРНО-ПОРИСТОГО ТІЛА..... 73

Є. А. Гавриленко, О. Є. Мацулевич

АЛГОРИТМ ФОРМУВАННЯ ОБВОДУ НА ОСНОВІ ОБЛАСТІ РОЗТАШУВАННЯ
ЕВОЛЮТИ МОНОТОННОЇ КРИВОЇ..... 81

С. В. Гулієнко, В. В. Ясеньчук

ВПЛИВ КУТА ОРІЄНТАЦІЇ КРУГЛОГО ТА ТРИКУТНОГО СПЕЙСЕРА
НА ГІДРАВЛІЧНИЙ ОПІР.....94

Д. П. Журавель, С. І. Пастушенко, М. П. Артёмов, М. П. Волинкін

ХАРАКТЕРИСТИКА ВІДМОВ ЕЛЕМЕНТІВ ВОДОПОСТАЧАННЯ
ДЛЯ СИСТЕМ КРАПЕЛЬНОГО ЗРОШЕННЯ.....101

<i>О. С. Ковязін, А. О. Парієв, О. О. Дереза, С. В. Дереза</i> ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РОЗРАХУНКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ІНТЕГРАЛЬНИХ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ҐРУНТОВОГО МАСИВУ ДЛЯ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ҐРУНТОВО-ПОВІТРЯНОГО ТЕПЛООБМІННИКА.....	112
<i>І. А. Колесніченко, О. В. В'юник</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОСТІЙКОСТІ ТА ФОРМ ЗВ'ЯЗКУ ВОЛОГИ В НАСІННІ РИЦИНИ МЕТОДАМИ ТЕРМІЧНОГО ТА ТЕРМОГРАВІМЕТРИЧНОГО АНАЛІЗІВ.....	122
<i>С. В. Ляшенко, М. О. Барда</i> ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ В'ЯЗКОЇ РІДИНИ.....	130
<i>А. І. Панченко, А. А. Волошина, О. С. Ковязін, І. А. Панченко, А. А. Волошин</i> ПРОГНОЗУВАННЯ ЗМІНИ ВИХІДНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАНЕТАРНОГО ГІДРОМОТОРА В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ.....	137
<i>І. Ю. Повар, А. С. Комар</i> ОЧИЩЕННЯ ОЛІЙ ЦЕНТРИФУГУВАННЯМ.....	150
<i>О. Г. Скляр, Р. В. Скляр, Б. В. Болтянський, В. Д. Акулов, О. С. Пушка</i> МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ НАКОПИЧЕННЯ МЕТАНОУТВОРЮЮЧИХ МІКРООРГАНІЗМІВ В АНАЕРОБНОМУ БІОФІЛЬТРІ.....	156

ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>С. С. Андрєєва, С. Л. Юрченко, В. В. Гербін</i> ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА ОРГАНІЗАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО АДАПТАЦІЇ ТРАДИЦІЙНИХ СТРАВ У СИСТЕМІ РЕСТОРАННОЇ ІНДУСТРІЇ.....	165
<i>В. В. Атанасова, О. Б. Чабанова, К. О. Білик, В. С. Атанасова</i> ТЕХНОЛОГІЯ ПРОДУКЦІЇ З РОСЛИННИМИ АДАПТОГЕНАМИ ДЛЯ ЗАКЛАДІВ РЕСТОРАННОГО ГОСПОДАРСТВА.....	173
<i>В. М. Бандура, М. Є. Сердюк, Т. О. Колісниченко</i> РОЗРОБКА РЕЦЕПТУР МУСОВИХ ДЕСЕРТІВ НА ОСНОВІ МОЛОЧНОЇ ТА ЯГІДНОЇ СИРОВИНИ.....	182
<i>В. В. Дуб, І. В. Лебединець, Д. В. Дмитревський, Л. М. Задорожна, А. С. Стефашкіна</i> ІНЖЕНЕРНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО НОЖА КУТЕРА ДЛЯ ЗАКЛАДІВ РЕСТОРАННОГО ГОСПОДАРСТВА ТА ХАРЧОВОЇ ІНДУСТРІЇ.....	189
<i>В. М. Зубко, Є. А. Петриченко</i> МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ФІЛЬТРАЦІЇ РОСЛИННОЇ ОЛІЇ В ЗЕЄРНІЙ ЗОНІ ШНЕКОВОГО ПРЕСУ.....	195
<i>О. О. Simakova, R. P. Nykyforov, S. I. Abdullin, K. S. Soloviova</i> SANITARY AND TECHNOLOGICAL PROCEDURES AND DETERMINATION OF MICROBIOLOGICAL PARAMETERS IN THE PROCESS OF MAKING YEAST-FREE BREAD.....	203
<i>М. В. Шевчук, Г. І. Дашивець</i> МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРИ ЕКСТРУЗІЙНІЙ ОБРОБЦІ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ.....	210

CONTENTS

ELECTRICAL POWER ENGINEERING, ELECTRICAL ENGINEERING AND ELECTROMECHANICS

<i>L. Melnikova, A. Shestaka, A. Boiko</i> LOAD SHARING WITH VARIABLE FREQUENCY DRIVES.....	8
<i>P. Mykhalichenko, Ie. Markova, M. Markov</i> SYNTHESIS OF A MATHEMATICAL MODEL OF A DIRECT CURRENT TRACTION DRIVE WITH NONLINEAR ELEMENTS FOR THE STUDY OF EMERGENCY MODES.....	19
<i>A. Nadtochiy, V. Nadtochii</i> THEORETICAL BASIS OF ELECTRIC DRIVES WITH INHERENT NONLINEARITIES.....	31
<i>V. Savinov, S. Halko</i> THE INFLUENCE OF MAGNETIC-VORTEX TREATMENT OF DIESEL FUEL ON THE PROCESS OF MIXTURE FORMATION AND COMBUSTION IN A DIESEL ENGINE.....	36

COMPUTER SCIENCES

<i>S. Hryhorenko, L. Protasova, O. Yevseiev</i> BIONIC-BASED NEURAL NETWORK MOTION PLANNER FOR A CYBER-PHYSICAL SYSTEM IN A TWO-DIMENSIONAL SPACE.....	48
<i>Ye. Misko</i> ARCHITECTURAL APPROACHES TO EXTENDING CHARACTER KINEMATICS IN THE UNREAL ENGINE ENVIRONMENT.....	59
<i>A. Shved, Ye. Davydenko</i> SITUATIONAL MANAGEMENT IN COMPLEX SYSTEMS FOR EMERGENCY DECISION-MAKING: APPLICATION AND APPROACHES.....	64

MACHINE BUILDING (BY SPECIALIZATIONS)

<i>Ya. Bilokin, V. Didur</i> JUSTIFICATION AND SOLUTION OF THE PROBLEM OF LIQUID PHASE PRINTING FROM A CAPILLARY-POROUS BODY.....	73
<i>Ye. Havrylenko, O. Matsulevych</i> ALGORITHM FOR FORMING A CONTOUR BASED ON THE LOCATION AREA OF THE EVOLUTE OF A MONOTONE CURVE.....	81
<i>S. Huliienko, V. Yasenichuk</i> INFLUENCE OF THE ORIENTATION ANGLE OF CIRCULAR AND TRIANGULAR SPACERS ON PRESSURE DROP.....	94
<i>D. Zhuravel, S. Pastushenko, M. Artomov, M. Volynkin</i> FAILURE CHARACTERISTICS OF WATER SUPPLY ELEMENTS FOR DRIP IRRIGATION SYSTEMS.....	101

<i>O. Koviazin, A. Pariev, O. Dereza, S. Dereza</i> EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL SUBSTANTIATION OF INTEGRAL THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF A SOIL MASSIF FOR NUMERICAL MODELING OF AN EARTH-TO-AIR HEAT EXCHANGER.....	112
<i>I. Kolesnichenko, O. Viunyk</i> RESEARCH ON THERMOSTABILITY AND MOISTURE BONDING FORMS IN CASTOR SEEDS USING THERMAL AND THERMOGRAVIMETRIC ANALYSIS METHODS.....	122
<i>S. Lyashenko, M. Barda</i> THEORETICAL BASIS OF MODELING VISCOUS LIQUID MOTION.....	130
<i>A. Panchenko, A. Voloshina, O. Koviazin, I. Panchenko, A. Voloshin</i> PREDICTION OF CHANGES IN OUTPUT CHARACTERISTICS OF A PLANETARY HYDRAULIC MOTOR UNDER OPERATING CONDITIONS.....	137
<i>I. Povar, A. Komar</i> OIL PURIFICATION BY CENTRIFUGATION	150
<i>O. Skliar, R. Skliar, B. Boltianskyi, V. Akulov, O. Pushka</i> MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF ACCUMULATION OF METHANE-PRODUCING MICROORGANISMS IN AN ANAEROBIC BIOFILTER....	156

FOOD TECHNOLOGIES

<i>S. Andrieieva, S. Yurchenko, V. Herbin</i> TECHNOLOGICAL AND ORGANIZATIONAL APPROACHES TO THE ADAPTATION OF TRADITIONAL DISHES IN THE RESTAURANT INDUSTRY.....	165
<i>V. Atanasova, O. Chabanova, K. Bilyk, V. Atanasova</i> TECHNOLOGY OF FOOD PRODUCTS WITH PLANT ADAPTOGENS FOR THE RESTAURANT INDUSTRY.....	173
<i>V. Bandura, M. Serdyuk, T. Kolisnychenko</i> DEVELOPMENT OF RECIPES FOR MOUSSE DESSERTS BASED ON DAIRY AND BERRY RAW MATERIALS.....	182
<i>V. Dub, I. Lebedynets, D. Dmytrevskyi, L. Zadorozhnia, A. Stefaskina</i> DESIGN OF AN ENERGY-EFFICIENT CUTTER KNIFE FOR RESTAURANTS AND THE FOOD INDUSTRY.....	189
<i>V. Zubko, I. Petrychenko</i> MATHEMATICAL MODELING OF THE VEGETABLE OIL FILTRATION PROCESS IN THE GRAIN ZONE OF A SCREW PRESS.....	195
<i>O. Simakova, R. Nykyforov, S. Abdullin, K. Soloviova</i> SANITARY AND TECHNOLOGICAL PROCEDURES AND DETERMINATION OF MICROBIOLOGICAL PARAMETERS IN THE PROCESS OF MAKING YEAST-FREE BREAD.....	203
<i>M. Shevchuk, H. Dashyvets</i> MODELING OF PROCESSES IN EXTRUSION PROCESSING OF VEGETABLE RAW MATERIALS.....	210



ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

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

УДК 62-83:621.01

Л. В. Мельнікова¹, канд. техн. наук, доц.

А. І. Шестака², ст. викладач

А. О. Бойко¹, д-р техн. наук, проф.

ORCID: 0000-0002-1732-1930

ORCID: 0000-0003-3229-0922

ORCID: 0000-0003-0048-9259

¹Національний університет «Одеська політехніка»

²Національний університет «Одеська морська академія»

e-mail: lubov.melnikova@op.edu.ua

РОЗПОДІЛ МЕХАНІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИХ ПРИВОДІВ

Анотація. В статті розглянуто технічні та програмні можливості сучасних частотно-регульованих приводів для вирішення задачі розподілу крутного моменту, коли кілька комплектів приводів та двигунів з'єднані та використовуються для керування одним механічним навантаженням. Детально описано кілька різних методів розподілу навантаження між приводами. Надано рекомендації щодо вибору конкретного варіанту розподілу навантаження залежно від особливостей механізму, типу механічного з'єднання та технологічних завдань загалом. Ці вимоги визначають тип приводів, які будуть використовуватися: прості та недорогі частотно-регульовані перетворювачі лише зі скалярним регулюванням, або сучасні приводи, адаптовані до певного сегмента технологічних завдань, з наявністю режимів «Головний-Підлеглий» та «Керування крутним моментом».

Ключові слова: багатоприводні механізми, розподіл крутного моменту, вирівнювання моментів, частотний електропривод, скалярне керування, векторне керування, управління моментом, режим головний-підлеглий.

Постановка проблеми. Розподіл або балансування навантаження (Load Sharing) це термін, що використовується для опису системи, де кілька комплектів приводів та двигунів з'єднані для приведення в рух одного спільного механічного навантаження. Таке з'єднання може бути жорстким (спільна шестерня механізму повороту козлового [1] або механізми пересування порталного кранів, вали намотувальних машин, дробарок і млинів [2], технологічні механізми з двома двигунами в паперовій, харчовій, деревообробній, текстильній промисловості) або гнучким (конвеєрні лінії [3], транспортери, ескалатори). В найвужчому сенсі розподіл навантаження означає, що величина крутного моменту, що прикладається до навантаження від кожного двигуна, визначається та виконується приводом цього двигуна і – в певному сенсі – цим двигуном. Розподіл навантаження передбачає одночасну сумісну роботу двох чи більше приводів та двигунів для забезпечення спільного результату для спільного технологічного процесу. Кожен привод та двигун вносять свою пропорційну частку потужності до керованого ними навантаження. Робота ж кількох двигунів від одного приводу, строго кажучи, не є варіантом розподілу навантаження, оскільки керування крутним моментом окремих двигунів неможливе. Двигуни, якими керують окремі приводи без будь-якого взаємозв'язку, також не розподіляють навантаження. Відсутність взаємозв'язку перешкоджає будь-якому можливому порівнянню та генерації сигналів помилок, які необхідні для компенсації різниці в навантаженні, що прикладається до будь-якого окремого комплексу приводів та двигунів.



Надалі під термінами «привод» і «двигун» будемо розуміти сучасний частотно-регульований електропривод (Variable Frequency Drive, VFD) провідних виробників, що керує асинхронним двигуном (Induction Motor, IM) або синхронним двигуном з постійними магнітами (Permanent Magnet Synchronous Motors, PMSMP).

Аналіз останніх досліджень. Для успішного вирішення таких задач виробниками сучасних частотно керованих приводів в останні роки постійно вдосконалюються апаратні та алгоритмічні можливості для рівномірного розподілу та балансу навантаження, коректного розгону і гальмування механізму, передбачуваної реакції системи на збурення і зміни спільного навантаження, а також на аварійні сигнали. Основна інформація щодо таких специфічних функцій VFD міститься їх в настановах по експлуатації, налаштуванню та програмуванню [8–13].

Постановка завдання:

- розглянути технічні та програмні можливості сучасних частотно-регульованих приводів для вирішення задачі розподілу крутного моменту, коли кілька комплектів приводів та двигунів з'єднані та використовуються для керування одним механічним навантаженням;
- детально описати кілька різних методів розподілу навантаження між приводами;
- надати рекомендації щодо вибору конкретного варіанту розподілу навантаження залежно від особливостей механізму, типу механічного з'єднання та технологічних завдань загалом;
- визначити вимоги до типів приводів, які будуть використовуватися: прості та недорогі частотно-регульовані перетворювачі лише зі скалярним регулюванням, або сучасні приводи, адаптовані до певного сегмента технологічних завдань, з наявністю режимів «Головний-Підлеглий» та «Керування крутним моментом».

Основна частина. Розподіл навантаження має бути реалізований щоразу, коли два або більше двигунів механічно з'єднані один з одним. Механічне з'єднання може бути жорстким, гнучким або роз'ємним. Наприклад, поширеними типами з'єднання є:

- спільний вал – може бути жорстким або гнучким;
- спільна шестерня, зуб-вінець в механізмі повороту, наприклад, порталного крана – жорстке з'єднання;
- транспортний засіб з принаймні двома приводами – жорстке з'єднання;
- транспортерна стрічка, конвеєр, ремінь – гнучке з'єднання, може коливатися, розтягуватися, деформуватися, розриватися;
- роликівий з'єднувач, з'єднаний через фрикційний контакт з полотном матеріалу – прослизання або втрата з'єднання.

Якщо двигуни керуються без розподілу навантаження, вони можуть працювати з суттєво різними крутними моментами, можуть потрапити в режим «один проти другого» можуть почати коливатися разом з конструкцією, або, навіть, потрапити в аварійний режим (наприклад, так званий «кроковий» режим роботи механізму пересування козлового або мостового крана за відсутності синхронізації приводів). Тому необхідно керувати обома механічно з'єднаними двигунами бажано з підтримкою не лише переміщення обох приводів з налаштованим розподілом навантаження, але й переміщення кожного окремого приводу. Робота механічно з'єднаних приводів без розподілення навантаження з різними швидкостями і моментами (рис. 1) передбачає, що крутні моменти приводів дзеркально протилежні один одному [2]. Хоча механічне з'єднання змушує їх встановлювати майже однакове задане значення швидкості, обидва приводи фактично працюють один проти одного.

Натомість, при роботі в режимі розподілу навантаження (рис. 2) крутні моменти обох приводів однакові. Приводи працюють разом з однаковою швидкістю та порівну розподіляють навантаження між собою.

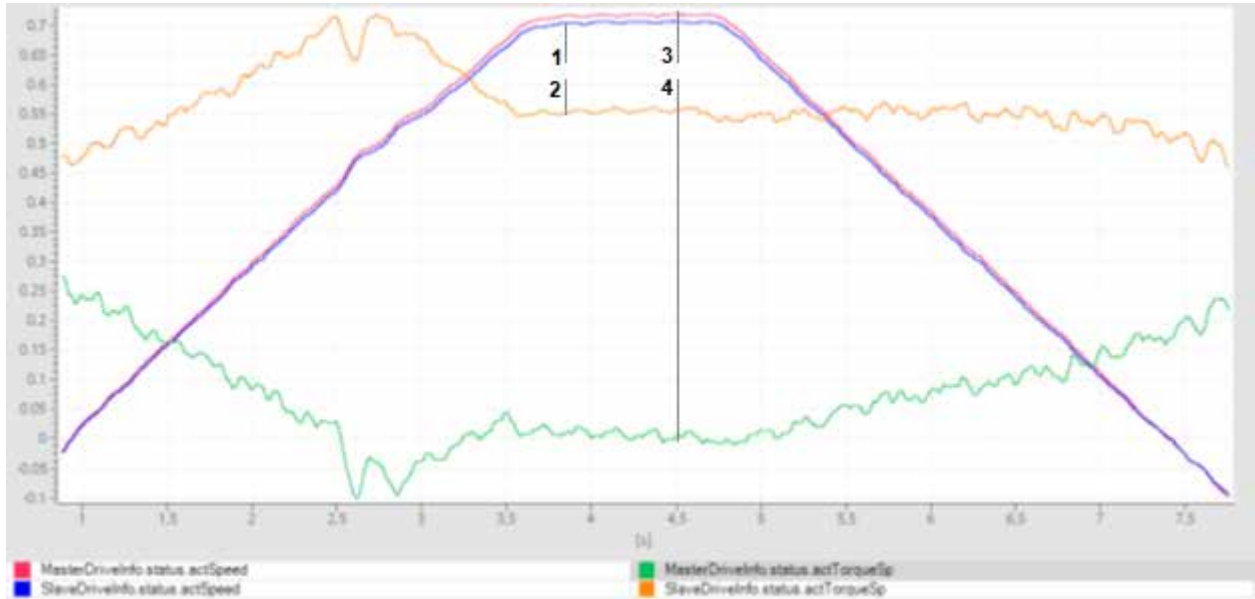


Рис. 1. Робота механічно з'єднаних приводів без розподілення навантаження з різними швидкостями і моментами, що знаходяться в протифазі: 1, 2 – відповідно швидкість і момент першого двигуна; 3, 4 – відповідно швидкість і момент другого двигуна

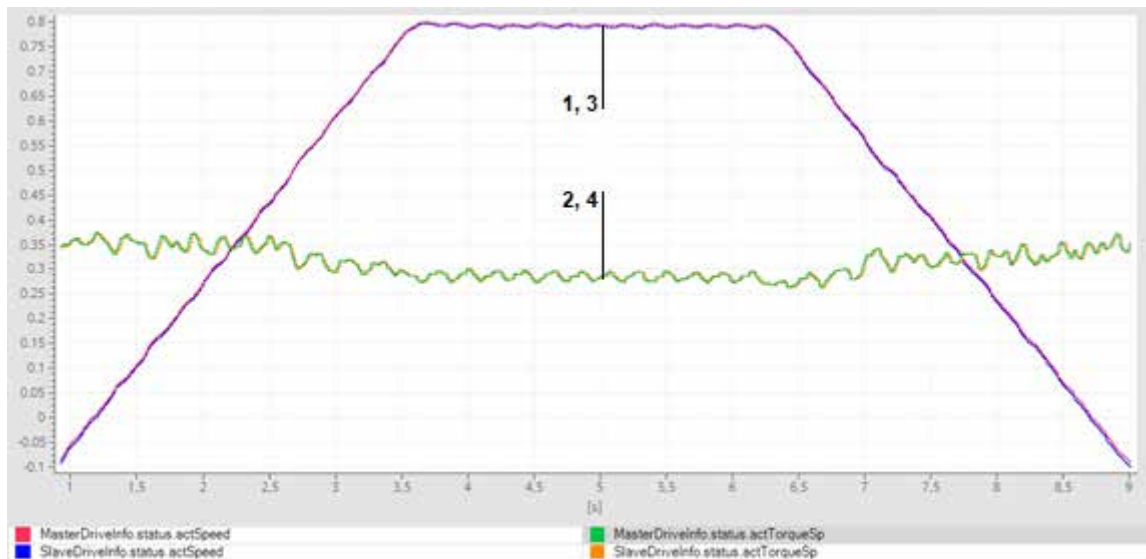


Рис. 2. Робота механічно з'єднаних приводів в режимі розподілу навантаження: 1, 3 – однакові швидкості обох двигунів; 2, 4 – однакові моменти обох двигунів

Методи балансування навантаження і топології керування. Зважаючи на певні розбіжності в термінології виробників VFD, а також приймаючи до уваги їх підходи до вирішення задач керування магнітним потоком двигуна [4–7] можна виділити кілька категорій методів розподілу навантаження:

- компенсація нахилу механічної характеристики чи компенсація швидкості (Droop, Slip Compensation);
- повторення швидкості з її корекцією та з обмеженням моменту двигуна;
- повторення крутного моменту.

Треба зауважити, що для вирішення задачі розподілу навантаження між двигунами і VFD останні мають забезпечувати наступні специфічні функції, на які, власне, розпадається задача:

- управління моментом (Torque Control) [8–12];
- режим «Головний-Ведений» (Master-Slave, Master-Follower) [13–17];
- режим роботи VFD із керуючим з'єднанням по шині Drive2Drive, або ж із з'єднанням з зовнішнім програмовано-логічним контролером (PLC). Протокол обміну такої мережі (Ethernet, Modbus RTU, CANopen, Profibus, DeviceNet, Powerlink, CC-Link) залежить від виробника і можливостей серії VFD [8–17];
- режим «Розподіл навантаження (Load Sharing)», присутній в багатьох VFD, не є критично необхідним за умови використання програмованого логічного контролера (PLC), або комп'ютерного моніторингу і управління через програмні застосунки виробника.

Розглянемо способи реалізації та сфери застосування названих методик більш докладно.

Компенсація нахилу (Droop, Slip Compensation) є найпростішою і найменш точною та гнучкою формою розподілу навантаження. Точність цього методу залежить від трьох факторів: алгоритму керування приводом, характеристик двигуна та типу навантаження, що керується. Треба зазначити, що просадку швидкості при збільшенні навантаження ми можемо спостерігати в простих скалярних VFD, оскільки скалярний (лише $U/f = \text{const}$) VFD не може керувати крутним моментом.

Якщо два ідентичних двигуна (рис. 3) керуються одним VFD (можливе лише скалярне керування), то тут мова йде не про розподіл, як це вже було зазначено вище, а про «природне» балансування навантажень двигунів.

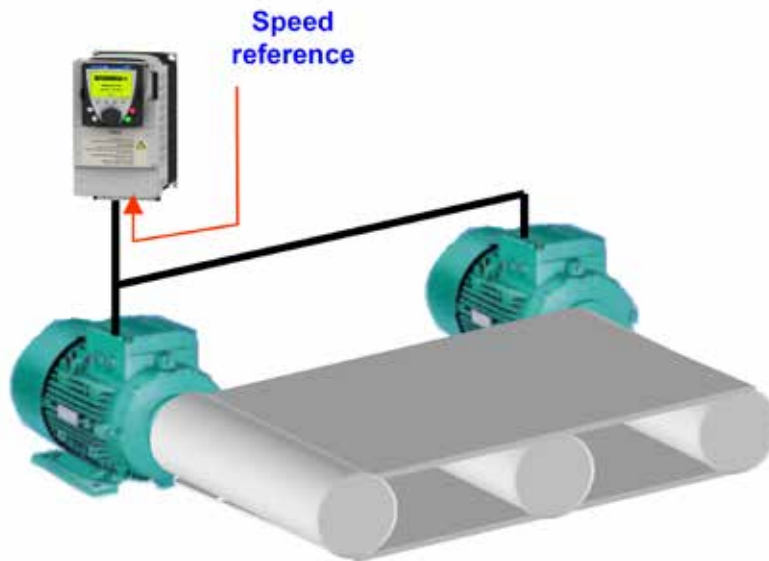


Рис. 3. Найпростіше «природне» балансування навантажень двигунів: один VFD для двох двигунів [6]

Принцип роботи полягає в тому, що при навантаженні одного двигуна його ковзання збільшується (тобто, він сповільнюється). Це призводить до збільшення навантаження другого двигуна, який також сповільнюється. Фактично, двигуни самі «розподіляють» навантаження, змінюючи своє ковзання, аби впоратися зі змінами моменту кожний на своєму валу [6].

Переваги такого рішення – це гранична простота і низька вартість: найпростіший VFD без додаткового обладнання для керування, наприклад короткими легкими конвеєрами без суттєвих діапазонів навантаження, тощо.

Недоліками є те, що оптимальна продуктивність досягається лише при використанні ідентичних двигунів, а баланс крутних моментів між двигунами погіршується при збільшенні навантаження.

Основним варіантом в цій категорії є робота кількох керованих окремими VFD двигунів з м'яким з'єднанням із спільним завданням швидкості (рис. 4) і з використанням спрощеного варіанту вбудованої в VFD функції Load Sharing. Деякі моделі виробництва Allen Bradley, Schneider, Danfoss, INVT мають таку можливість [5–7, 14].

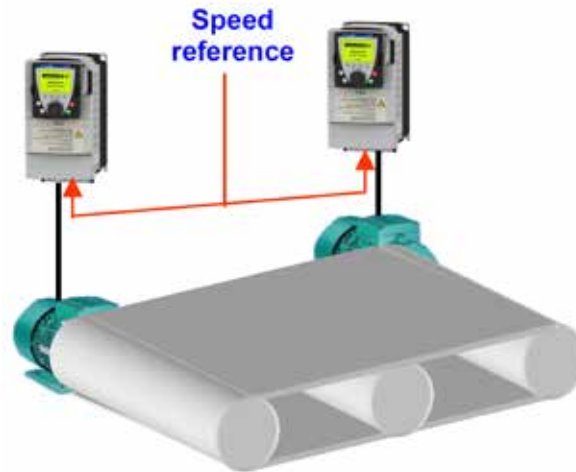


Рис. 4. Компенсація нахилу характеристик: два VFD з однаковими характеристиками Speed Droop Effect [6]

Балансування навантаження працює аналогічно «природній» компенсації ковзання, про яку йшлося вище, однак, замість використання природного ковзання двигунів, функція Load Sharing дозволяє використовувати «штучне» ковзання, що задається кожному VFD у вигляді ідентичних штучних механічних характеристик, як це показано на рис. 5. Тому забезпечується більш ефективний спосіб розподілу навантаження між різними двигунами, оскільки користувач, по суті, створює для них однакові механічні характеристики, виходячи з можливостей двигуна з найбільш м'якою характеристикою.

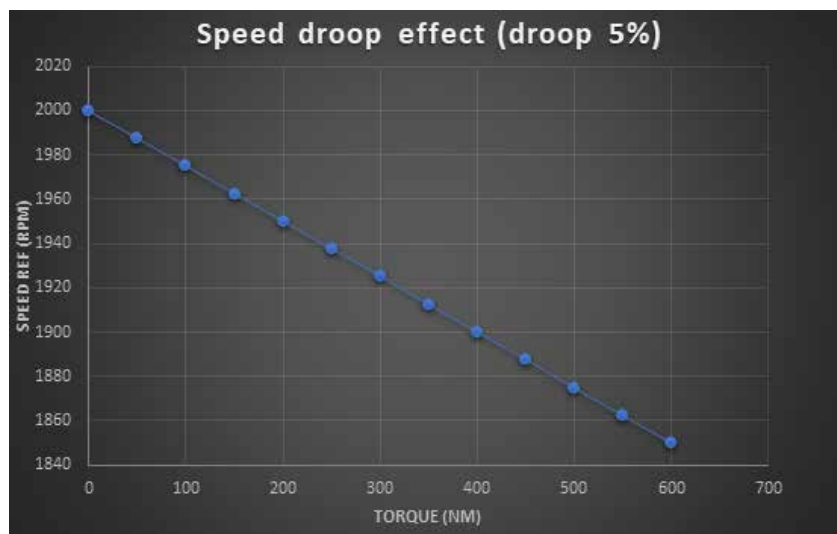


Рис. 5. Призначення Speed Drop Effect для VFD

У цьому (рис. 5) прикладі використання спрощеної вбудованої функції Load Sharing користувачем задано: опорна швидкість 2000 rpm при нульовому навантаженні і падіння швидкості $D_{\text{drop}} = 5\%$ при номінальному навантаженні 400 Nm, що забезпечить швидкість $2000 - 5\% = 1900$ rpm при номінальному моменті 400 Nm. Слід враховувати, що задане користувачем завдання опорної швидкості має бути вищим за бажану (номінальну) швидкість.

Ідентичні налаштування мають бути проведені для кожного VFD.

Перевагами цього варіанту є можливість однакового регулювання характеристик окремих VFD і відсутність з'єднань між ними. Недоліки – такі ж самі, як і у попередньому випадку: налаштування можуть бути виконані фактично для конкретної робочої точки з малим діапазоном зміни навантаження. Зрозуміло, тут не йдеться про автоматичну компенсацію навантаження між двигунами.

Отже, такий розподіл навантаження є слабо керованим і значною мірою залежним від двигунів, типу зчеплення в механізмі, та діапазону можливих змін навантаження.

Повторення швидкості з її корекцією та з обмеженням моменту двигуна. Цей метод характеризується наявністю інформаційного зв'язку між VFD і роботою приводів в режимі Master-Slave. Під час коригування швидкості з обмеженням крутного моменту, як головний, так і ведений приводи регулюються за швидкістю і знаходяться в векторному режимі управління (рис. 6).

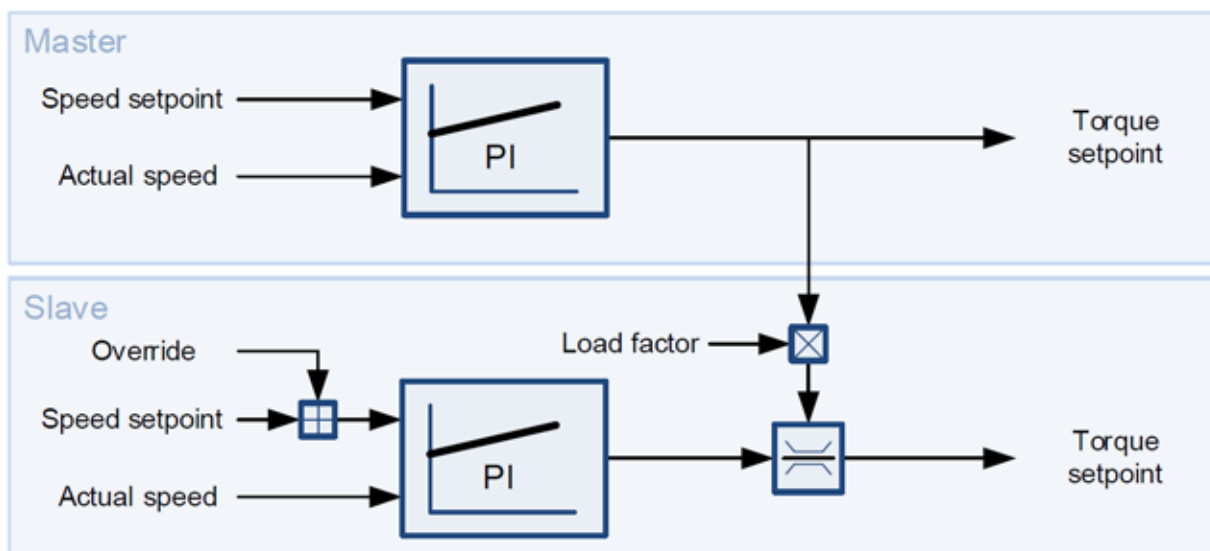


Рис. 6. Коригування швидкості з обмеженням крутного моменту

Обидва VFD знаходяться в режимі керування швидкістю і отримують однакове завдання Speed setpoint, яке порівнюється з сигналом поточної швидкості Actual speed. Це може бути або інформація від енкодера, або ж розраховане VFD значення поточної швидкості, якщо привод знаходиться в режимі Sensorless Control.

До заданого значення швидкості Speed setpoint веденого приводу додається призначене значенням коефіцієнта корекції (перевищення) Override (за замовчуванням 5%). Таким чином, ведений привод отримує вище задане значення швидкості, ніж головний привод. Щоб запобігти роботі веденого приводу проти головного, задане значення крутного моменту головного приводу симетрично з'єднане з обмеженнями крутного моменту веденого. Через постійне відхилення керування, ведений привод постійно працює на межі крутного моменту головного (рис. 7).

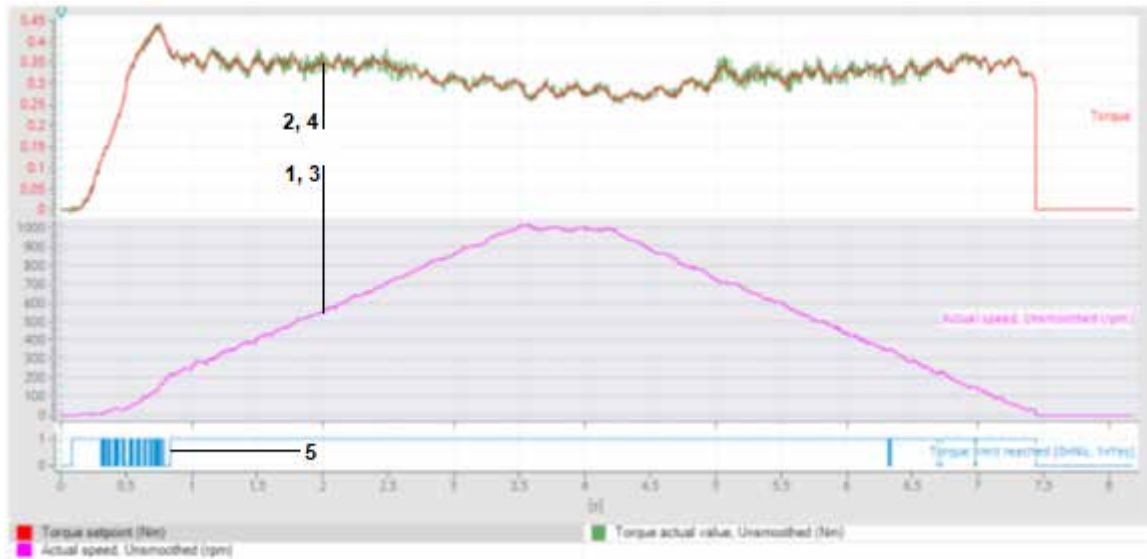


Рис. 7. Досягнення межі крутного моменту: 1, 3 – однакові швидкості обох двигунів; 2, 4 – однакові моменти обох двигунів; 5 – досягнення межі моменту відповідає логічній одиниці

Якщо вибрано вище значення корекції, то при регулюванні швидкості буде більша різниця між заданим значенням і фактичним значенням. Якщо ведений привод ще не досяг межі крутного моменту, межа крутного моменту буде досягнута швидше завдяки більшому відхиленню керування. У цьому режимі важливо, щоб ведений привод завжди знаходився на межі крутного моменту.

Для керування швидкістю без енкодера межа крутного моменту може не бути досягнута на початку рампи розгону та в кінці рампи уповільнення через перемикання з керування в розімкненому контурі на керування в замкнутому контурі. У разі послаблення механічного з'єднання між приводами, ведений привод не обертається вільно, а натомість намагається наблизитися до своєї коригованої швидкості.

Цей метод застосовується в системах без жорсткого з'єднання валів: в управлінні на тяжінням моталки для підтримки постійного натягу тканини, паперу, стрічки; в міксерах при зміні консистенції; в конвеєрних системах для обмеження перевантаження по струму.

Повторення крутного моменту. Метод потребує, перш за все, організації системи приводів в конфігурації Master-Slave (рис. 8).

Головний привод Master працює в режимі регулювання швидкості (Speed Control), а ведений — в режимі управління моментом (Torque Control). Розраховане в блоці регулятора швидкості головного приводу завдання для блоку регулятора моменту Master надсилається до веденого приводу як задане для Slave значення крутного моменту. Звичайно, це передбачає, що існує можливість отримати доступ до команди крутного моменту після регулятора швидкості, і, навіть більше, що приводи можуть працювати в режимі регулювання реального крутного моменту. Багато недорогих VFD для загальних задач не можуть цього зробити.

Сигнал завдання моменту може масштабуватися на виході головного або на вході підлеглого, щоб здійснити розподіл навантаження в будь-якому бажаному співвідношенні. У цьому випадку можна мати комплекти приводів та двигунів навіть різної потужності, кожен з яких тягне навантаження в межах своїх можливостей.

Якщо вали двигунів з'єднані жорстко, їхні швидкості вимушено будуть однаковими. При цьому можна подавати завдання швидкості лише на Master (рис. 9), оскільки всі ведені двигуни будуть обертатися із швидкістю головного.

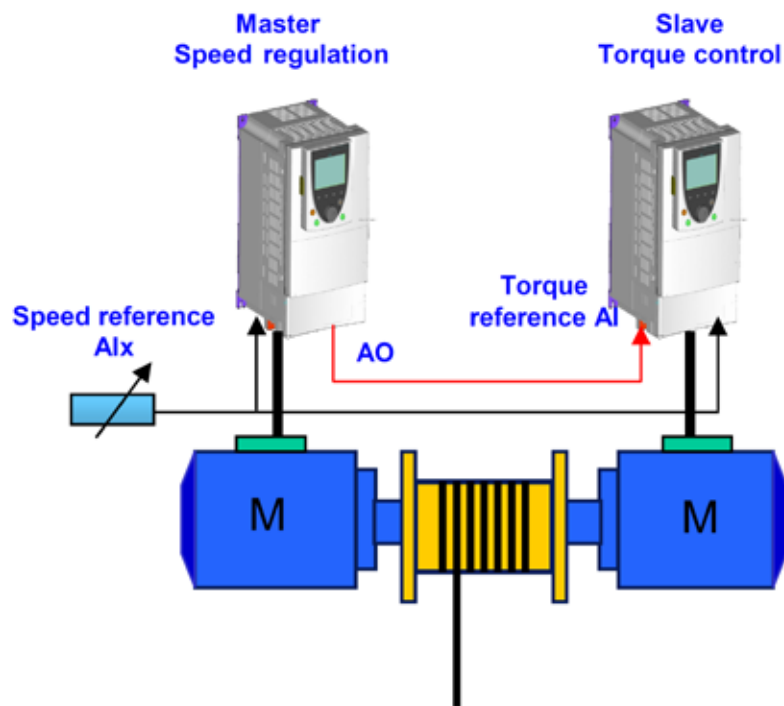


Рис. 8. Повторення моменту в конфігурації Master-Slave з передачею завдання для регулятора моменту Slave з аналогового виходу Master на аналоговий вхід Slave. Завдання швидкості є спільним для головного і веденого

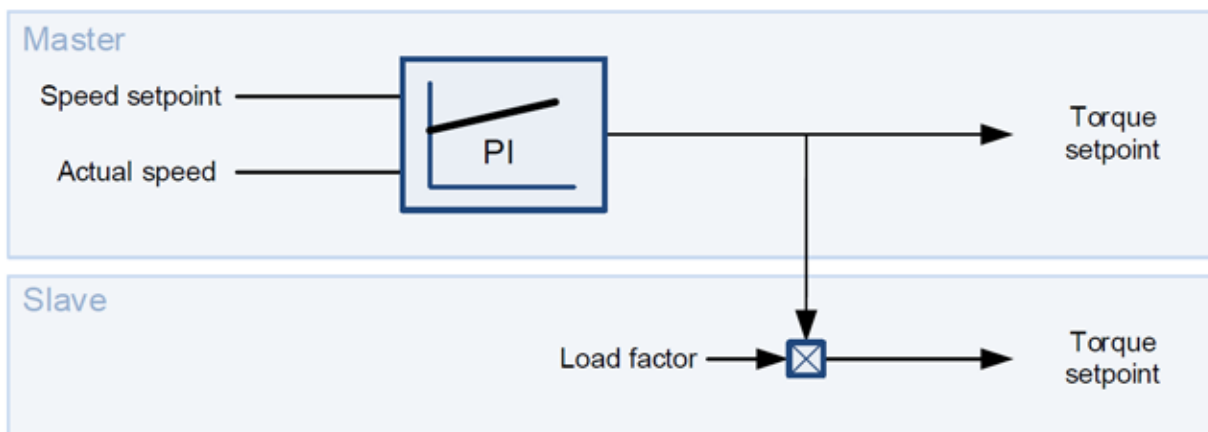


Рис. 9. Структурна схема повторювача моменту з подачею завдання швидкості лише на Master

Ведений привод негайно реагує на зміни крутного моменту головного. Для запобігання аварійних перенавантажень, наприклад, при зміні щільності або втраті механічного з'єднання, необхідно вводити обмеження допустимих швидкостей і моментів для Slave і крутних моментів для Master. Також важливо встановити мінімально можливий час розгону і гальмування веденого приводу, оскільки ці режими мають задаватися лише для Master.

Роботу приводів в режимі повторювача моменту показано на рис. 10. При заданому розподілі навантаження 1:1 між двома приводами середня різниця крутного моменту не перевищує 0,02 Nm, тобто 4 % робочого моменту в процесі розгону (див. синій сигнал «Баланс розподілу навантаження»).

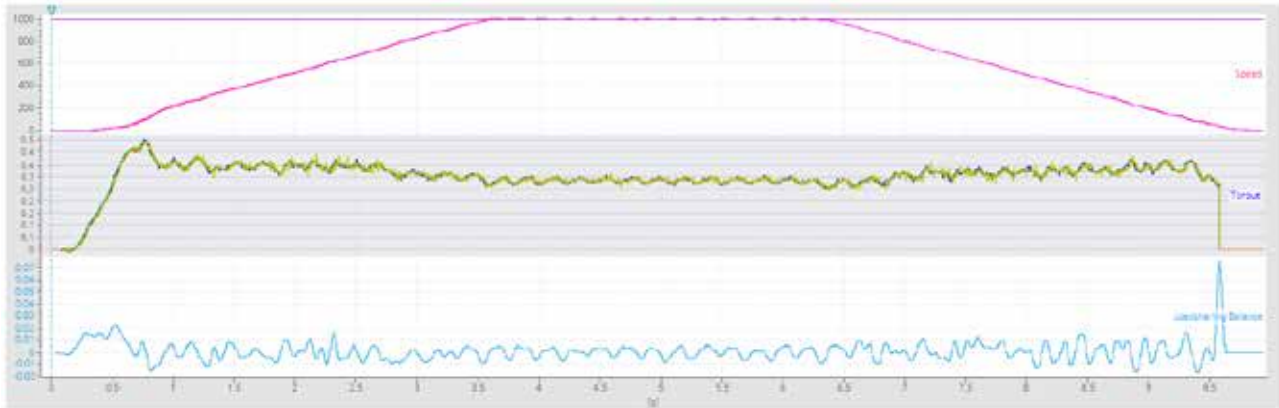


Рис. 10. Робота приводів за топологією Master-Slave в режимі повторювача моменту

Незалежно від моделі VFD перед налаштуванням режимів Torque Control, Master-Slave, Load Sharing необхідно виконати процедуру автотюнінгу кожного VFD до свого двигуна. Цю процедуру треба проводити без будь-яких додаткових елементів (згладжуючих дроселів, ЕМІ фільтрів, тощо) в силовому каналі між VFD і двигуном. Бажано вибрати режим тестування двигуна з вільним валом, без з'єднань з муфтою, шківом чи іншим видом передачі. Крім того, при підключенні необхідно забезпечити довжину силового кабелю від VFD до двигуна не більше 30 м, аби передбачені в VFD режими Sensorless Vector Control працювали коректно.

Перевагою методу повторення моменту є повністю регульований швидкий та точний розподіл навантаження. До досить умовних недоліків можна віднести необхідність з'єднання VFD по інформаційній шині.

Приклади застосування: підйомники; механізми пересування і повороту з двома і більше двигунами; конвеєри, ескалатори, транспортні стрічки; млини і дробарки; механізми намотування і змотування; електричний транспорт; будь-які механізми, де два (або більше) двигуни використовуються для роботи з спільним навантаженням.

Висновки. На основі розглянутих технічних та програмних можливостей сучасних VFD описані різні методи розподілу навантаження між приводами і сформульовані рекомендації щодо вибору методу розподілу і відповідного йому типу VFD для різних технологічних задач. Найбільш універсальним, гнучким, точним і швидким з розглянутих методів є робота приводів за схемою Master-Slave в режимі повторення моменту, коли сигнал завдання швидкості подається лише на Master, а вихід його внутрішнього регулятора швидкості в якості вхідного сигналу для регулятора моменту подається на Slave. Для деяких сучасних VFD [10] така передача можлива не лише шляхом з'єднання відповідним чином налаштованого аналогового виходу Master з аналоговим входом Slave в режимі прийому сигналу на управління моментом, а і безпосередньо через мережеві з'єднання приводів між собою без участі додаткового PLC.

Список використаних джерел

1. Шестака А.І., Мельнікова Л.В., Бойко А.О. Питання модернізації електропривода механізму повороту порталного крана. Науково-технічний та виробничий журнал *Підйомна-транспортна техніка*. 2023. № 1 (68). С. 12–26. <https://doi.org/10.15276/pidtt.1.68.2023>
2. Driving value. Sophisticated ring-gear mill drives from ABB (Part 1). URL: https://library.e.abb.com/public/6caed64aff08d375c1257988005b4066/29-35%201m124_ENG_72dpi.pdf
3. Load Sharing for Multi-Motor Conveyor Systems in Constrained and Hazardous Environments. January 26, 2026 Jason IP P.E. URL: <https://industrialmonitordirect.com/blogs/knowledgebase/load-sharing-for-multi-motor-conveyor-systems-in-constrained-and-hazardous-environments?srsltid=AfmBOooGVt1z9Xsxjdoha4fraWyuv2mQLfhTdI3hazoaAeaxtNoSIj1>.



4. SINAMICS G: Load sharing for two coupled drives Entry-ID: 109774232, V1.2, 12/2022. URL: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/232/109774232/att_1123757/v1/109774232_LoadSharing_DOC_V12_en.pdf.
5. Load Sharing Applications for AC Drives – Rockwell Automation – Publication DRIVES-WR001A-EN-P-June 2010. URL: https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/drives-wp001_en-p.pdf.
6. Schneider Electric – Load Sharing with the Altivar ATV71 Application Guide. URL: <https://www.otomasyononline.com/download/SchneiderElectric/Application%20Note%20Load%20sharing%20torque%20mode.pdf>
7. Danfoss – Load sharing between inverters – 2025. URL: <https://danfosseditron.zendesk.com/hc/en-gb/articles/360051293072-Load-sharing-between-inverters>
8. Inverter Fr-f800 instruction manual (detailed)mitsubishi electric corporation – ib(na)-0600547eng-g (2410) mee. URL: <https://dl.mitsubishielectric.com/dl/fa/document/manual/inv/ib0600547eng/ib0600547eng.pdf>
9. Inverter FR-A800 instruction manual (detailed). Mitsubishi Electric Corporation. IB(NA)-0600503ENG-N (2312) MEE. URL: <https://dl.mitsubishielectric.com/dl/fa/document/manual/inv/ib0600503eng/ib0600503engn.pdf>
10. Schneider Electric – Altivar Process ATV900 Variable Speed Drives for Asynchronous and Synchronous Motors – Programming Manual – NHA80757.13 – 10/2025. URL: https://download.schneider-electric.com/files?p_Doc_Ref=NHA80757&p_enDocType=User+guide&p_File_Name=ATV900_Programming_Manual_EN_NHA80757_13.pdf
11. ABB INDUSTRIAL DRIVES – ACS880 primary control program - Firmware manual – 3AUA0000085967 Rev V – EN – 2020-08-21. URL: https://library.e.abb.com/public/b24019aa640f45bf83a14f04f53691fe/EN_ACS880_Primary_FW_manual_V_A4.pdf?x-
12. Siemens – SINAMICS G120 Control Units CU230P-2 – A5E33838102 – 04/2018. URL: https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/109757195/G120_CU230P-2_List_Manual_0418_en-US.pdf
13. ABB – Technical Note 221 – ACS880 Master Follower Drive to Drive (D2D) – Tips and Hints D2D Setup using ACS880 – LVD-EOTKN221U-EN REV A Effective: 2025-05-28. URL: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=LVD-EOTKN221U-EN&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
14. INVT GD350A VFD Enables Reliable Master-Slave Control of Port Belt Conveyors – 2025-08-07. URL: <https://www.invt.com/solutions/invt-gd350a-vfd-enables-reliable-master-slave-control-of-port-belt-conveyors-346>
15. Master-Slave Drive Applications – Jonathan Bullick – June 18th, 2018. URL: <https://www.kebamerica.com/blog/master-slave-drive-applications/>
16. Heavy duty load sharing application tips for FR-A700 from Mitsubishi UK. URL: <https://blog.999automation.com/2013/09/20/heavy-duty-load-sharing-application-tips-for-fr-a700-from-mitsubishi-uk/>
17. Master-Slave HVVF frequency drives used in conveyor. URL: <https://www.nancalelectric.com/nancal-frequency-drives-in-conveyor.html>

Дата першого надходження статті до видання: 02.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 25.05.2026

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



L. Melnikova¹, A. Shestaka², A. Boiko¹

¹*Odessa Polytechnic National University*

²*National University “Odessa Maritime Academy”*

LOAD SHARING WITH VARIABLE FREQUENCY DRIVES

Summary

Many industrial applications require multiple drives to be mechanically coupled to a common load. This coupling can be rigid, such as a common shaft in electric vehicles, or more flexible, such as a conveyor belt, or indirectly through friction, such as in textile winding machines. Systems with multiple drives and motors include, for example,



crane mechanisms, rolling mills, electric vehicles, mineral grinding mills in metallurgy, machinery used in the textile, paper and printing industries, belt conveyors or continuous production lines. In such applications, multiple drives and motors are coupled to move or control a common load. Therefore, it is necessary for them to ensure that this load is evenly distributed between the drives and motors, since even slight differences in the characteristics of the motors and mechanical transmissions and linkages will lead to an unbalanced distribution of torques between the motors. This may even result in an emergency overload of one of the drives, which will lead to a stop of the mechanism and the technological process. To successfully solve such problems, manufacturers of modern frequency-controlled drives are constantly improving hardware and algorithmic capabilities for uniform load distribution and balance, correct acceleration and deceleration of the mechanism, predictable system response to disturbances and common load changes, as well as to emergency signals. The article considers the technical and software capabilities of modern frequency-controlled drives for solving the problem of torque distribution when several sets of drives and motors are connected and used to control one mechanical load. Several different methods of load distribution between drives are described in detail. Recommendations are given for choosing a specific load distribution option depending on the features of the mechanism, the type of mechanical connection and technological tasks in general. These requirements determine the type of drives that will be used: simple and inexpensive variable frequency drives with only scalar control, or modern drives adapted to a specific segment of technological tasks, with the presence of “Master-Slave” and “Torque Control” modes.

Keywords: load sharing, drive, scalar control, vector control, master-slave mode, torque control mode.

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

УДК 621.313:621.314.1:519.87

П. Є. Михаліченко, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-2680-140X

Є. Ю. Маркова, д-р екон. наук

ORCID: 0000-0001-7818-0644

М. М. Марков, інженер

ORCID: 0009-0001-2859-8425

*Херсонський навчально-науковий інститут**Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*

e-mail: pahamihali4@gmail.com

СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З НЕЛІНІЙНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ

Анотація. У статті розглянуто синтез математичної моделі тягового електроприводу постійного струму з урахуванням нелінійних елементів для дослідження аварійних режимів системи електричної тяги. Обґрунтовано необхідність врахування магнітної нелінійності, вихрових струмів та температурної залежності параметрів при аналізі електромагнітних перехідних процесів. Запропоновано еквівалентну схему заміщення з додатковим короткозамкненим контуром, що моделює дію вихрових струмів.

Проаналізовано умови виникнення генераторного режиму при порушенні балансу між напругою живлення та внутрішньою ЕРС. Встановлено вплив швидкості зміни напруги та параметрів магнітної системи на характер перехідних процесів.

Отримані результати можуть бути використані для підвищення точності моделювання аварійних режимів та вдосконалення систем захисту тягових електроприводів.

Ключові слова: електропривод постійного струму, нелінійність, математична модель, перехідні процеси, аварійний режим, генераторний струм, коротке замикання, магнітна характеристика, еквівалентна схема заміщення, електромагнітні процеси.

Постановка проблеми. Тяговий електропривід постійного струму є складною електромеханічною системою, тісно пов'язаною з тяговою мережею, що зумовлює взаємний вплив електромагнітних процесів у системі «електропривід – електропостачання». У нормальних режимах ці процеси мають усталений характер, однак в аварійних ситуаціях, зокрема при коротких замиканнях та різких змінах напруги, виникають інтенсивні перехідні процеси, що супроводжуються значними струмами та електродинамічними навантаженнями.

Існуючі підходи до аналізу таких режимів переважно базуються на спрощених математичних моделях, які не враховують у повному обсязі нелінійні властивості магнітної системи тягових електродвигунів, вплив вихрових струмів та температурну залежність параметрів. Це призводить до недостатньої точності розрахунків і обмежує можливість адекватного прогнозування аварійних процесів.

Особливу складність становить дослідження генераторних режимів, що можуть виникати внаслідок порушення балансу між напругою живлення та внутрішньою електрорушійною силою двигунів у перехідних умовах. Такі режими є потенційно небезпечними, оскільки електропривід може виступати джерелом додаткової енергії в зоні пошкодження.

Таким чином, актуальною науково-технічною проблемою є розробка уточнених математичних моделей тягового електроприводу постійного струму, які дозволяють комплексно враховувати нелінійні фактори та забезпечують підвищення точності аналізу електромагнітних перехідних процесів в аварійних режимах.



Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання математичного моделювання тягового електроприводу та електромагнітних перехідних процесів у системах електричної тяги розглядалися у низці наукових праць. У роботі [1] наведено загальні підходи до математичного моделювання динаміки електровозів, однак електрорухомий склад здебільшого подано у спрощеному вигляді, що не дозволяє повною мірою врахувати складні аварійні електромагнітні процеси в тяговій мережі постійного струму.

Значний внесок у дослідження аварійних режимів силових кіл електровозів ДЕ1 зроблено у праці [2], де розглянуто перехідні електромагнітні процеси та запропоновано підходи до підвищення ефективності роботи систем захисту. Особливу увагу приділено врахуванню нелінійних властивостей тягових електродвигунів, впливу вихрових струмів і параметрів магнітної системи. Саме ці положення є важливою теоретичною основою для подальшого синтезу уточнених математичних моделей тягового електроприводу.

Технічні характеристики тягових електродвигунів постійного струму типів ЕД141У1 та ЕД141АУ1 наведено у нормативно-технічній документації [3], а результати їх кваліфікаційних випробувань подано у протоколі [4]. Ці джерела є базовими для визначення паспортних параметрів двигунів, необхідних під час побудови схем заміщення та розрахунку аварійних режимів. Особливості силового кола електровоза ДЕ1, схеми з'єднання тягових двигунів і режими експлуатації наведено в керівництві з експлуатації [5].

Теоретичні основи роботи тягових електричних машин, зокрема процеси електромеханічного перетворення енергії, формування електромагнітного моменту та вплив магнітного насичення, розглянуто у класичній праці [6]. Проте в цій роботі недостатньо деталізовано питання аварійних генераторних режимів, які виникають у системі електричної тяги під час коротких замикань та різких спадів напруги.

У працях [7, 8] досліджено явище виникнення генераторних струмів електрорухомого складу в аварійних режимах тягової мережі. Показано, що такі струми можуть виникати не лише під час рекуперативного гальмування, а й у режимах короткого замикання та стрибкоподібного зниження напруги на струмоприймачі. У роботі [8] зазначено, що генераторні струми в аварійних режимах є небезпечними, оскільки тягові двигуни можуть підживлювати місце короткого замикання, збільшуючи енергію аварійного процесу.

Методики розрахунку струмів короткого замикання у тягових електроприводах розглянуто також у праці [9], де основну увагу приділено трифазним асинхронним тяговим двигунам у системах частотно-регульованого електропривода. Незважаючи на відмінність типу електропривода, дана робота є важливою з погляду розвитку аналітичних підходів до розрахунку аварійних струмів у тягових системах.

У роботі [10] досліджено вплив режиму короткого замикання в тяговій мережі постійного струму на перехідні електромагнітні процеси в електрорухомому складі. Встановлено, що характер зміни напруги живлення, параметри тягової мережі, схема живлення фідерної зони та електромагнітний стан тягових двигунів істотно впливають на умови виникнення генераторних струмів.

Отже, аналіз наукових джерел свідчить, що наявні дослідження створюють достатню теоретичну базу для вивчення аварійних режимів тягового електроприводу постійного струму. Водночас питання синтезу математичної моделі з урахуванням нелінійних характеристик тягового двигуна, вихрових струмів, температурної залежності параметрів обмоток і різних схем з'єднання тягових двигунів потребує подальшого розвитку. Саме це визначає актуальність подальшого дослідження та необхідність побудови уточненої математичної моделі тягового електроприводу постійного струму для аналізу аварійних режимів.

Формування мети статті (постановка завдання). Метою даної роботи є розробка та синтез узагальненої математичної моделі тягового електроприводу постійного струму з урахуванням

нелінійних характеристик тягового електродвигуна, впливу вихрових струмів, температурної залежності параметрів обмоток і різних схем з'єднання тягових двигунів для дослідження електромагнітних перехідних процесів в аварійних режимах роботи системи електричної тяги.

Досягнення поставленої мети передбачає визначення умов виникнення генераторних режимів, аналіз впливу параметрів тягової мережі та електроприводу на характер і амплітуду перехідних процесів, а також підвищення точності їх моделювання з метою удосконалення методів розрахунку аварійних режимів і підвищення ефективності систем захисту силових кіл електрорухомого складу.

Основна частина. Синтез схеми заміщення електрорухомого складу та значення параметрів їх елементів.

Більшість науковців в своїх математичних моделях представляли електропривод електрорухомого складу, що рухається по фідерній зоні, у вигляді ідеального джерела струму. Моделювання було виконано в аналітичній формі, проте отримані часові залежності перехідних електричних величин не відображали в повній мірі процеси в системі електричної тяги постійного струму. Тому для описання процесів, які відбуваються в ЕРС автором за основу було обрано схему заміщення групи ТЕД (рис. 1), розглядувану в роботі [2].

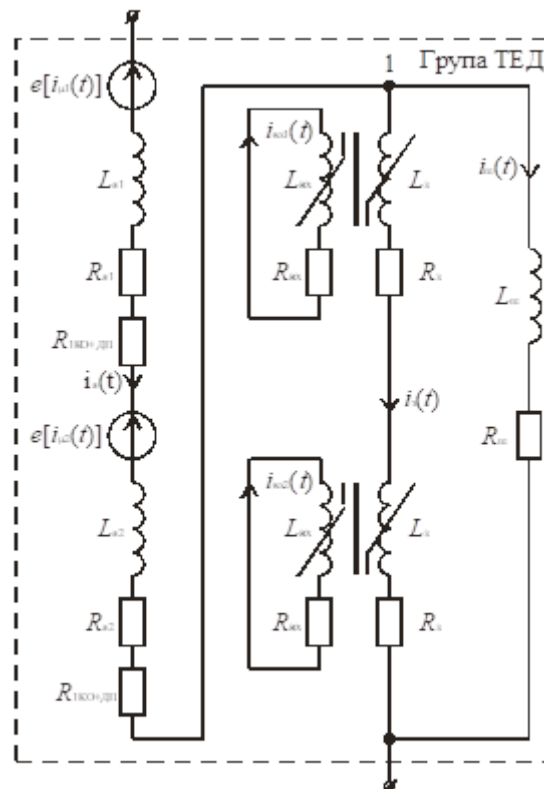


Рис. 1. Схема заміщення групи тягових електричних двигунів.

Схема заміщення на рис. 1 включає наступні елементи: $R_{я}$ – активний опір обмотки якоря; $L_{я}$ – індуктивність обмотки якоря (прийнята лінійною); $R_{ко+дп}$ – активний опір компенсаційної обмотки та додаткових полюсів; $R_{з}$ – активний опір обмотки збудження (ОЗ); $L_{з}$ – індуктивність ОЗ (при $I = I_{ном}$); $R_{ш}$ – активний опір індуктивного шунта (визначається ступенем послаблення збудження (ПЗ)); $L_{ш}$ – індуктивність індуктивного шунта.

Для дослідження електромагнітних процесів в даній роботі автором було обрано існуючий електрорухомий склад з подібними за конструктивним виконанням: восьмивісні з двигунами

постійного струму послідовного збудження. Вибір саме цього рухомого складу було обумовлено найбільш широким його використанням на залізницях постійного струму України для вантажних перевезень.

Значення основних характеристик електровозів постійного струму Українського виробництва ДЕ1, а також вищезазначених параметрів тягових електродвигунів здійснювалося за наступними літературними джерелами [3–5].

Суттєвий демпферуючий вплив на електромагнітні процеси в ТЕД чинять вихрові струми, викликані зміною магнітного потоку, яка відбувається в нестационарних режимах. Згідно роботи [6], величина цих струмів пропорційна абсолютному значенню, а також швидкості зміни основного потоку $i_{\text{вхр}} \sim \Phi \cdot \frac{d\Phi}{dt}$. У режимі послаблення збудження на характер зміни $\Phi(t)$ впливає і струм $i_{\text{ш}}(t)$ у вітті шунтування електричного двигуна. Існують різні підходи по врахуванню вихрових струмів, їх докладний аналіз приведено в роботі [2].

Найбільш точним і одночасно простим шляхом врахування вихрових струмів при розрахунках електромагнітних перехідних процесів є метод еквівалентної заміни дії всіх гармонік вихрових струмів одним короткозамкненим контуром, що магнітно зв'язаний з обмоткою збудження електричного двигуна через магнітопровід. Еквівалентний опір короткозамкненого контуру вихрових струмів має різний характер при зміні магнітного поля $\Phi(t)$ двигуна у напрямку зростання і зменшення. Активний опір контуру вихрових струмів у період загасання і зростання магнітного потоку $R_{\text{вхр}}^{\text{зг}}$, $R_{\text{вхр}}^{\text{зр}}$, визначається за виразами 1, 2 [2]:

$$R_{\text{вхр}}^{\text{зг}} = \frac{14,68 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{1 - e^{\left(\frac{1,5t}{0,1254}\right)}}}, \quad (1)$$

$$R_{\text{вхр}}^{\text{зр}} = \frac{8,29 \cdot 10^{-3}}{1 - e^{\left(\frac{t}{0,0118}\right)}}. \quad (2)$$

Таким чином, еквівалентну схему заміщення електричного двигуна можна зобразити у вигляді рис. 2 [2], де Φ і $\Phi_{\text{вхр}}$ – основний магнітний потік і магнітний потік, створений вихровими струмами; w_3 – кількість витків обмотки збудження; $w_{\text{вхр}}$ – кількість витків короткозамкненого контуру, еквівалентного вихровим струмам; $\Phi_{\text{сз}}$ і $\Phi_{\text{сзвхр}}$ – магнітні потоки розсіяння відповідно обмотки збудження і короткозамкненого контуру.

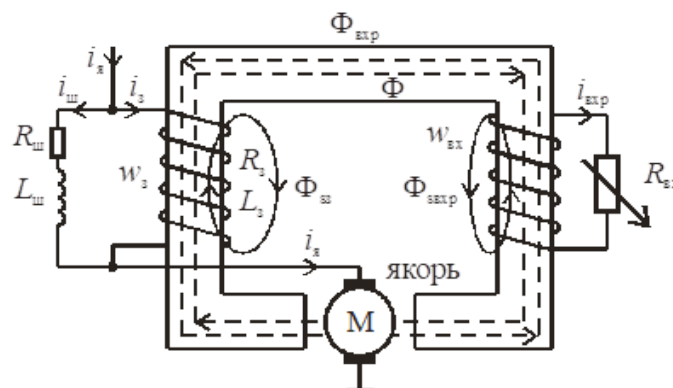


Рис. 2. Схема заміщення тягового електродвигуна [2]

Для дослідження перехідних електромагнітних процесів в системі електричної тяги активні опори обмоток електричних двигунів були перераховані з врахуванням нагріву. Температура

нагрітої («гарячої») обмотки (робоча температура тягового електродвигуна), приймається рівною $+115^{\circ}\text{C}$.

Залежність проти – е.р.с. $e(i_3)$ якоря електричного двигуна, як відомо, є величиною пропорційною основному магнітному потоку:

$$e(t) = e(i_3(t)) = C_w \cdot \omega \cdot \Phi(i_3(t)), \quad (3)$$

де $\Phi(i_3(t))$ – основна крива намагнічення магнітопровода електричного двигуна, що апроксимована поліномом шостого порядку:

$$\Phi(i_3) = a + b \cdot i_3 + c \cdot i_3^2 + d \cdot i_3^3 + e \cdot i_3^4 + f \cdot i_3^5 + k \cdot i_3^6. \quad (4)$$

Величину швидкості руху електровозу, а відповідно і кутова частота ω обертання валу тягового електродвигуна, в залежності від струму якоря визначали за швидкісними характеристиками. Силова схема електровозу визначається режимом його ведення, тобто, саме позицією головного контролера. Як відомо, може бути послідовне з'єднання тягових двигунів в електроприводі – «С»-з'єднання, послідовно-паралельне – «СП»-з'єднання; паралельне – «П»-з'єднання (рис. 3).

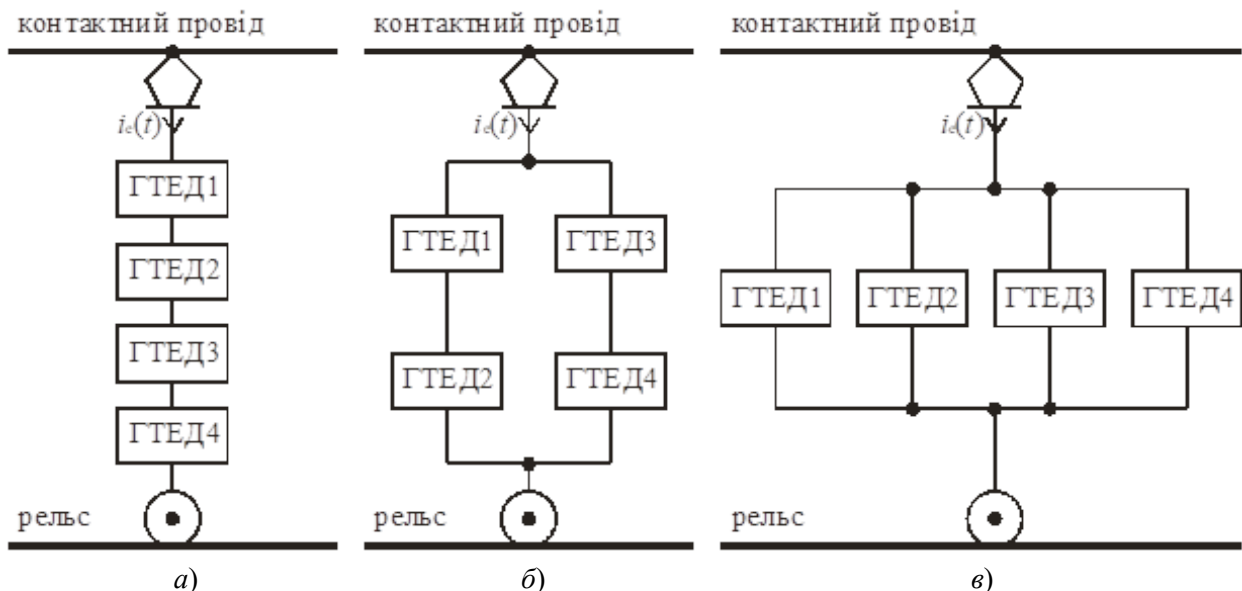


Рис. 3. Схеми з'єднання силового кола ЕРС: а) «С»-з'єднання; б) «СП»-з'єднання; в) «П»-з'єднання; ГТЕД – група тягових двигунів

У подальшому виконання поставленої задачі, тобто, розрахунки і аналіз перехідних електромагнітних процесів в розглянутих режимах методом математичного моделювання, передбачає розробку і складання математичних моделей процесів, що протікають в системі електричної тяги; при цьому прийняті такі припущення: температура повітря навколишнього середовища складає $+20^{\circ}\text{C}$; розглянуті вище параметри усіх тягових електричних двигунів, механічна складова тягового електроприводу мають однакові значення і відповідають паспортним даним; швидкість руху електроприводу постійного струму в період перехідного процесу залишається незмінною, і в $\approx 10^3$ разів менше швидкості протікання електромагнітних перехідних процесів; рух потягу здійснюється на прямолінійній ($R_{кр} = \infty$) горизонтальній ділянці з $i = 0 \text{ ‰}$; перехідний процес в паралельно увімкнених ТЕД протікають синхронно; ємність елементів силового кола не враховується.

*Теоретичні передпосилки і причини виникнення генераторних струмів.*

Генераторні струми в електроприводу постійного струму, а отже і в усій системі електро тяги, можуть створюватись не лише спеціальним нормальним режимом рекуперативного гальмування, але й в аварійних режимах, які виникають в тяговій мережі, а саме [7]: при КЗ і різких експлуатаційних технологічних коливаннях напруги живлення U_e на струмоприймачі, точніше при стрибкоподібних поштовхах-спадах ΔU_e цієї напруги. Обидва зазначені режими (і КЗ, і поштовхи-спади) найбільш часті в існуючій системі електричної тяги постійного струму складні за протіканням і тому малодосліджені.

На відміну від користі генераторних струмів рекуперативного гальмування генераторні струми аварійних режимів є не лише некорисними, а навіть небезпечними. Тягові двигуни в генераторному режимі являють собою джерело електроенергії (джерело струму), що підживлює місце короткого замикання й тим самим робить його більш енергонебезпечним.

У порівнянні з тяговими струмами генераторні струми, що виникають в елементах системи, є більш рідкісним явищем. Насамперед, вони створюються спеціальним режимом рекуперативного гальмування, але ми в цій серії статей їх не розглядаємо, далі мова буде йти про аварійні генераторні режими.

Вплив аварійних генераторних струмів на тягову мережу найбільш повно приведена в роботі [8] автора.

Для аналізу механізму виникнення генераторних струмів розглянемо, наприклад, електричну схему заміщення однієї групи тягових двигунів (рис. 1). Для неї у режимі повного збудження справедливим є рівняння [9]:

$$2(R_{\text{я}} + R_3) \cdot i_{\text{я}}(t) + 2L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + 2 \cdot 2p \cdot \sigma_3 \cdot w_3 \frac{d\Phi}{dt} + 2 \cdot e(t) = u_e(t), \quad (5)$$

де $u_e(t)$ – напруга живлення на струмоприймачі (при «П»-з'єднанні силового кола);

$$2p \cdot \sigma_3 \cdot w_3 \frac{d\Phi}{dt} \text{ – е.р.с. самоіндукції обмотки збудження.}$$

Позначимо другий, третій та четвертий доданки в лівій частині рівняння (2) як $e_r(t)$ і назвемо результуючою генераторною е.р.с., тоді струм електровоза $i_e(t)$ можна записати як:

$$i_e(t) = \frac{u_e(t) - e_r(t)}{2(R_{\text{я}} + R_3)}. \quad (6)$$

Під час певних перехідних режимів напруга на струмоприймачі електровоза $u_e(t)$ та його струм $i_e(t)$ змінюються в часі, що призводить до порушення рівноваги роботи й тим самим переходу електричного двигуна у режимі генерації:

$$e_r(t) = 0,5u_e(t) + (R_{\text{я}} + R_3) \cdot i_r(t) + L_{\text{я}} \frac{di_e}{dt} + 2p \cdot \sigma_3 \cdot w_3 \frac{d\Phi}{dt} + 2 \cdot e(t). \quad (7)$$

Із (3) випливає, що струм в електровозі, змінить знак на від'ємний, тобто стане генераторним, у випадку, коли генераторна е.р.с. $e_r(t)$ перевищить напругу на струмоприймачі електровоза, тобто при умові:

$$u_e(t) < e_r(t). \quad (8)$$

Отже, якщо в нормальному тяговому режимі $u_e(t) > e_r(t)$, то щоб виконалась умова (4), й тим самим здійснився генераторний режим потрібно різке зменшення за якихось причин напруги $u_e(t)$ або збільшення $e_r(t)$ [10]. Тобто напруга $u_e(t)$ повинна знижуватися швидше, ніж $\Phi(t)$ і, отже, $e_r(t)$. Проаналізуємо ці можливі причини.

Напруга на струмоприймачі $u_e(t)$ може зменшитись за таких причин. Перша – в результаті звичайних експлуатаційних технологічних коливань. Як показують статистичні дослідження, такі коливання спостерігаються в межах 2230...3990 В. Загалом ці коливання відбуваються з невеликою частотою, десь до 1 Гц. Однак під час цих коливань можливі і стрибкоподібні (поштовхом) зміни напруги $u_e(t)$. Наприклад, з імовірністю 0,8 спостерігаються поштовхиспади напруги ΔU_e від 209 до 861 В в. Певно, при таких різких спадах напруги в тяговій мережі електричний двигун тягового електроприводу переходить в генераторний режим.

Напруга на струмоприймачі $u_e(t)$ може зменшитись, причому різко, у режимі короткого замикання, що впливає із такого простого рівняння:

$$U_e = E_{\text{тп}} - i_k \cdot R_{\text{тм}} = E_{\text{тп}} - i_k \cdot R_{\text{отм}} \cdot l_{\text{ек}}, \quad (9)$$

де $E_{\text{тп}}$ – е.р.с. тягової підстанції;

i_k – струм короткого замикання;

$R_{\text{отм}}$ – питомий опір кола живлення електроприводу (Ом/км);

$l_{\text{ек}}$ – відстань, на якій знаходиться електровоз від місця КЗ.

Із (5) випливає, що зі збільшенням $l_{\text{ек}}$ збільшується спад напруги в проводах мережі, зокрема на ділянках «ек» (рис. 4), й тим самим зменшується U_e . Тобто, U_e в режимі короткого замикання залежить від місця розташування електровозу і схеми живлення тягової мережі. І зрозуміло, що «необхідне» для генераторного режиму U_e буде лише у випадку достатньої величини спаду напруги в мережі, тобто, достатньому значенні спаду напруги $i_k \cdot R_{\text{отм}} \cdot l_{\text{ек}}$.

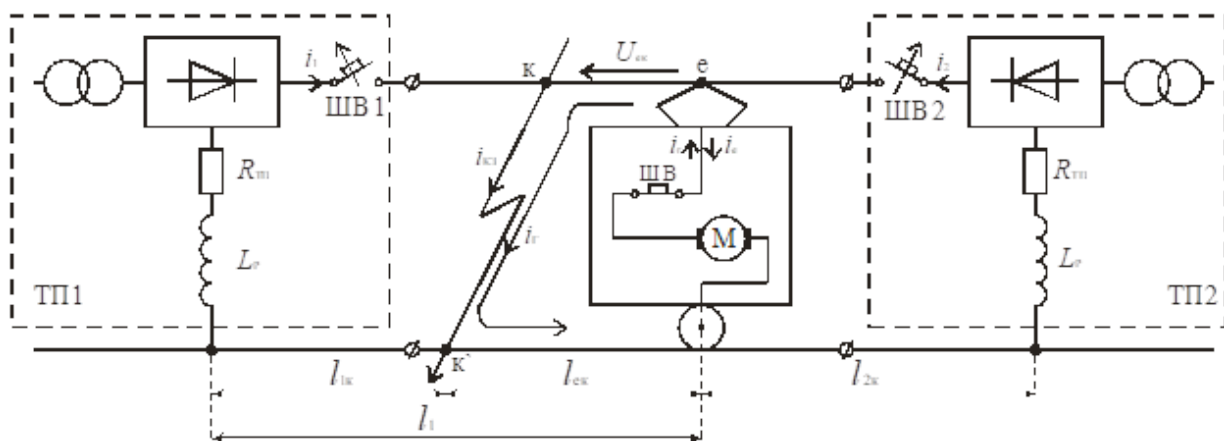


Рис. 4. Схема системи електричної тяги в режимі короткого замикання на фідерній зоні

Другим фактором цієї умови є значення і характер зміни (збільшення) $e_r(t)$.

Коротке замикання в тяговій мережі при консольній схемі живлення

Коротке замикання за електрорухомим складом (ЕРС). До КЗ в точках 3-3' (див рис. 5) струм електровоза i_d у тяговому режимі дорівнює фідерному струму i_ϕ і нехай поїзд рухається з певною швидкістю.

Нехай КЗ відбулося на відстані $l_{\text{ек}}$ за ЕРС (в т. 3-3', рис. 5). Тоді, внаслідок шунтування ЕРС віткою КЗ й тим самим зростання струму $i_{\text{кз}}$ і згідно закону Кірхгофа, що $i_\phi = i_d + i_{\text{кз}}$, струм i_d ЕРС повільно зменшується, а фідерний струм i_ϕ зростає (рис. 6). Але в цьому випадку поки що будемо вважати, що i_ϕ не досягає своєї уставки і тому швидкодіючий вимикач (ШВ) підстанції (ТП) не спрацьовує. В результаті напруга $u_e(t)$ зменшується і з часом перехідного процесу (ППр) стає рівним U_{23} (рис. 5):

$$U_{23} = R_{23} \cdot i_{кз} + L_{23} \frac{di_{кз}}{dt}. \quad (10)$$

Одночасно, зі зменшенням i_d зменшується потік $\Phi(t)$, але повільніше, ніж $u_e(t)$ (внаслідок демферуючої дії вихрових струмів, а в режимі ПЗ ще й демферуючої дії струму у вітці шунта). І тоді, також повільно, зменшується проти-е.р.с., а отже і $e_r(t)$.

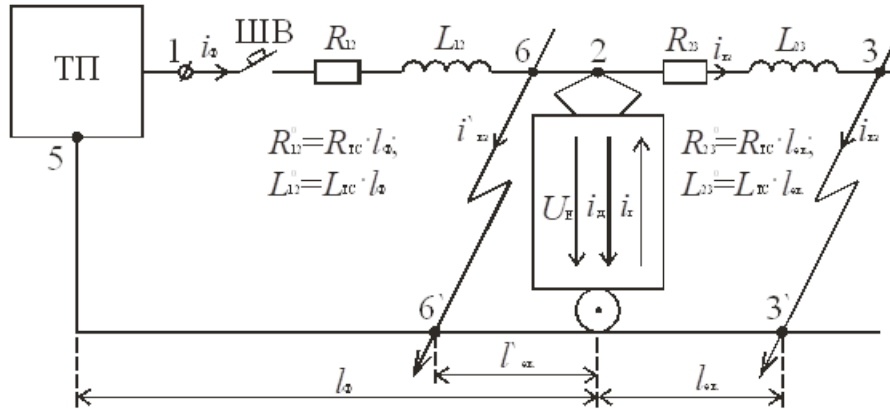


Рис. 5. Схема системи електричної тяги з консольним живленням фідерної зони в режимі КЗ

Далі можливі такі випадки:

а) відстань l_ϕ (рис. 5) достатньо велика, щоб U_e , яка дорівнює $U_{23} = R_{23} \cdot i_{кз} + L_{23} \frac{di_{кз}}{dt}$ або $U_{12} = E_{тн} - R_{12} \cdot i_\phi - L_{12} \frac{di_\phi}{dt}$, була більша, ніж $e_r(t)$ і тому генераторний режим не спостерігається (рис. 6);

б) при достатньо малій l_ϕ величина U_{23} теж мала, а отже невелика напруга U_e на струмоприймачі, яку $e_r(t)$ може перевищувати, створюючи генераторний струм.

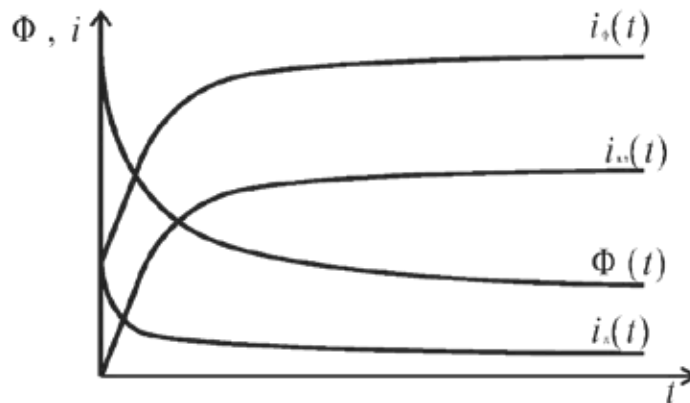


Рис. 6. Перехідні струми і магнітний потік в режимі КЗ (якісний спрощений загальний вигляд)

2. КЗ перед ЕРС. У режимі КЗ в точках 6-6' (рис. 5), тобто перед ЕРС у випадку, коли $i'_{ек} = 0$, напруга $u_e(t)$ і струм i_d спадають різко, а $\Phi(t)$ і $e_r(t)$ (за попередніх причин) – повільно і тому в ЕРС виникає генераторний струм $i_r(t)$ (рис. 5), але в ТМ він не приходить, замикаючись через закоротку 6-6'.

При достатньому віддаленні точки КЗ 6-6' від ЕРС фідерний струм $i_\phi(t)$ і вони будуть збільшуватись (рис. 7). Одночасно повільно знижуються напруга $u_e(t)$ на ЕРС і його струм $i_e(t)$.

Своїї уставки досягає $i_{\phi}(t)$ і ШВ ТП вимикається в результаті відбувається повне зняття живлячої напруги від ТП і різко знижується $u_e(t)$. Також різко зменшується фідерний струм i_{ϕ} і струм ЕРС (рис. 7). Істотно зменшується струм збудження ТЕД і їх основний магнітний потік. Але він, як і $i_r(t)$, зменшується повільніше, ніж $u_e(t)$, тому виконується умова (4) для появи генераторного струму $i_r(t)$, який протікає і по ТМ, і по ЕРС. Далі $i_r(t)$ досягши свого максимального значення, як і $i_{кз}(t)$, повільно зменшується до нуля, підтримуючи спадання $\Phi(t)$ і $i_r(t)$ [11].

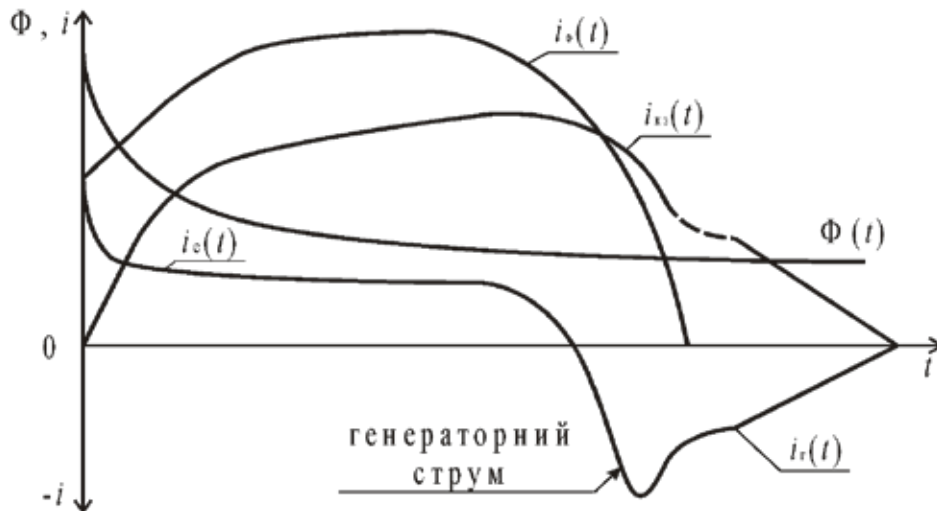


Рис. 7. Перехідні струми і магнітний потік в режимі КЗ (якісний вигляд)

Коротке замикання в тяговій мережі при двосторонній схемі живлення

Двостороннє живлення є більш цікавим з точки зору переходу ЕРС у режим короткочасної генерації, бо перехідні процеси в контактній мережі при КЗ, як правило, починаються і протікають більш складніше, ніж при односторонньому живленні. При цьому, найбільш важким є режим КЗ біля однієї із ТП. Тому у подальшому аналізуватимемо режим КЗ біля ТП2 (див. рис. 8).

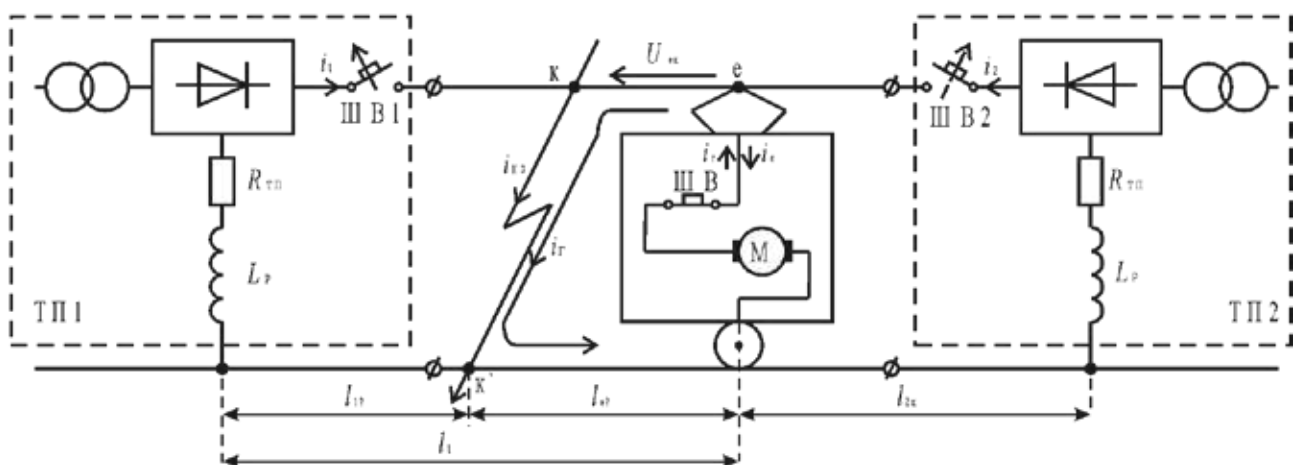


Рис. 8. Схема системи електричної тяги в режимі КЗ на фідерній зоні

Факт переходу ЕРС в генераторний режим і характер протікання $i_r(t)$ залежить від відношення спаду напруги $U_{ек}$ в ТМ (рис. 8) і генераторних е.р.с. $e_r(t)$ тягових двигунів. А напруга $U_{ек}$, в свою чергу, залежить від $l_{ек}$, тобто від місця розташування ЕРС на тяговій мережі.

Якщо $l_{ек}$ відносно невелике, тобто ЕРС розташовано поблизу ТП2, тоді струм КЗ $i_{кз}$ і струм i_2 ТП2 різко зростають. Струм i_2 досягає своєї уставки і ШВ ТП2 вимикається, а струм $i_{кз}$, після різкого зростання, зменшується до нового усталеного значення (див. рис. 9).

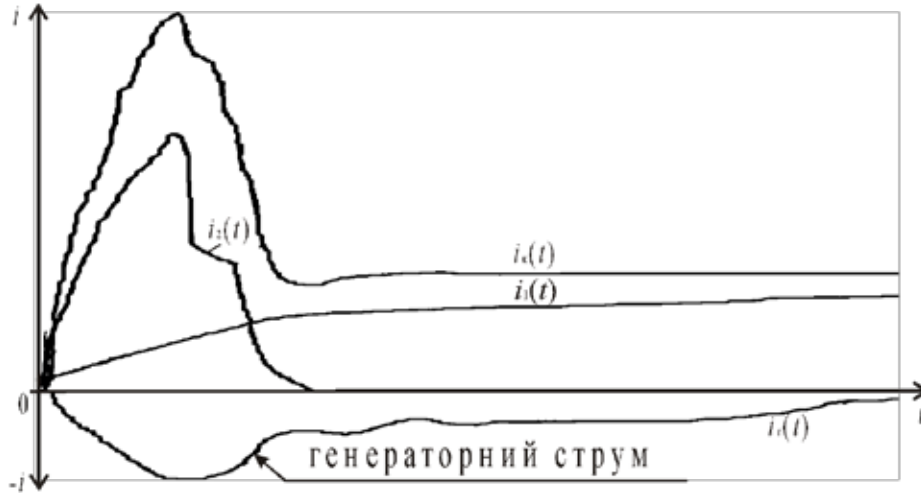


Рис. 9. Перехідні струми в режимі КЗ (якісний вигляд)

Одночасно, струм i_1 (від ТП1) повільно зростає теж до нового усталеного значення. Напряга $u_c(t)$ різко спадає, стає рівною спаду $U_{ек}$, а воно мале, бо $l_{ек}$ невелике. В той же час магнітний потік $\Phi(t)$ і струм $i_r(t)$ спадають повільно, виконується умова (4), в результаті виникає генераторний струм $i_r(t)$, який замикається через «закоротку». Після певного кидка $i_r(t)$ повільно зменшується до нуля по мірі загасання $\Phi(t)$.

Зі збільшенням $l_{ек}$ (при русі поїзда) величина $U_{ек}$ зростає (але будемо вважати, що ШВ ТП1 ще не спрацьовує) і тому з часом загасання $\Phi(t)$ струм ЕРС переходить із генераторного у двигунний (рис. 10) й останній, після невеликого зростання, досягає свого усталеного значення.

Якщо ж $l_{ек}$ збільшується далі (за рахунок руху поїзда), тобто ЕРС знаходиться ще ближче до ТП1, тоді струм i_1 ТП1 різко зростає, досягає своєї уставки, в результаті ШВ ТП1 вимикається і струм i_1 спадає до нуля (рис. 11). Тим самим вимикається повністю живляча напруга для ЕРС (бо ШВ ТП2 вимкнувся ще раніше).



Рис. 10. Перехідні струми в режимі КЗ (якісний вигляд)

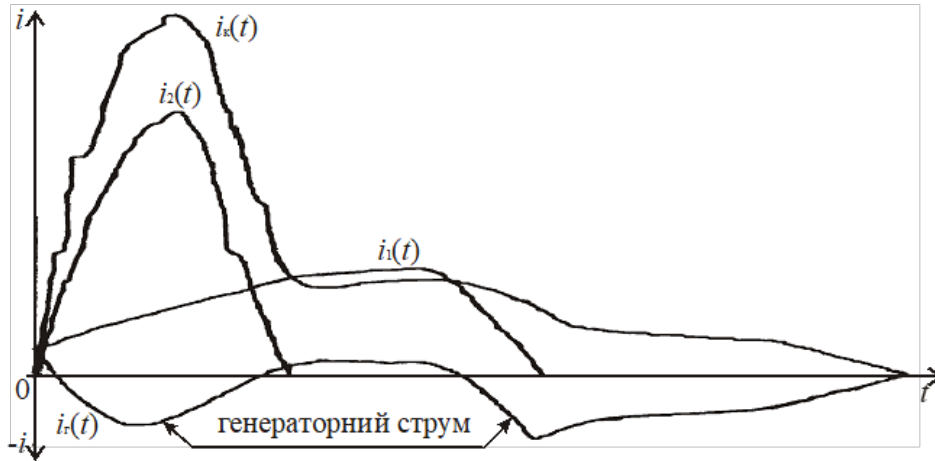


Рис. 11. Перехідні струми в режимі КЗ при паралельному з'єднанні тягових електродвигунів (якісний вигляд)

Спад напруги $U_{ек}$, а отже і $u_e(t)$, різко зменшується до нуля, а $\Phi(t)$ і $e_r(t)$ зменшуються повільно і ЕРС після тягового режиму (рис. 10), незалежно від розташування, переходить у режим повторної генерації (рис. 11), який триває доти, поки генераторний струм не розмагнітить магнітну систему тягових двигунів і $\Phi(t)$ не зменшиться до нуля.

Заслуговує уваги також режим КЗ між ТП1 і ЕРС. Нехай $l_{1к} < l_1$, тобто ЕРС розташований на невеликій відстані від ТП1 та виникло КЗ в точці к-к' (рис. 4).

В результаті фідерний струм i_1 ТП1 різко, майже лінійно, зростає та швидко досягає своєї уставки, тим самим обумовлюючи вимкнення ШВ1. Внаслідок цього виникає перехідний процес перерозподілу навантаження (струму) вимкненого фідера ТП1 на фідер ТП2, струм якого i_2 , хоча і повільніше ніж i_1 , але зростає з моменту КЗ. Якщо в результаті такого перерозподілу буде досягнуто значення струму уставки фідера ТП2, то відбудеться вимкнення ШВ2. Практика показує, що, як правило, це виникає коли фідерна зона в розглядуваному режимі вимикається з двох боків. В результаті (за тими ж міркуваннями та причинами, що і раніше) ЕРС переходить в генераторний режим. Якщо струм КЗ, а значить і фідерний i_2 , недостатній для вимкнення ШВ2 та він не вимкнеться, тоді струм ЕРС знову стає двигунним, зростає до величини, яка визначається напругою на струмоприймачі.

Висновки. В даній статті було представлено синтез схеми заміщення та створення математичної моделі тягового електроприводу постійного струму з нелінійним елементом – тягий електрочний двигун. Запропоновані схемні реалізації та основні теоретичні викладки режимів короткого замикання.

Як зазначалось, найбільш розповсюдженим і небезпечним аварійним режимом у системі електротяги є режим короткого замикання в тяговій мережі, тому далі у подальших статтях, методом математичного чисельного моделювання дослідимо закономірності виникнення і проаналізуємо результати численних розрахунків генераторних струмів у режимах короткого замикання.

Список використаних джерел

1. Математическое моделирование динамики электровозов / под ред. А. Г. Никитенко. Москва : Высшая школа, 1998. 274 с.
2. Міщенко Т. М. Підвищення ефективності роботи системи захисту силових кіл електровозів ДЕ1 на основі досліджень перехідних аварійних електромагнітних процесів : дис. канд. техн. наук. Дніпро : ДНУЗТ, 2007. 219 с.



3. Электродвигатели постоянного тока тяговые ЭД 141У1, ЭД 141АУ1. Технические условия БИЛТ 652341.002 ТУ. Харьков : ДП завод «Електротяжмаш», 1994. 12 с.
4. Протокол испытаний. Квалификационные испытания тягового электродвигателя типа ЭД 141У1 для магистрального электровоза. Харьков : НИИ «Електротяжмаш», 1996. 89 с.
5. Электровоз магистральный ДЭ1. Руководство по эксплуатации ЗТП.000.020 РЭ1. Дніпро : УкрЕлНДІ, 2002. Ч. 1. 321 с.
6. Иоффе А. Б. Тяговые электрические машины. Москва : Энергия, 1965. 232 с.
7. Михаліченко П. Є. Генераторні струми електрорухомого складу в аварійних режимах тягової мережі. Проблеми розвитку залізничного транспорту : тези доп. 72-ї Міжнар. наук.-практ. конф. Дніпро, 2012. С. 96–97.
8. Михаліченко П. Є. Генераторні струми під час коротких замикань в пристроях системи електричної тяги. Електротехніка і електромеханіка. 2012. № 6. С. 56–60.
9. Хворост М. В., Чумак В. А., Панасенко Н. М. Аналітична методика розрахунку струмів короткого замикання трифазних тягових асинхронних двигунів у системі частотно-регульованого електропривода з інверторами напруги. Праці ІЕД НАН України. 2004. № 3(9). С. 70–78.
10. Михаліченко П. Є., Міщенко Т. М., Костін М. О. Вплив режиму короткого замикання в тяговій мережі постійного струму на перехідні електромагнітні процеси в електрорухомому складі. Електротехніка і електромеханіка. 2010. № 4. С. 63–66.

Дата першого надходження статті до видання: 20.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 25.05.2026

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



P. Mykhalichenko, Ie. Markova, M. Markov

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

Kherson Educational-Scientific Institute

SYNTHESIS OF A MATHEMATICAL MODEL OF A DIRECT CURRENT TRACTION DRIVE WITH NONLINEAR ELEMENTS FOR THE STUDY OF EMERGENCY MODES

Summary

The paper addresses the synthesis of a mathematical model of a DC traction electric drive with nonlinear elements for the investigation of emergency operating modes in electric traction systems. The necessity of considering magnetic nonlinearity, eddy current effects, temperature dependence of winding parameters, and nonlinear magnetization characteristics in the analysis of electromagnetic transient processes is substantiated. An equivalent circuit of the traction motor is proposed, including a short-circuited loop representing eddy current effects, and the parameters of the traction power circuit are synthesized for different motor connection schemes.

The mechanisms of generator current occurrence under short-circuit conditions and sudden voltage fluctuations in the traction network are analyzed. The conditions under which the electric drive switches to a generator mode due to imbalance between supply voltage and the resultant generated EMF are determined. It is shown that the rate of supply voltage change and magnetic system parameters significantly influence the nature and amplitude of transient processes.

The obtained results can be applied to improve the accuracy of mathematical modeling of emergency modes, enhance protection systems of traction power circuits, and increase the operational reliability and energy safety of DC traction networks.

Keywords: DC electric drive, traction motor, nonlinearity, mathematical model, transient processes, emergency mode, generator current, short circuit, magnetization characteristic, eddy currents, equivalent circuit, electromagnetic processes, stability.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-2-3>

UDC 621.313:62-83

A. V. Nadtochiy, Ph.D., Associate Professor

ORCID: 0000-0003-1905-0895

V. A. Nadtochii, Ph.D., Associate Professor

ORCID: 0000-0003-3869-3546

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding Kherson Educational-Scientific Institute*e-mail: tasman.leh.85@gmail.com

THEORETICAL BASIS OF ELECTRIC DRIVES WITH INHERENT NONLINEARITIES

Summary. In articles, the theoretical justification of electric drives is presented, whose essential influence on dynamic and static characteristics stems from inherent nonlinearities of electromagnetic, mechanical, and control nature. It has been shown that a real electric drive is not expedient to be considered as a set of linear links from small deviations parameters, but as a complex nonlinear electromechanical system, whose is forming magnetic saturated, dry and viscous friction, backlash and gaps in gears, limitations on voltage and current of the power converter, nonlinear load, hysteresis, dead zones and discreteness management influences. It is justified that linearised models are valid only in the vicinity of the operating point and do not provide adequate performance across a wide range of operating modes, including start, reverse, low-speed movement, torque boost, and operation under variable disturbances. Proposed generalised approach to mathematics description of electric drive in space states, taking into account basic nonlinear dependencies. The feasibility of integrated use is shown. local linearization, energy methods, Lyapunov functions, phase analysis, and modern nonlinear algorithm management. Received results from the theoretical basis for the synthesis of high-precision, robust and energy-efficient electric drive systems.

Keywords: electric drive, nonlinearity, electric machine, mathematical model, magnetic saturation, friction, backlash, robust control, stability, power converter.

Problem statement. Electric drive, in modern technical understanding, covers the electric machine, the power plant converter, the mechanical transmission, the load, and the control system. It is a multicomponent structure that makes him the only electromechanical system in which transformation energy, formation torque, motion transmission, and coordinate adjustment are interconnected [1].

However, in real conditions, the operation of such a system is almost never linear. Magnetic characteristics of the core change due to saturation; mechanical transmission contains clearances; friction has Coulomb, viscous, and mixed components; and regulators and converters operate under restricted voltage, current, and frequency switching [2]. Under these conditions of application, exclusively linear models lead to a simplification that is permissible only for a narrow range around the operating point. For a wide range of modes, a real electric drive needs a nonlinear theoretical description [10].

Analyse the last research and publications. In modern research, nonlinearities in electric drive systems are considered one of the main factors that restrict precision adjustment, smoothness, and stability. For mechanical parts, particular importance is given to backlash nonlinearity, dry and mixed friction, and elastic deformations in gears [3].

For electromagnetic parts, the primary source of nonlinearity is magnetic saturation [4], which causes variations in inductance and distortion of transitional processes [5]. Separate directions constitute research on nonlinear friction, because it directly affects not only the accuracy of management but also the identification of procedures and parameters in systems [6]. Development of modern PMSM – and asynchronous drives accompanied active implementation methods *FEEDBACK LINEARIZATION, BACKSTEPPING, SLIDING MODE, ADAPTIVE SCHEMES* [7–9].



Formulation of the purpose of the article (statement of the task). The purpose of the article is to provide a theoretical justification for electric drives with inherent nonlinearities by developing a generalised nonlinear description of electromechanical systems, identifying the main sources of nonlinearities, evaluating their impact on the drive's dynamic properties, and defining appropriate approaches to the analysis and synthesis of control systems.

The main part. In general case electric drive expedient describe in space states as a nonlinear system of the form:

$$x = f(x, u, p, t), \quad y = g(x, u, p, t) \quad (1)$$

where x is the state vector, which may include currents, flux linkage, angular velocity, angle of rotation, and deformations of mechanical links;

u is the control influence;

p is the object parameters. This form is natural for describing electric drives when it is necessary to simultaneously account for electromagnetic, mechanical, and control constraints [1].

For a generalized electric drive, the electrical and mechanical subsystems can be represented by the equations:

$$u = R(T, i)i + \frac{d\psi(i, \theta)}{dt} + e(\omega, \psi), \quad (2)$$

$$J(\theta) \frac{d\omega}{dt} = M_e(i, \psi) - M_c(\omega, \theta) - M_f(\omega) - M_d(t) \quad (3)$$

where $R(T, i)$ – resistance, depending on temperature and mode;

$\psi(i, \theta)$ – flux linkage as a nonlinear function of current and position;

M_e – electromagnetic moment;

M_c – load moment;

M_f – friction moment;

M_d – disturbing moment. Already from this form, it is clear that Nonlinearity in an electric drive is not a secondary effect but an inherent property of physics.

The first fundamental source of nonlinearity is magnetic saturation [4, 5]. In linear approximations, the flux linkage is often given as $\psi = Li$; however, the real magnetic system of the machine has a nonlinear magnetisation curve, and the mutual inductance changes with saturation. For induction machines and polyphase drives, consideration of saturation and crossover saturation substantially affects transient currents and voltages, as well as the accuracy of models.

The second principle factor is nonlinearity mechanical channel. Dry friction can be described approximated as [6]:

$$M_f(\omega) = M_{c0} \operatorname{sgn}(\omega) + b\omega \quad (4)$$

where M_{c0} is the Coulomb component;

$b\omega$ – binding component. Such a model is already unevenly smooth and, in the low-speed zone, generates effects such as sticking, microvibrations, and reduced positioning accuracy.

Third, the source is backlash, gear and elastic transmission gaps [3]. They generate dead zones, delay torque transmission, shock absorber phenomena during changes in direction of movement, and additional oscillatory modes. Since BACKLASH is an ambiguous nonlinearity with memory, it cannot be reduced to a simple static correction and must be considered separately in the model.

Fourth group nonlinearities related to the force converter and control system [7–9]. Current and voltage limitations, saturation regulators, PWM discreteness, digital computing delays, and *anti-windup effects* actually change the system's structure *depending* on the regime.



Fifth nonlinearity is exactly load. For many mechanisms, the moment of resistance is not constant and depends from speed in the form of:

$$M_c(\omega) = M_0 + k\omega^n \quad (5)$$

For pumps and fans, the typical law is the quadratic law; for transport and lifting mechanisms, piecewise linear or combined characteristics.

From here follows key theoretical position: linearization has local character. If for a stationary point (x_0, u_0) the following holds: condition $f(x_0, u_0) = 0$, then in the neighborhood this point the system can be presented in the first approximate as :

$$\Delta x = A\Delta\dot{x} + B\Delta u, \quad (6)$$

where

$$A = \left. \frac{df}{dx} \right|_{x_0, y_0}, \quad B = \left. \frac{df}{du} \right|_{x_0, y_0}. \quad (7)$$

This simplification is useful for controller synthesis, but it loses its adequacy when passing through zero speed, entering saturation, changing load, or structurally changing the converter mode. That is why, for a wide operating range of an electric drive, a nonlinear model is not an alternative, but a basic form of description.

Question: It is advisable to consider the stability of such systems on the basis of the energy approach and Lyapunov functions [10]. For an electric drive, a natural candidate for the Lyapunov function is the sum of the electromagnetic and mechanical energies. If the derivative of this function along the system's trajectories is negative, we can draw conclusions about sustainability or asymptotic regime stability.

From a control synthesis perspective, it means that traditional linear PI and PID controllers are considered a special case suitable for modes with relatively weak nonlinearities. If available, essential changes parameters, load, saturation, and disturbances become more justified, robust and nonlinear methods: SLIDING MODE, BACKSTEPPING, FEEDBACK LINEARIZATION, DISTURBANCE OBSERVER – BASED CONTROL, ADAPTIVE SCHEMES.

So, theoretically, the justification of electric drives with inherent nonlinearities consists in moving from simplified linear interpretations to a systemic nonlinear description. Such an approach should combine a physically correct model, local linearization for engineering synthesis, energy analysis, stability and numerical modelling characteristic modes.

Conclusions. It was found that nonlinear electric drives have a fundamental nature and arise in all main subsystems: electromagnetic, mechanical, power and control [4–7].

It has been proven that magnetic saturation, nonlinear friction, backlash, gaps, voltage and current constraints, and the load's nonlinear nature significantly alter the drive's dynamic characteristics and cannot be adequately captured by a single global linear model.

It is justified that linearised models are acceptable only for local analysis near the operating point, whereas over a wide range of modes, the electric drive must be described by a nonlinear state-space model.

Theoretical analysis indicates that a comprehensive approach combining physically meaningful nonlinear modelling, local linearization, Lyapunov methods, phase analysis, and robust control synthesis is advisable.

The received position can serve as a basis for further research and the design of high-precision, adaptive, and energy-efficient electric drive systems.

**Bibliography**

1. Leonhard W. Control of Electrical Drives. 2nd ed. Berlin; Heidelberg: Springer, 1996. 420 p. DOI: 10.1007/978-3-642-97646-9.
2. Tao G., Lewis FL, eds. Adaptive Control of Nonsmooth Dynamic Systems. London: Springer, 2001. 284 p. DOI: 10.1007/978-1-4471-3687-3.
3. Nordin M., Gutman P.-O. Controlling mechanical systems with backlash – a survey. *Automatica*. 2002. Vol. 38, No. 10. P. 1633–1649. DOI: 10.1016/S0005-1098(02)00047-X.
4. Pedra J., Candela I., Barrera A. Saturation model for squirrel-cage induction motors. *Electric Power Systems Research*. 2009. Vol. 79, No. 7. P. 1054–1061. DOI: 10.1016/j.epsr.2009.01.004.
5. Ben Slimene M., Khelifi MA Investigation on the Effects of Magnetic Saturation in Six-Phase Induction Machines with and without Cross Saturation of the Main Flux Path. *Energies*. 2022. Vol. 15, No. 24. Art. 9412. DOI: 10.3390/en15249412.
6. Li C., Chen Z., Yao B. Identification and adaptive robust precision motion control of systems with nonlinear friction. *Nonlinear Dynamics*. 2019. Vol. 95. P. 995–1007. DOI: 10.1007/s11071-018-4610-6.
7. Karboua D., Douara B., Mebkhoua T., Mosaad MI, Toual B., Ali ES, Abd Elazim SM Advanced nonlinear control techniques for PMSM drives: A comprehensive review and comparative analysis. *Results in Engineering*. 2025. Vol. 28. Art. 107650. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.107650.
8. Ullah A., Pan J., Ullah S., Zhang Z. Robust Speed Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System Using Sliding-Mode Disturbance Observer-Based Variable-Gain Fractional-Order Super-Twisting Sliding-Mode Control. *Fractal and Fractional*. 2024. Vol. 8, No. 7. Art. 368. DOI: 10.3390/fractalfrac8070368.
9. Wang J., Miao Q., Zhou X., Sun L., Gao D., Lu H. Current Control Method of Vehicle Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Active Disturbance Rejection Control. *World Electric Vehicle Journal*. 2023. Vol. 14, No. 1. Art. 2. DOI: 10.3390/wevj14010002.
10. Adamy J. Nonlinear Systems and Controls. 2nd ed. Berlin; Heidelberg: Springer, 2024. 716 p. DOI: 10.1007/978-3-662-68690-4.

Дата першого надходження статті до видання: 03.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 25.05.2026

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



А. Надточій, В. Надточій

Херсонський навчально-науковий інститут

Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ З ПРИТАМАННИМИ НЕЛІНІЙНОСТЯМИ

Анотація

У статті здійснено теоретичне обґрунтування електроприводів, у яких суттєвий вплив на динамічні та статичні характеристики мають притаманні нелінійності електромагнітної, механічної та керувальної природи. Показано, що реальний електропривод доцільно розглядати не як сукупність лінійних ланок із малими відхиленнями параметрів, а як складну нелінійну електромеханічну систему, поведінка якої формується магнітним насиченням, сухим і в'язким тертям, люфтами та зазорами у передачах, обмеженнями напруги і струму силового перетворювача, нелінійністю навантаження, гістерезисом, мертвими зонами та дискретністю керувальних впливів. Обґрунтовано, що лінеаризовані моделі є коректними лише в околі робочої точки і не забезпечують належної адекватності під час аналізу широкого діапазону режимів, зокрема пуску, реверсу, малозшвидкісного руху, форсування моменту та роботи в умовах змінних збурень. Запропоновано узагальнений підхід до математичного опису електропривода у просторі станів з урахуван-



ням базових нелінійних залежностей. Показано доцільність комплексного використання локальної лінеаризації, енергетичних методів, функцій Ляпунова, фазового аналізу та сучасних нелінійних алгоритмів керування. Отримані результати формують теоретичну основу для синтезу високоточних, робастних та енергоефективних електроприводних систем.

Ключові слова: електропривод, нелінійність, електрична машина, математична модель, магнітне насичення, тертя, люфт, робастне керування, стійкість, силовий перетворювач.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-2-4>

УДК 657.6:657.44

В. П. Савінов¹, аспірант

ORCID: 0009-0007-3582-7306

С. В. Галько², канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-7991-0311

¹Запорізький національний університет²Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: galkosv@gmail.com

ВПЛИВ МАГНІТНО-ВИХРЕВОЇ ОБРОБКИ ДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА НА ПРОЦЕС СУМІШОУТВОРЕННЯ ТА ГОРІННЯ В ДИЗЕЛЬНОМУ ДВИГУНІ

Анотація. Між електричними і магнітними полями існує глибокий внутрішній зв'язок. Будь-яка зміна магнітного поля завжди супроводжується появою електричного поля і навпаки. Електричне поле може створюватися не тільки зарядами, але і магнітним полем, джерелом якого є постійні магніти та електричні мікроструми, що циркулюють усередині молекул палива.

У роботі досліджується вплив магніто-вихревої обробки дизельного палива на його фізичні характеристики та параметри процесу згоряння у двигуні. Експериментально показано, що проходження палива через систему послідовно встановлених постійних магнітів різних геометричних розмірів та магнітних характеристик призводить до зміни параметрів упорскування, кута випередження запалення та динаміки горіння. При цьому спостерігається зниження щільності палива, температури спалаху, зольного залишку, вмісту сірки, навантаження на мотор при збереженні потужності двигуна. Отримані результати інтерпретуються з позицій гідродинаміки, фазових ефектів та кінетики горіння.

Ключові слова: електричне поле, магнітне поле, електрофізична дія, магнітогідродинаміка, якість палива.

Постановка проблеми. Основними показниками, що характеризують роботу двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) є потужність мотора, момент, що крутить, економічність і токсичність відпрацьованих газів, ці параметри визначають ефективність руху автомобіля на низьких і середніх оборотах [1, 2]. Якість палива істотно впливає на потужність та економічність двигуна. Крім конструктивних параметрів ці показники залежать від особливостей та налаштувань систем живлення та запалення, ступеня зношування деталей тощо. В останні роки зріс інтерес до методів підвищення енергоефективності палива шляхом обробки його магнітними та електричними полями. Однак відсутність системної теорії взаємодії магнітних полів із складними рідинами, такими як автомобільне паливо, обмежує можливості оптимізації конструкцій. У цьому дослідженні запропоновано комплексний підхід, оснований на поєднанні вихрових потоків, електромагнітних ефектів та молекулярних струмів у замкнутому контурі.

Аналіз останніх досліджень. В останні роки відзначається зростання інтересу до методів фізичного та електромагнітного впливу на вуглеводневі палива з метою підвищення їхньої енергетичної ефективності та екологічних показників. Ряд досліджень присвячені впливу постійних магнітних полів на процеси сумішоутворення та горіння у ДВЗ. Експериментальні роботи Faris та ін. [3] та Elzanaty та ін. [4] показали, що магнітна дія на паливо призводить до зниження його витрати на 10...12,5 % та зменшення викидів шкідливих речовин за рахунок зміни фізико-хімічних властивостей палива та параметрів процесу згоряння.

Зміна в'язкості та поверхневого натягу вуглеводневих рідин під дією магнітного поля досліджено в роботі [5], де встановлено вплив магнітного поля на міжмолекулярні взаємодії та реологічні характеристики палива. Магнітогідродинамічні ефекти в рідких середовищах докладно



розглянуті в огляді Sheikholeslami та Ganji [6], що показав суттєвий вплив магнітного поля на структуру потоку та процеси тепломасообміну.

Електрофізична дія на вуглеводневі палива вивчена Морозовою І. [7], де в її роботах показано зниження нагароутворення на 20...25 % та зростання паливної економічності до 5 %. Теоретичні основи взаємодії магнітних полів із провідними рідинами викладені в роботах Ландау Л. Д. та Ліфшиця Є. М. [8] та лекціях Фейнмана Р. [9]. Процеси сумішоутворення та горіння дизельних палив із застосуванням оптичної діагностики досліджено у [10] показали залежність кінетики горіння та утворення сажі від фізико-хімічних властивостей палива. Ряд авторів [11, 12] вказує на можливість зміни кластерної структури вуглеводневих молекул під дією магнітного поля, що покращує умови випаровування та займання.

Нормативні вимоги до якості дизельного палива визначені ДСТУ 7688:2015 [13], використаним у цій роботі для порівняльного аналізу експериментальних даних. Вплив вихрових структур та магнітогідродинамічних хвиль на енергомасообмін у провідних рідинах розглянуто у [14]. Таким чином, аналіз літератури та досліджень підтверджує перспективність магнітних та електрофізичних методів впливу на паливо. Водночас більшість досліджень обмежується вивченням ламінарного режиму перебігу рідини та не враховує сукупного впливу вихрових потоків, міжмолекулярних взаємодій та часу перебування палива в зоні магнітного поля, що обґрунтовує необхідність подальших комплексних досліджень.

Формування мети статті. Метою статті є порівняльний аналіз фізико-хімічного стану дизельного палива до і після магніто-вихревої обробки у розробленому пристрої в реальних умовах експлуатації транспортних засобів.

Основна частина. Якщо рідина, що проводить, або газоподібне середовище знаходяться в магнітному полі, то при її гідродинамічних рухах в ній індукуються електричні поля і виникають електричні струми. У свою чергу, на ці струми в магнітному полі діють сили Лоренца, які можуть суттєво впливати на характер руху рідини. З іншого боку, ці струми змінюють і саме магнітне поле [15]. Таким чином, формується складна картина взаємодії магнітних полів та гідродинамічних явищ, яка повинна розглядатися на основі спільної системи рівнянь поля та рівнянь руху рідини. Для застосування магнітної гідродинаміки необхідно, щоб для розглянутого руху характерні відстані і проміжки часу були великі порівняно з довжиною пробігу і часу пробігу носіїв струму (електронів, іонів). При виконанні цієї умови середовище може розглядатися як суцільна рідина, що проводить. Закон збереження енергії у звичайній гідродинаміці виражається рівнянням:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\rho v^2}{2} + \rho \varepsilon \right) = -\operatorname{div} \mathbf{q}, \quad (1)$$

де \mathbf{q} – щільність потоку енергії;

$\operatorname{div} \mathbf{q}$ – дивергенція потоку енергії;

ρ – густина рідини;

ε – внутрішня енергія одиниці маси рідини;

v – швидкість потоку;

$\rho v^2/2$ – густина кінетичної енергії.

Ліва частина рівняння (1) – це швидкість зміни повної енергії (кінетичної і внутрішньої) в одиниці об'єму.

Права частина:

- знак « $-$ » означає, що енергія зменшується, якщо вона витікає з об'єму;
- $\operatorname{div} \mathbf{q}$ описує, як енергія переноситься через простір.



За наявності у провідному середовищі магнітного поля до густини енергії додається магнітна енергія $\mathbf{H}^2/8\pi$, а до густини потоку енергії – вектор Пойнтінга в гаусовій системі одиниць

$$\mathbf{S} = \frac{c}{4\pi} [\mathbf{E} \times \mathbf{H}] \quad (2)$$

де c – швидкість світла;

\mathbf{H} – напруженість магнітного поля;

\mathbf{E} – напруженість електричного поля.

У гаусовій системі одиниць напруженість електричного поля

$$\mathbf{E} = -\frac{1}{c} [\mathbf{v} \times \mathbf{H}]. \quad (3)$$

Таким чином, закон збереження енергії в магнітній гідродинаміці виражається рівнянням

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\rho v^2}{2} + \rho \varepsilon + \mathbf{H}^2 / 8\pi \right) = -\operatorname{div} \mathbf{q}, \quad (4)$$

де щільність потоку енергії

$$\mathbf{q} = \rho \mathbf{v} \left(\frac{v^2}{2} + \omega \right) + \frac{1}{4\pi} [\mathbf{H} \times [\mathbf{v} \times \mathbf{H}]], \quad (5)$$

де ω – ентальпія на одиницю маси:

$$\omega = \varepsilon + \frac{p}{\rho},$$

де p – тиск.

Доданок p/ρ – це робота, яку виконує тиск при переміщенні рідини (енергія «проштовхування» об'єму).

За наявності поздовжнього магнітного поля поперечні переміщення рідини поширюються у середовищі як магнітогідродинамічні хвилі. Через «замороженість» магнітних силових ліній у провідній рідині, поперечне зміщення частинок рідини призводить до їх викривлення і до розтягування, і в деяких місцях, згущення [16, 17]. Характер діючих у магнітному полі сил такий, як би магнітні силові лінії прагнули скорочуватися і водночас відштовхуватися одна від одної. В результаті при їх викривленні з'являються квазіпружні сили, що прагнуть знову випрямити їх, що призводить до виникнення коливань [18].

В результаті проведених численних досліджень пошуку оптимальних режимів, комбінацій впливу неоднорідними постійними магнітними полями на потік дизельного палива були визначені конструктивні параметри пристрою, що забезпечують підвищення ефективності процесу згорання палива.

У цьому пристрої дані положення магнітогідродинаміки використовуються для опису взаємодії вихрового потоку палива з неоднорідним магнітним полем в системі накопичувальних камер. У розробленій конструкції використовуються принципи: магнітогідродинаміки, спрямованого завихрення потоку, збільшеного часу взаємодії рідини з магнітним полем. Конструктивно корпус магнітної системи виконаний з діамагнітного матеріалу, що унеможливило спотворення силових ліній магнітного поля. Геометричні параметри (дифузори, міжреберні простори) конструкції проектувалися з дотриманням закону збереження енергії речовини в замкнутому просторі та з дотриманням умов безперервності. Постійні магніти розташовані перпендикулярно напрямку руху палива, що забезпечує максимальну тривалість впливу магнітного поля на потік та збільшення часу взаємодії палива з магнітним полем у кожній камері

пристрою. У ході математичного моделювання та розрахунків було визначено такі основні параметри:

- загальний об'єм конструкції з постійними магнітами малої індукції;
- час знаходження палива всередині конструкції;
- час взаємодії палива з магнітним полем у кожній камері;
- кутова швидкість обертання потоку;
- центробіжне прискорення палива;
- число обертів палива всередині конструкції;
- кутові швидкості;
- час потоку палива.

Швидкість руху палива в магістралі при $\varnothing 8$ мм у легкових автомобілях становить $v \approx 0,03 \dots 0,06$ м/с, що показує повільний потік ($Re < 2000$) і тривалий час перебування палива в зоні магнітного поля.

Отримані розрахункові значення підтверджують, що при заданих магнітних та геометричних параметрах пристрою забезпечується стійкий режим завихрення потоку та достатній час магнітного впливу для зміни фізико-хімічних характеристик палива.

Опис роботи конструкції. Конструктивна схема пристрою для магнітної обробки палива приведена на рис. 1. Розрахунок конструкції виконаний виходячи із внутрішнього діаметра паливної магістралі 8 мм. Загальна довжина корпусу – 115–120 мм, внутрішній діаметр циліндра системи – 34 мм, довжина дифузора – 26 мм, довжина конфузора – 27 мм. Кількість поперечних вставок – 3 шт, гвинтова втулка – 1 шт. Постійні магніти із щільністю магнітного потоку 0,56 мТл...0,68 мТл.

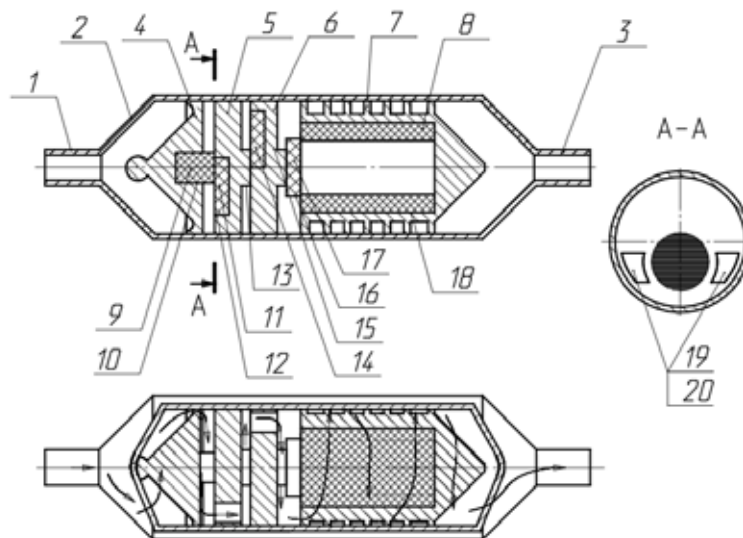


Рис. 1. Конструктивна схема пристрою для магнітної обробки палива: 1, 3 – вхідний та вихідний штуцер; 2 – дифузор; 4, 5, 6 – поперечне ребро; 7 – гвинтова втулка; 8, 9, 11, 14, 17 – постійний магніт; 10, 12, 18 – місця для встановлення постійних магнітів; 13, 15 – упори поперечних ребер; 16 – накопичувальна камера між поперечним ребром і гвинтовою втулкою; 19, 20 – прохідні отвори в поперечних ребрах [19]

Паливо надходить через вхідний штуцер 1, де відбувається формування спрямованого вихрового потоку і потім потрапляє в дифузор 2. У дифузори відбувається збільшення статичного тиску рідини та зниження швидкості потоку, що призводить до посилення Ван-дер-ваальсових



міжмолекулярних взаємодій та формування більш однорідної структури палива. Посилення міжмолекулярних взаємодій супроводжується виникненням додаткових мікрострумів у вихровому потоці середовища, що зумовлює перерозподіл енергетичних рівнів атомів та зміну параметрів спин-орбітальної взаємодії в молекулярних структурах палива. Далі потік послідовно проходить через систему поперечних ребер 4, 5, 6 і прохідних отворів 19, 20, що призводить до поділу основного потоку рідини на кілька дрібніших потоків і виникнення різноспрямованих вихрових потоків руху із заданою кутковою швидкістю. При цьому паливо піддається впливу неоднорідного магнітного поля, створеного постійними магнітами 8, 9, 11, 14, 17, розташованими перпендикулярно напрямку руху потоку. У накопичувальній камері 16, утвореної між поперечним ребром і гвинтовою втулкою 7, забезпечується додатковий час перебування палива, протягом якого відбувається стабілізація його фізико-хімічних параметрів після гідромагнітного (гідроенергетичного) впливу перед наступним рухом по гвинтовій втулці.

В результаті спільної дії гідроенергетичних факторів (вихрового руху потоку, інерційних ефектів та магнітного поля) та посилення Ван-дер-ваальсових міжмолекулярних взаємодій збільшується ефективний час взаємодії палива з магнітним полем. Це сприяє перерозподілу енергії в молекулярних структурах палива, зміні конфігурації вуглеводневих кластерів та підвищенню ступеня однорідності паливної суміші. Послідовне проходження палива через багатоканальну систему магнітного впливу формує багатоступінчастий режим обробки, при якому сумарний час ($t = 9,5 \dots 11,8$ с) гідромагнітного (гідроенергетичного) впливу істотно перевищує час проходження палива через прямолінійну ділянку трубопроводу і забезпечує стійкість досягнутого фізико-хімічного стану.

Проведені лабораторні порівняльні дослідження класичного дизельного палива і палива після проходження через неоднорідні магнітні поля в конструкції показали наступні результати [20], які наведені у таблиці 1. Лабораторні аналізи двох зразків проводилися повних три доби.

1. Щільність палива. Фактичні значення: вихідний зразок – 832 кг/м^3 ; після магнітної обробки – 828 кг/м^3 . Після обробки спостерігається незначне зниження густини палива (приблизно на 0,5 %). Дана зміна свідчить про перерозподіл молекулярних асоціацій і зменшення ступеня кластеризації вуглеводневих структур, що призводить до формування більш однорідного середовища.

2. Температура спалаху. Фактичні значення: вихідний зразок – 69°C ; після магнітної обробки – 48°C . Зниження температури спалаху після магнітного впливу вказує на підвищення частки більш легких та активних фракцій у паровій фазі палива. Це може бути пов'язано зі зміною міжмолекулярних взаємодій та ослабленням Ван-дер-ваальсових зв'язків між молекулярними кластерами, що полегшує випаровування та займання палива.

Таблиця 1

Результати лабораторних випробувань дизельного палива

Найменування показників вимірювання	Норми згідно з ДСТУ 7688:2015	Результати випробувань палива	
		до обробки	після магнітно-вихрової обробки
Густина за температури 15°C , кг/м^3 , літнє паливо	820...845	832	828
Температура спалаху у закритому тиглі, $^\circ\text{C}$, не нижче	55	69	48
Зольність, % (мас.), не більше	0,01	0,0145	0,01
Фракційний склад за температури 250°C , випаровується, % (об), не більше	65	39	41
Вміст сірки, мг/кг , не більше Євро 4	50	105	10,5



3. Зольний залишок. Фактичні значення: вихідний зразок – 0,0145 %, після магнітної обробки – 0,01 %. Після магнітної обробки зольність знизилася більш ніж 1,5 рази. Це є важливим результатом, оскільки зменшення зольності свідчить про зниження концентрації неорганічних та важких домішок, що потенційно знижує утворення твердих відкладень у камері згоряння та на елементах паливної апаратури.

4. Фракційний склад (випар при 250 °С). Фактичні значення: вихідний зразок – 39 %, після магнітної обробки – 41 %. Спостерігається збільшення частки фракцій, що випарувалися, при температурі 250 °С після магнітного впливу. Це вказує на підвищення леткості палива і більш рівномірний розподіл фракцій по молекулярній масі, що може позитивно впливати на процес сумішоутворення та повноту згоряння.

5. Зміст сірки. Фактичні значення: вихідний зразок – 105 мг/кг, після магнітної обробки – 10,5 мг/кг. Після проходження палива через магнітну систему вміст сірки знизився на порядок. Ця зміна може бути пов'язана з перерозподілом сірковмісних сполук та їх частковою агрегацією або осадженням у процесі магнітогідродинамічного впливу. Істотне зниження вмісту сірки є важливим чинником зменшення корозійної активності палива і викидів сірчистих сполук при згорянні.

Висновок за результатами аналізу: результати лабораторних випробувань показують, що магнітна (гідроенергетична) обробка дизельного палива призводить до помітних змін його фізико-хімічних характеристик: спостерігається зниження щільності та зольності палива, збільшується частка легких фракцій, зменшується температура спалаху, суттєво знижується вміст сірки, підвищується однорідність фракційного складу.

Сукупність отриманих змін вказує на перерозподіл молекулярних кластерів вуглеводнів та ослаблення міжмолекулярних Ван-дер-ваальсових зв'язків під дією гідромагнітних та гідроенергетичних факторів. Це сприяє формуванню більш активного та однорідного паливного середовища, що потенційно покращує умови займання, сумішоутворення та повноти згоряння в циліндрах ДВЗ. Таким чином, результати лабораторних випробувань дозволяють зробити висновок про те, що проходження дизельного палива через область неоднорідного силового магнітного поля та гідроенергетичний вплив супроводжується зміною міжмолекулярних взаємодій та перерозподілом енергетичних станів молекулярних структур палива.

Було проведено тривалі ходові експлуатаційні випробування на різних видах автомобілів, що мали різний об'єм мотора, за призначенням використання, масою та часом випуску. У статті представлені результати випробувань для автомобіля Mercedes Vito 116, 2017 року випуску, об'єм мотора – 2,2 л, вид палива – дизель. Спосіб встановлення пристрою приведений на рис. 2. Час ходових випробувань з 2020 року до поточного 2026 року. Оригінальна витрата палива без магнітно-вихрової обробки у міському режимі експлуатації автомобіля зафіксована – 10,5 л/100 км.

Після встановлення пристрою для магнітної обробки палива витрата його в теплу пору року становила 6,2...6,5 л/100 км у міських умовах експлуатації та ідентичних навантаженнях. У холодну пору року – 6,8...7,0 л/100 км протягом кількох зимових періодів.

При витратах палива від 6,2 л/100 км до 10,5 л/100 км час перебування палива в активній зоні пристрою становить 11,8...9,5 с. Наявність елемента, що створює вихор, формує обертальний рух потоку з кутовою швидкістю 2...5 рад/с, що відповідає 20...50 об/хв. За час проходження через пристрій потік здійснює в середньому 3...4 повні обороти, забезпечуючи інтенсивне перемішування палива та тривалу дію магнітного поля. При цьому через пробіг 1000...1200 км повністю зникла димність із вихлопної системи, з'явилася краща тяга і легкість при зрушенні з місця, а також під час руху автомобіля.



*Пристрій для
магнітної
обробки палива*

Рис. 2. Спосіб встановлення пристрою для магнітної обробки палива на автомобіль Mercedes Vito 116CDI



Рис. 3. Витрата палива на автомобілі Мерседес Віто 116CDI, травень-вересень 2025 р., режим експлуатації – місто



Рис. 4. Витрата палива на автомобілі Мерседес Віто 116CDI, листопад 2025-лютий 2026 р., режим експлуатації – місто

Також були проведені порівняльні випробування витрат палива автобуса ЗАЗ-А09А2D в стандартній комплектації та з магнітною системою. Двигун Mercedes Benz, модель 4D34i. Випробувальне обладнання – ваги автомобільні, зав. № 071201345 (чотири платформи моделі RW-05P), модель RW-2601P, комплект апаратури для визначення витрати палива, пройденого шляху та часу зав. № 180096, модель «CORRSYS-DATRON». Випробування автобуса проводилися при русі по асфальтобетонній дорозі за одним маршрутом. Дистанція маршруту для кожного виміру складала 2500 м. Під час руху і вимірів кожної ділянки маршруту водій-випробувач максимально можливо повторював режим руху – швидкість руху, обороти двигуна, обрана передача КПП.

Дані параметри при кожному вимірюванні контролювалися загальним часом проходження маршруту. Маса автобуса під час проведення випробувань – 7540 кг. За ТУ У 29.1-25480917-249:2020 споряджена маса – 6600 кг, повна маса – 9400 кг. Навантаження імітувалося баластом, що був рівномірно розподілений на підлозі салону автобуса. Пристрій для магнітної обробки різної конструкції монтувався до паливної магістралі автобуса після паливного фільтра. Результати вимірів наведено у таблиці 2.

Аналіз експериментальних даних показав наявність стійких відмінностей між встановленою експериментальною магнітною конструкцією та стандартною комплектацією за параметрами витрати палива та часу проходження дистанції, що відображено на графіках (рис. 5–7).

Таблиця 2

Показники контрольних вимірів витрати палива під час руху автобуса ЗАЗ-А09А2D на треку ПрАТ «ЗАЗ»

Витрата палива на стандартній комплектації												
№ тесту	Контрольна точка 1				Контрольна точка 3		Контрольна точка 4		Контрольна точка 5		Фініш	
	Витрата	Час	Витрата	Час	Витрата	Час	Витрата	Час	Витрата	Час	Витрата	Час
	л	с	л	с	л	с	л	с	л	с	л	с
1	0,197	64	0,269	98	0,398	145	0,437	188	0,573	230	0,582	260
2	0,15	78	0,193	102	0,321	166	0,355	196	0,455	246	0,477	260
3	0,145	80	0,191	106	0,291	168	0,325	198	0,427	250	0,444	264

Витрата палива при встановленні пристрою для магнітної обробки												
№ тесту	Контрольна точка 1		Контрольна точка 2		Контрольна точка 3		Контрольна точка 4		Контрольна точка 5		Фініш	
	Витрата	Час	Витрата	Час	Витрата	Час	Витрата	Час	Витрата	Час	Витрата	Час
	л	с	л	с	л	с	л	с	л	с	л	с
1	0,113	83	0,153	109	0,222	172	0,242	198	0,373	256	0,388	285
2	0,115	79	0,165	105	0,232	169	0,273	200	0,39	253	0,401	285
3	0,135	80	0,163	104	0,235	167	0,273	203	0,393	254	0,407	283

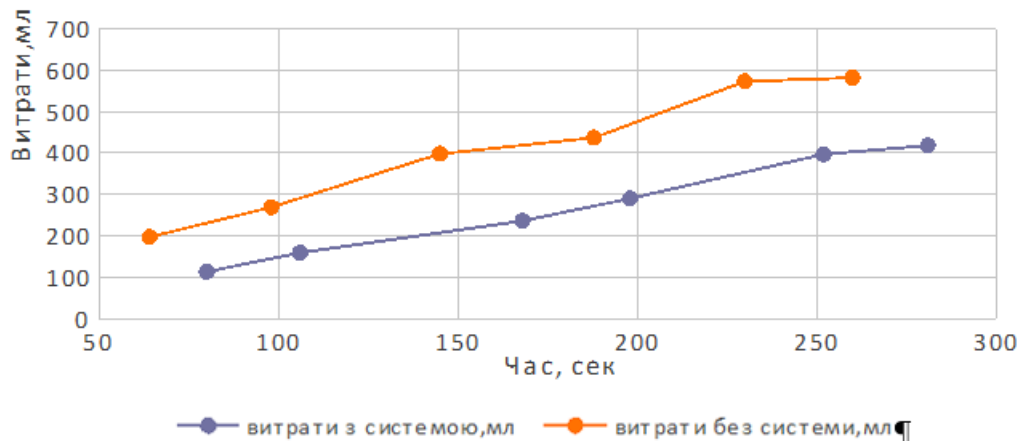


Рис. 5. Порівняння показників витрати палива автобуса ЗАЗ-А09А2D. Тестове випробування 1

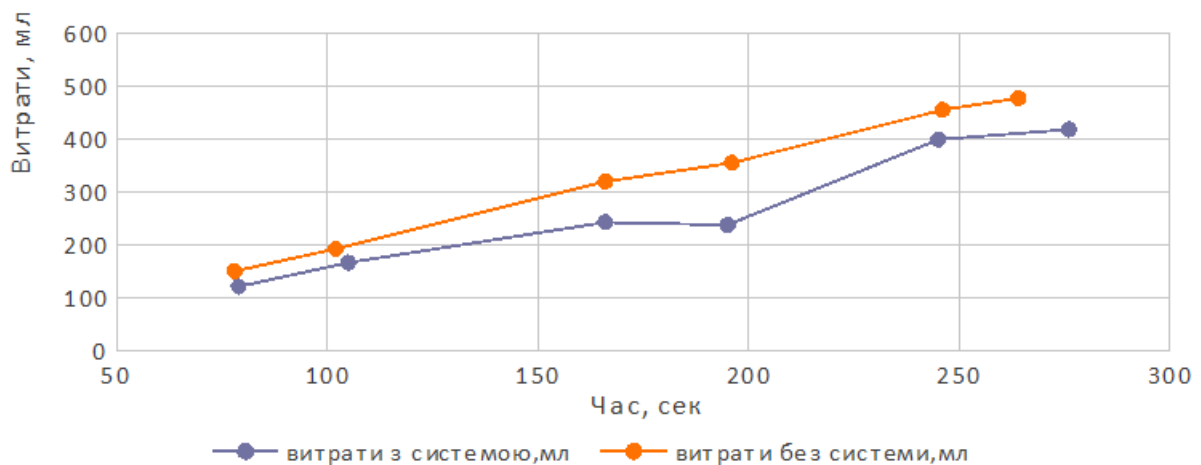


Рис. 6. Порівняння показників витрати палива автобуса ЗАЗ-А09А2D. Тестове випробування 2

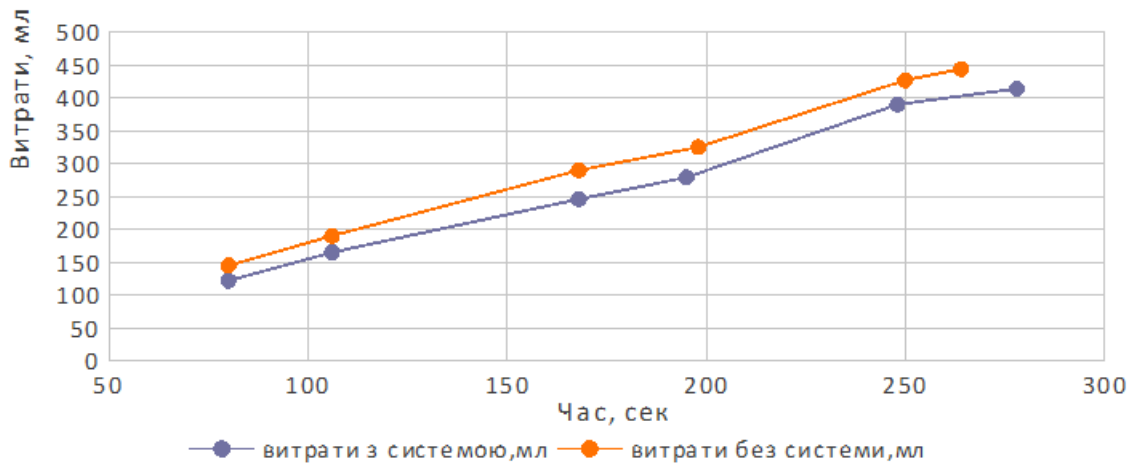


Рис. 7. Порівняння показників витрати палива автобуса ЗАЗ-А09А2D. Тестове випробування 3

Середня сумарна витрата палива на фініші для експериментальної магнітної конструкції склала 0,398 л, тоді як для стандартної комплектації – 0,501 л. Відносне зниження витрат палива визначається за виразом

$$\Delta Q = \frac{Q_{cm} - Q_{екс}}{Q_{cm}} 100\% \quad (5)$$
$$\Delta Q = \frac{0,501 - 0,398}{0,501} 100\% \approx 21\%.$$

Таким чином, застосування магнітної конструкції забезпечує економію палива близько 21 % порівняно зі стандартною паливною системою. На всіх контрольних точках спостерігається менша витрата палива в експериментальному режимі. Різниця зростає зі збільшенням дистанції, що свідчить про системний характер ефекту, а чи не на локальні відхилення вимірів. Найбільш виражений ефект зафіксований у середній частині дистанції (КТЗ–КТ4), де зниження витрати досягає 20...28 %. Середній час проходження дистанції: експериментальна конфігурація ≈ 278 с; стандартна комплектація ≈ 261 с. Відносне збільшення часу: $\Delta t \approx 6,5$ %, що свідчить про зміну режиму роботи двигуна у бік більш економічного режиму, але менш динамічного руху.

Отримані результати вказують, що експериментальна магнітна конструкція знижує миттєву та сумарну витрату палива, стабілізує процес подачі та згоряння палива, зменшує енергетичні втрати на неефективні режими роботи двигуна. Одночасно спостерігається помірне зниження динамічних характеристик (хоча більшою мірою це залежить від водія), що є типовим компромісом між економічністю та продуктивністю.

Експериментальні дані та сукупний аналіз підтверджують, що досліджувана технічна модифікація дозволяє досягти стійкого і повторюваного зниження витрат палива в середньому на 21 % при збільшенні часу проходження дистанції на 6...7 %.

Результати досліджень викладені у статті можуть бути використані при розробці конструкцій та систем, орієнтованих на підвищення паливної ефективності транспортних засобів.

Висновок. В результаті проведених досліджень розроблена та експериментально апробована конструкція пристрою магнітної обробки дизельного палива, що забезпечує формування спрямованого вихрового потоку та багатоступінчастий гідромагнітний (гідроенергетичний) вплив на паливне середовище. Сукупний аналіз параметрів витрати палива і часу його обробки дозволяє зробити висновок, що магнітні конструкції пристроїв сприяють оптимізації процесів сумішоутворення та згоряння, знижуючи сумарні енергетичні втрати.



Лабораторні випробування вихідного палива та палива після проходження через магнітну систему показали наявність стійких змін його фізичних та фізико-хімічних характеристик, включаючи щільність, температуру спалаху, зольність, фракційний склад та вміст сірки. Отримані відмінності виходять за межі похибки вимірів та мають систематичний характер.

Сукупність виявлених змін свідчить про перерозподіл міжмолекулярних взаємодій і зміну енергетичного стану молекулярних асоціацій палива під дією магнітних і гідроенергетичних факторів. У процесі проходження палива через силове магнітне поле формується стан молекулярних структур з іншими енергетичними характеристиками в порівнянні з вихідним станом. Це, у свою чергу, забезпечує більш стабільне займання та повніше протікання процесів горіння в циліндрах ДВЗ.

Отримані експериментальні результати підтверджують перспективність застосування спільно магнітних та гідроенергетичних методів впливу для модифікації властивостей дизельного палива та підвищення ефективності процесів його згоряння. Подальші дослідження доцільно направити на розширення експериментальної бази та уточнення фізичних механізмів впливу магнітних полів на молекулярну структуру вуглеводневих палив.

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. Faris A. S., Al-Naseri S. K., Jamal N., Isse R., Abed M., Fouad Z., Kazim A., Reheem N., Chaloob A., Mohammad H., Jasim H., Sadek J., Salim A., Abbas A. Effects of magnetic field on fuel consumption and exhaust emissions in two-stroke engine. *Energy Procedia*. 2012. Vol. 18. P. 327–338. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.044>
4. Elzanaty H., Mohamed E., Abdelrahman M. Influence of magnetic field on the properties of hydrocarbon fuels and combustion characteristics. *Fuel*. 2019. Vol. 253. P. 1120–1128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.05.052>
5. Hristov J. Magnetic field influence on viscosity and surface tension of fuels. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2014. Vol. 354. P. 7–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2013.10.040>
6. Sheikholeslami M., Ganji D. D. Magnetohydrodynamics and heat transfer in liquid fuels under magnetic fields. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 79. P. 612–625. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.083>
7. Морозова И. 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=TIIfsFUAAAAAJ&citation_for_view=TIIfsFUAAAAAJ:u-x6o8ySG0sC
8. Landau L. D., Lifshitz E. M. Field Theory. *Theoretical Physics*. Oxford: Pergamon Press. 1984. Vol. 4. P. 215–224.
9. Feynman R. P., Leighton R. B., Sands M. The Feynman Lectures on Physics. 1964. Vol. II: Electromagnetism and Matter. Addison-Wesley.
10. Zhao H., Ladommatos N. Optical diagnostics for soot and combustion in diesel engines. *Progress in Energy and Combustion Science*. 1998. Vol. 24(3). P. 221–255. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(97\)00021-2](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(97)00021-2)
11. Al-Obaidi S. H., Mohammed M. K. Effect of magnetic field on physical properties of diesel fuel. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2013. Vol. 2(7). P. 1–6.
12. Kabeel A. E., El-Agouz S. A. Review of magnetic field applications in fuel systems. *Applied Thermal Engineering*. 2011. Vol. 31. P. 2039–2046. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.03.008>
13. ДСТУ 7688:2015. Паливо дизельне. Технічні умови. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015.



14. Tsiklauri G., Beresnev I. Magnetohydrodynamic waves and vortex flows in conductive liquids. *Physics of Fluids*. 2003. Vol. 15. P. 112–121. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1527005>.
15. Al-Quraan T.M.A., Vovk O., Halko S., Kvitka S., Suprun O., Miroshnyk O., Nitsenko V., Zayed N.M., Islam A. Energy-Saving Load Control of Induction Electric Motors for Drives of Working Machines to Reduce Thermal Wear. *Inventions*. 2022. 7(4). 92. DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions7040092>.
16. Галько С. В., Галько Т. І., Зеленков Д. М. Математична обробка параметрів магнітного поля індукційних вітроелектромеханічних нагрівачів. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Технічні науки*. Запоріжжя : ТДАТУ, 2025. Вип. 25, т. 3. С. 10–18. DOI: <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-3-1>
17. Vovk O., Kvitka S., Halko S., Strebkov, O. Energy-saving control of asynchronous electric motors of driving working machines. *Modern Development Paths of Agricultural Production: Trends and Innovations*. Cham: Springer International Publishing. 2019. P. 415–423. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-14918-5_43.
18. Landau L. D., Lifshitz E. M. Electrodynamics of Continuous Media. *Theoretical Physics*. Oxford : Pergamon Press. 1984. Vol. 8. P. 313–339.
19. Пристрій для магнітної обробки рідкого вуглеводневого палива: пат. 154314 Україна: МПК F02M 27/04 (2006.01), F02B 51/04 (2006.01), номер заявки u202302953, заявл. 19.06.2023, опубл. 01.11.2023, бюл. №44/2023.
20. Протокол випробувань: Випробувальна лабораторія нафтопродуктів УДУНТ, Дніпро, протокол випробувань №18/Д1, 18/Д2 від 12.09.2025 р.

Дата першого надходження статті до видання: 10.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 05.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 25.05.2026

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



V. Savinov¹, S. Halko²

¹Zaporizhzhia National University

²Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

THE INFLUENCE OF MAGNETIC-VORTEX TREATMENT OF DIESEL FUEL ON THE PROCESS OF MIXTURE FORMATION AND COMBUSTION IN A DIESEL ENGINE

Summary

By examining interaction processes in the material world through environmental energy and their influence on the internal molecular structure, new interpretations of natural phenomena can be developed. Electric charges arise when different substances come into close contact. In some materials, charges can move freely, whereas in others this is not possible. The interaction between bodies depends on their shape and relative position, while electric charges are distributed throughout their volume.

A close relationship exists between electric and magnetic fields, manifested in their ability to transform into each other. Any change in a magnetic field induces an electric field, and conversely, a changing electric field generates a magnetic field. An electric field can be created not only by moving charges but also by a time-varying magnetic field. The sources of magnetic fields include permanent magnets and electric microcurrents circulating within fuel molecules.

This study investigates the effect of magnetic vortex treatment of diesel fuel on its physical properties and combustion parameters in a diesel engine. It is experimentally shown that passing fuel through a system of sequentially arranged permanent magnets with different geometric dimensions and magnetic permeability characteristics, forming a vortex flow structure, leads to changes in injection parameters, ignition timing, combustion duration, and combustion dynamics. A decrease in fuel density, flash point, ash content, and sulfur concentration is observed.



Modification of the energy and structural parameters of the fuel improves its homogeneity, increases the proportion of active fractions, and enhances evaporation and mixture formation conditions. This ensures more stable ignition and more complete combustion in internal combustion engine cylinders. The results confirm the potential of magnetic and electrophysical methods for modifying diesel fuel properties and improving combustion efficiency. Further studies should focus on expanding the experimental base and clarifying the physical mechanisms of magnetic field influence on hydrocarbon fuel molecules.

Keywords: electric field, magnetic field, electrophysical impact, magnetohydrodynamics, fuel quality.



КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-2-5>

УДК 004.89:004.942:62-50

С. М. Григоренко, канд. техн. наук

ORCID: 0009-0006-4551-8243

Л. І. Протасова, ст. викладач

ORCID: 0000-0002-8531-9357

О. В. Євсєєв, ст. викладач

ORCID: 0009-0009-3100-2643

Національний університет «Одеська політехніка»

e-mail: s.m.hryhorenko@op.edu.ua

**БІОНІЧНО-ОРІЄНТОВАНИЙ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИЙ
ПЛАНУВАЛЬНИК ПЕРЕМІЩЕННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ
У ДВОВИМІРНОМУ ПРОСТОРИ**

Анотація. Метою роботи є розробка та формалізація біонічно-орієнтованого нейромережевого планувальника, здатного забезпечувати адаптивне та безпечне формування траєкторії руху в умовах невизначеного та динамічного середовища.

Наукова новизна полягає у застосуванні концепції аферентного синтезу як механізму інтеграції сенсорної, навігаційної та цільової інформації.

У роботі виконано формалізацію задачі планування переміщення, запропоновано структуру нейромережевого планувальника, обґрунтовано використання багатопарових і згорткових нейронних мереж. Отримані результати показують, що запропонований підхід забезпечує адаптивне та безпечне переміщення кіберфізичної системи, дозволяє уникати зіткнень із перешкодами та досягати цільової точки у реальному часі.

Практична цінність роботи полягає у можливості застосування розробленого планувальника в інтелектуальних системах управління мобільними кіберфізичними об'єктами, зокрема в умовах динамічного та невизначеного середовища.

Ключові слова: аферентний синтез, біонічний підхід, кіберфізична система, нейромережевий планувальник, планування переміщення, система технічного зору, штучні нейронні мережі.

Постановка проблеми. Сучасний розвиток кіберфізичних систем (КФС) зумовлює необхідність створення ефективних інтелектуальних методів управління їх переміщенням у складних, динамічних та апріорно неформалізованих середовищах. Традиційні алгоритмічні підходи до планування траєкторій, як правило, потребують повної або часткової апріорної інформації про середовище та мають обмежену здатність до адаптації в умовах невизначеності [1]. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває застосування біонічного підходу [2; 3], який дозволяє використовувати принципи функціонування біологічних систем для побудови інтелектуальних моделей поведінки.

Одним із перспективних напрямів є використання нейромережевих моделей, здатних до обробки великих обсягів сенсорної інформації в реальному масштабі часу та формування адаптивних керуючих впливів. Зокрема, поєднання біонічного підходу з нейромережевими технологіями відкриває можливості для створення ефективних планувальників переміщення, здатних забезпечувати безпечну навігацію КФС у середовищах із динамічними перешкодами. Як наслідок, розробка нейромережевого планувальника переміщення на основі біонічних принципів є актуальним науковим і прикладним завданням.



Аналіз останніх досліджень. За останні роки проблематика інтелектуального планування переміщення роботизованих і кіберфізичних систем набула істотного розвитку, насамперед у напрямках поєднання класичних методів планування руху з підходами штучного інтелекту, машинного навчання та нейромережевого управління.

Узагальнення сучасного стану цієї галузі показує, що традиційні алгоритми планування траєкторій, хоча й забезпечують формальну коректність, часто мають обмежену ефективність у динамічних і невизначених середовищах, де критичними є вимоги до адаптивності та роботи в реальному масштабі часу. Це підтверджується сучасними оглядовими дослідженнями з планування руху мобільних роботів авторами у роботі [4], у яких підкреслюється зростання ролі data-driven і learning-based підходів.

Помітне місце в сучасних дослідженнях посідають нейромережеві методи планування та обходу перешкод. Зокрема, у роботі [5] запропоновано підхід до планування траєкторії мобільного робота на основі нейронних мереж і ієрархічного підкріплювального навчання, де показано переваги такого підходу у різних середовищах порівняно з альтернативними алгоритмами.

Паралельно розвивається і напрям біонічно-натхненних рішень. Так автори у 2025 році опубліковано роботу [6], у якій біонічно-орієнтований нейромережевий підхід застосовано для енергоефективного планування руху роботизованих систем із надлишковими ступенями вільності. Це свідчить про збереження наукового інтересу до біонічних принципів як до джерела ефективних моделей поведінки в складному середовищі.

Водночас у сфері кіберфізичних систем сучасні дослідження дедалі частіше розглядають задачі руху, управління та прийняття рішень у ширшому контексті інтеграції сенсорики, обчислень, комунікацій та виконавчих механізмів. Так, у роботі [7] нейромережеві моделі розглядаються як перспективний інструмент для побудови адаптивних механізмів управління і планування, однак проблема спеціалізованого нейромережевого планувальника саме для кіберфізичної системи, побудованого на біонічних засадах і орієнтованого на двовимірний простір із локальною сенсорною картою, висвітлена недостатньо.

Отже, аналіз робіт [4...7] дає змогу зробити висновок, що існуючі підходи переважно розвиваються в одному з трьох напрямів: класичне планування траєкторій, навчання з підкріпленням або «від початку до кінця» нейромережеве уникнення перешкод. Разом із тим недостатньо опрацьованими залишаються питання побудови біонічно-орієнтованого нейромережевого планувальника переміщення кіберфізичної системи, у якому було б поєднано: принципи аферентного синтезу; локальне сенсорне сприйняття середовища на основі вектора відстаней; формування керуючих параметрів у реальному часі; можливість використання різних архітектур нейронних мереж як ядра планувальника. Саме усунення зазначених прогалин і становить предмет даної статті.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою роботи є розробка та формалізація біонічно-орієнтованого нейромережевого планувальника переміщення кіберфізичних систем у двовимірному просторі, здатного забезпечувати адаптивне та безпечне формування траєкторії руху в умовах невизначеного та динамічного середовища.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішуються такі завдання:

- аналіз принципів біонічного підходу до побудови інтелектуальних систем;
- формалізація задачі планування переміщення КФС;
- розробка структури нейромережевого планувальника на основі аферентного синтезу;
- визначення вхідних і вихідних параметрів моделі;
- формування функції рішення та критеріїв безпечного переміщення;
- обґрунтування вибору архітектур нейронних мереж для реалізації планувальника.



Основна частина. Відповідно до робіт [8; 9], сутність біонічного підходу до створення інтелектуальних систем полягає у технічному відтворенні принципів функціонування біологічних систем, які забезпечують адаптивну та «інтелектуальну» поведінку в складному та неформалізованому середовищі. Зазначений підхід ґрунтується на ідентифікації та використанні біологічних аналогій, зокрема результатів нейрофізіологічних і нейрокібернетичних досліджень, спрямованих на вивчення нервової системи людини та тварин. Водночас слід враховувати, що пряме перенесення знань із нейрофізіології до технічного моделювання інтелектуальних систем є обмеженим через надзвичайну складність об'єкта – людського мозку.

Психіка людини як системна властивість високоорганізованої матерії характеризується багаторівневою структурою, у якій значна частина процесів, що забезпечують поведінку, не піддається повному поясненню лише на основі експериментальних нейрофізіологічних даних. Це зумовлює складність побудови систем штучного інтелекту загалом і, зокрема, інтелектуальних планувальників переміщення КФС, які повинні функціонувати в умовах невизначеності та взаємодії з динамічним середовищем.

Авторами встановлено, що значна частина поведінкових реакцій реалізується не на рівні свідомості, а на підсвідомому рівні, причому подібні механізми характерні не лише для людини, а й для більш простих біологічних організмів, таких як ссавці та навіть комахи. Це дозволяє зробити висновок, що при синтезі інтелектуальних систем планування руху КФС доцільно орієнтуватися не на повне відтворення складних когнітивних процесів, а на моделювання базових механізмів цілеспрямованої поведінки.

У цьому контексті доцільним є підхід, що передбачає моделювання реактивної (рефлекторної) поведінки на більш простому нейрофізіологічному рівні, з урахуванням сенсорних даних, зворотного зв'язку та взаємодії КФС із навколишнім середовищем. Даний підхід дозволяє створювати ефективні нейромережеві планувальники переміщення, здатні забезпечувати адаптивну поведінку системи без необхідності повного моделювання складних когнітивних процесів.

На сьогодні сформовано певні уявлення щодо структури та функціонування нервової системи людини й інших біологічних організмів, які лежать в основі формування поведінкових реакцій. Зокрема, встановлено, що фундаментом будь-якої нервової системи є мережа взаємопов'язаних нейронів, які функціонують у паралельному режимі. Незважаючи на відносно невисоку швидкість реакції окремого нейрона (порядку кількох мілісекунд), така організація забезпечує високу ефективність обробки значних обсягів інформації, що надходить від сенсорних рецепторів, та формування керуючих сигналів для виконавчих механізмів у реальному масштабі часу.

Зазначені властивості біологічних систем можуть бути використані як концептуальна основа при розробці інтелектуальних компонентів КФС. У КФС аналогічні функції виконують сенсорні підсистеми, обчислювальні модулі та виконавчі пристрої, які інтегруються в єдину інформаційно-керуючу структуру. Паралельна обробка даних, використання розподілених обчислень і формування керуючих впливів у реальному часі є ключовими характеристиками таких систем.

З урахуванням того, що аферентний синтез і регуляція за результатами є базовими принципами функціонування біологічних систем на різних рівнях організації, доцільно застосувати ці підходи при моделюванні інтелектуальної поведінки КФС. Використання механізмів зворотного зв'язку через взаємодію із зовнішнім середовищем дозволяє формувати адаптивні алгоритми управління та забезпечує корекцію поведінки системи залежно від отриманих результатів.

У такому контексті найпростіша гомеостатична система зі зворотним зв'язком може розглядатися як базова модель інтелектуального планувальника переміщення КФС. Вона відображає ключові функціональні компоненти, зокрема сенсорне сприйняття середовища, інтеграцію різномірної інформації на основі механізму аферентного синтезу, формування рішення

та генерацію керуючих дій (рис. 1). Дана структура забезпечує узгоджене прийняття рішень і дозволяє реалізувати цілеспрямовану та адаптивну поведінку системи в умовах динамічного середовища.

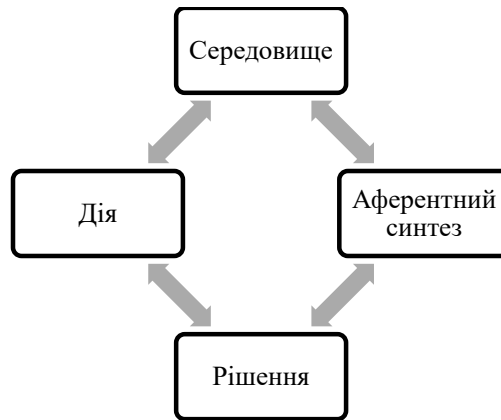


Рис. 1. Функціональна структура інтелектуального планувальника переміщення КФС на основі аферентного синтезу

Запропонована система є спрощеною порівняно з функціональними системами поведінкового рівня, яка включає підсистему аферентного синтезу (САС), реалізовану на основі штучних нейронних мереж, а також спеціалізовану схему прийняття рішень (СПР), розташовану на виході (рис. 2).



Рис. 2. Структурно-функціональна модель нейромережевого планувальника переміщення кіберфізичної системи на основі аферентного синтезу



Рисунок 2 демонструє, що на вхід системи надходить інформація із зовнішнього середовища, яка формується за допомогою системи технічного зору, сенсорних пристроїв та навігаційної підсистеми. Ці дані включають відомості про розташування перешкод, цільових об'єктів та вільного простору, а також параметри поточного стану КФС.

Підсистема САС, реалізована на основі штучної нейронної мережі, виконує обробку вхідної інформації, її узагальнення та формування внутрішнього представлення середовища. На цьому етапі здійснюється інтеграція сенсорних даних, аналіз ситуації та оцінка можливих варіантів руху.

Результати роботи САС передаються до СПР, яка здійснює вибір оптимального керуючого впливу. СПР аналізує альтернативні варіанти переміщення, враховує обмеження середовища та цільові параметри, після чого формує керуючі сигнали для виконавчої підсистеми.

Зазначимо, що виконавча підсистема реалізує обрані дії, забезпечуючи переміщення КФС у просторі. У процесі руху відбувається постійне оновлення інформації про стан середовища, що формує зворотний зв'язок і забезпечує адаптивність системи.

Таким чином, взаємодія САС та СПР у замкнутому контурі управління дозволяє реалізувати інтелектуальне планування переміщення КФС в умовах невизначеності та динамічних змін зовнішнього середовища.

Вхідними даними для підсистеми аферентного синтезу є числові параметри, що характеризують відстані до найближчих перешкод, які надходять від системи технічного зору КФС, а також інформація від вбудованої навігаційної підсистеми. Система технічного зору забезпечує сприйняття навколишнього середовища у вигляді дискретизованого простору, представленого сукупністю ділянок трьох типів: вільних, заборонених та цільових.

Передбачається, що між системою технічного зору та підсистемою САС встановлено однозначну відповідність, за якої кожному елементу зовнішнього середовища відповідає певний нейрон або група нейронів у структурі нейронної мережі. Даний підхід забезпечує коректне відображення просторової інформації у внутрішній моделі середовища, що формується в КФС.

З урахуванням того, що система технічного зору жорстко інтегрована з фізичною складовою КФС, доцільно вважати, що система координат, яка використовується для представлення зовнішнього середовища в моделі САС, також прив'язана до корпусу КФС. Це забезпечує узгодженість між сенсорними даними, внутрішнім поданням середовища та формуванням керуючих впливів у процесі планування переміщення.

Запропонований підхід відрізняється від існуючих тим, що формування шуканої траєкторії переміщення кіберфізичної системи здійснюється, у загальному випадку, шляхом моделювання процесів САС у межах штучної нейронної мережі. Виходячи з цього, даний підхід дозволяє відмовитися від жорстко заданих алгоритмів планування та перейти до адаптивного формування траєкторії на основі поточних даних про стан середовища.

Інформація про взаємне розташування цілі та перешкод інтерпретується як обстановкова аферентація, тоді як факт виявлення цілі сенсорними засобами КФС або її задання через зовнішній канал, наприклад оператором, може розглядатися як пускова аферентація. Це забезпечує інтеграцію як автономних, так і керованих режимів функціонування системи.

Принциповою особливістю підходу є те, що фіксація елементарного кроку переміщення здійснюється не у зовнішньому представленні середовища, а у внутрішніх станах кіберфізичної системи. Даний механізм дозволяє формувати траєкторію як послідовність станів системи, що забезпечує більш гнучке та адаптивне управління рухом.

Висока швидкодія системи технічного зору та нейромережевої підсистеми аферентного синтезу забезпечує можливість оперативної обробки інформації та швидкого реагування на зміни в середовищі. Виходячи з цього, система управління своєчасно виявляє динамічні перешкоди та формує коригувальні керуючі впливи з метою їх безпечного обходу.

Запропонований підхід забезпечує підвищення адаптивності та ефективності планування переміщення КФС в умовах невизначеного та динамічного середовища.

Як засіб оцінювання обстановки під час переміщення КФС у середовищі використовується система технічного зору, реалізована на основі багатопроменевого локатора фронтального огляду [9; 10]. З метою спрощення задачі обробки сенсорної інформації приймемо, що замість повного просторово-часового розподілу інтенсивностей відбитого сигналу локатор формує дискретний у часі вектор значень відстаней до виявлених перешкод. За таких припущень як базовий сенсор може бути використаний багатопроменевий лазерний далекомір (лідар) обмеженої дальності дії.

Нехай зона локальної видимості лідара визначається такими параметрами: максимальна дальність виявлення перешкод $0 \dots D_{\max}$ (в експериментальних умовах – до 5 м), кут розкриття діаграми спрямованості Ω (91°), ширина окремого променя λ (1°) та кількість променів $N = \Omega/\lambda$. Зазначена авторами конфігурація забезпечує формування дискретизованого представлення навколишнього середовища у вигляді множини напрямів спостереження, для кожного з яких визначається відповідна відстань до перешкоди.

Модельне подання діаграми спрямованості багатопроменевого лідара та відповідного вектора відстаней наведено на рис. 3. У кожному промені визначається енергетичний центр відбитого сигналу, що відповідає найближчій перешкоді у даному напрямку.

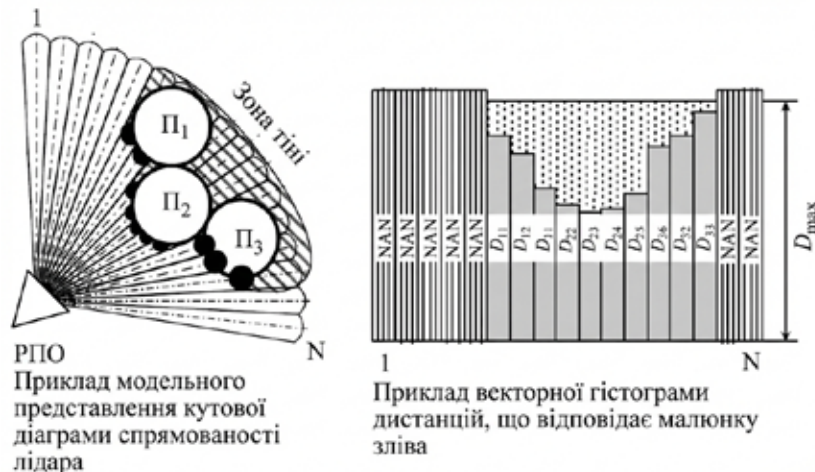


Рис. 3. Модель діаграми спрямованості багатопроменевого лідара та відповідного вектора відстаней до перешкод

Для спрощення моделі, авторами введено припущення про однакові відбивні властивості всіх перешкод, а також про відсутність впливу середовища на поширення сигналу, зокрема розсіювання та поглинання. За таких умов вважається, що виміряні значення відстаней є точними, а відбитий сигнал – достовірним і не містить шумів або просторово-часових спотворень.

У випадку відсутності відбитого сигналу в окремому променевому каналі або при фіксації сигналу з потужністю нижче встановленого порогового рівня, відповідному елементу вектора відстаней присвоюється спеціальне значення, що інтерпретується як відсутність перешкоди в межах зони видимості. Таке значення може бути формалізовано як нескінченність або позначене як NAN.

Передбачається, що формування вектора відстаней багатопроменевим локатором здійснюється за запитом від системи управління КФС. Запити до лідара генеруються періодично у процесі переміщення КФС під дією її виконавчої підсистеми з метою досягнення про-



гнозованого положення із заданою точністю ξ . При цьому опитування сенсора виконується на початку кожного циклу функціонування інтелектуальної системи позиційно-траєкторного управління.

Розроблюваний нейромережевий планувальник повинен забезпечувати обробку в реальному масштабі часу даних, що формуються лідаром і представлені у вигляді вектора відстаней до виявлених перешкод. На основі цієї інформації, а також з урахуванням поточного положення КФС, планувальник має обчислювати параметри безпечного напрямку переміщення, які передаються до позиційно-траєкторного регулятора з урахуванням прогнозу на найближчий часовий інтервал.

Під безпечним переміщенням у даному контексті розуміється забезпечення руху КФС без зіткнень із перешкодами в процесі виконання траєкторії, що досягається шляхом оперативного аналізу сенсорної інформації та формування коригувальних керуючих впливів.

Після завершення кожного циклу роботи планувальник обчислює та передає до регулятора значення матриці коефіцієнтів A_{ij} , а також параметр напрямку руху φ . Додатково можуть передаватися значення параметра режиму руху ξ (де $\xi = 0$ відповідає позиційному управлінню, а $\xi = 1$ – руху із заданою швидкістю), рекомендована курсова лінійна швидкість V_k та обмеження на кутові швидкості виконавчих механізмів. У свою чергу, навігаційна підсистема після виконання керуючих впливів формує зворотний зв'язок, передаючи планувальнику актуальні значення декартових координат положення КФС (p_1, p_2) , які використовуються для наступного циклу планування.

Процес переміщення триває до моменту досягнення цільової точки з координатами (p_1^k, p_2^k) , що визначає завершення задачі планування.

Розробка планувальника здійснюється на основі формально-логічного підходу з використанням штучних нейронних мереж, відповідно до принципів біонічного підходу до створення інтелектуальних систем, розглянутих раніше. З метою оцінювання ефективності пропонується розглянути різні архітектури нейромереж, зокрема слабкозв'язані багатопшарові нейронні мережі регулярного типу, а також згорткові нейронні мережі [11]. У зв'язку з цим розроблюваний планувальник класифікується як нейромережевий.

Для формалізації задачі синтезу нейромережевого планувальника переміщення КФС у двовимірному просторі введемо множину вхідних, вихідних та внутрішніх параметрів системи.

1. Вектор вхідних даних. На кожному циклі функціонування планувальника від сенсорної та навігаційної підсистем надходить інформація про стан середовища та поточний стан КФС. Узагальнений вектор вхідних даних можна подати у вигляді:

$$x(t) = [d_1(t), d_2(t), \dots, d_N(t), p_1(t), p_2(t), p_1^k, p_2^k, V(t), \theta(t)]^T, \quad (1)$$

де $d_i(t)$ – значення відстані до найближчої перешкоди в i -му променевому каналі лідара, $i=1, \dots, N$;

N – кількість променів лідара;

$p_1(t), p_2(t)$ – поточні декартові координати КФС;

p_1^k, p_2^k – координати цільової точки;

$V(t)$ – поточна лінійна швидкість КФС;

$\theta(t)$ – поточний кут орієнтації КФС у площині.

Зазначимо, що у разі потреби до складу вхідного вектора можуть бути включені додаткові параметри, зокрема кутова швидкість, безпечна дистанція, тип режиму руху або ознаки динамічності середовища.

2. Внутрішнє подання стану середовища. Вектор сенсорних спостережень $d(t) = [d_1(t), d_2(t), \dots, d_N(t)]^T$ формує локальну карту сприйняття середовища в системі координат,



жорстко пов'язаній із корпусом КФС. Дана карта є основою для побудови внутрішнього образу зовнішнього середовища в підсистемі аферентного синтезу.

Цільовий вектор відносного положення може бути заданий як $g(t) = \begin{bmatrix} p_{k1}-p_1(t) \\ p_{k2}-p_2(t) \end{bmatrix}$, а евклідова відстань до цілі визначається за формулою:

$$p(t) = \sqrt{(p_1^k - p_1(t))^2 + (p_2^k - p_2(t))^2}, \quad (2)$$

Кут на ціль відносно поточного положення КФС: $\alpha(t) = \text{atan2}(p_2^k - p_2(t), p_1^k - p_1(t)) - \theta(t)$.

3. Функція рішення нейромережевого планувальника. Нейромережевий планувальник реалізує нелінійне відображення вхідного простору ознак у простір керуючих параметрів:

$$u(t) = F_{NN}(x(t); W), \quad (3)$$

де F_{NN} – нейромережева функція рішення;

W – множина вагових коефіцієнтів і параметрів мережі;

$u(t)$ – вектор вихідних параметрів планувальника.

У загальному випадку вектор виходу може бути поданий як:

$$u(t) = [\varphi(t), V_k(t), \xi(t), A_{11}(t), \dots, A_{ij}(t)], \quad (4)$$

де $\varphi(t)$ – рекомендований кут безпечного напрямку руху;

$V_k(t)$ – рекомендоване значення курсової лінійної швидкості;

$\xi(t)$ – параметр режиму руху;

$A_{ij}(t)$ – елементи матриці параметрів, що передається до позиційно-траєкторного регулятора.

У спрощеному випадку функція рішення може зводитися лише до визначення напрямку та

швидкості $u(t) = \begin{bmatrix} \varphi(t) \\ V_k(t) \end{bmatrix} = F_{NN}(x(t))$.

4. Умова безпечного переміщення. Безпечний напрямок руху повинен забезпечувати відсутність зіткнення КФС з перешкодами в межах прогнозованого горизонту планування. Формально це можна подати як умову $r(\tau, \varphi(t)) \notin \Omega_{obs}, \forall \tau \in [t, t + \Delta t]$ де $r(\tau, \varphi(t))$ – прогнозована траєкторія КФС при русі в напрямку $\varphi(t)$, Ω_{obs} – область, зайнята перешкодами, а Δt – горизонт прогнозування.

Додатково повинна виконуватися умова зменшення відстані до цілі: $\rho(t + \Delta t) < \rho(t)$ – обране рішення має не лише забезпечувати безпечність, а й сприяти досягненню цільової точки.

5. Цільова функція планування. Роботу планувальника можна описати через мінімізацію функціонала, який враховує відхилення від цілі, близькість до перешкод і плавність руху:

$$J = w_1 \rho(t + \Delta t) + w_2 \Psi_{obs}(t) + w_3 |\Delta \varphi(t)| \rightarrow \min, \quad (5)$$

де w_1, w_2, w_3 – вагові коефіцієнти;

$\Psi_{obs}(t)$ – функція штрафу за наближення до перешкод;

$\Delta \varphi(t)$ – зміна кута руху між сусідніми циклами.

Виходячи із вище наведеного, нейромережевий планувальник повинен формувати таке рішення, яке одночасно забезпечує безпечність, цілеспрямованість і плавність переміщення КФС.

Запропонована формалізація дозволяє подати задачу нейромережевого планування переміщення КФС як задачу нелінійного відображення сенсорної, навігаційної та цільової інформації у вектор керуючих параметрів. Такий підхід створює основу для подальшого синтезу архітектури нейромережі, вибору критеріїв навчання та оцінювання ефективності планувальника в умовах динамічного середовища.



В узагальненому вигляді вихідні дані для побудови нейромережевого планувальника переміщення КФС доцільно систематизувати у вигляді таблиці 1. При цьому як критерії оцінювання ефективності застосування такого планувальника у складі інтелектуальної системи позиційно-траєкторного управління слід використовувати показники якості функціонування, визначені на попередніх етапах дослідження.

Таблиця 1

Вихідні дані для розв'язання задачі синтезу нейромережевого планувальника переміщення кіберфізичної системи

Параметр	Значення
Вихідні дані	Положення цілі, дані від системи технічного зору (зокрема лазерного далекоміра/лідара), поточне положення КФС
Вихідні дані	Необхідний кут зміни напрямку руху КФС, рекомендована швидкість переміщення КФС або прогнозовані координати її нового положення
Розмірність координатного представлення зовнішнього середовища	Двовимірне
Тип представлення простору зовнішнього середовища	Декартова система координат
Вимоги до режиму роботи	Планування в реальному масштабі часу, досягнення цільової точки за скінченний час
Модель представлення перешкод	Допускається апроксимація об'єктів середовища опуклими геометричними фігурами
Формування траєкторії	Забезпечення можливості локального або глобального планування переміщення, зокрема вздовж близької до найкоротшої траєкторії
Тип інтеграції з об'єктом управління	Вбудований у структуру інтелектуальної системи позиційно-траєкторного управління КФС
Формально-логічна основа ядра планувальника	Нейроподібні мережі прямого поширення

Наведені у табл. 1 характеристики визначають загальні вимоги до побудови нейромережевого планувальника переміщення КФС та формують основу для подальшого синтезу його структури. Особливого значення набуває забезпечення функціонування в реальному масштабі часу, оскільки саме ця вимога визначає доцільність використання нейромережевих моделей як інструменту швидкої обробки сенсорних даних і формування керуючих впливів.

Використання двовимірного декартового представлення середовища та апроксимація перешкод опуклими геометричними об'єктами дозволяють спростити задачу планування без втрати її прикладної значущості. Водночас інтеграція планувальника безпосередньо у контур позиційно-траєкторного управління забезпечує узгодженість між сенсорним сприйняттям, прийняттям рішень і виконанням руху.

Таким чином, систематизація вихідних даних дає змогу сформулювати цілісне уявлення про функціональні вимоги до нейромережевого планувальника та створює основу для подальшого вибору архітектури нейронної мережі, методів її навчання й критеріїв оцінювання ефективності.

Висновки. У роботі запропоновано підхід до синтезу нейромережевого планувальника переміщення КФС, що базується на використанні біонічних принципів організації поведінки. Обґрунтовано, що застосування концепції аферентного синтезу дозволяє інтегрувати сенсорну інформацію, дані про поточний стан системи та цільові параметри в єдину узгоджену модель прийняття рішень, що є важливим для забезпечення адаптивної поведінки в умовах невизначеного середовища.



Розроблена формалізація задачі планування переміщення дозволяє представити процес управління як задачу нелінійного відображення вхідних параметрів у простір керуючих впливів. Запропонована структура планувальника, яка включає підсистему аферентного синтезу та схему прийняття рішень, забезпечує можливість функціонування системи в реальному масштабі часу та ефективну обробку сенсорної інформації.

Показано, що використання нейромережових моделей, зокрема багат шарових та згорткових нейронних мереж, сприяє підвищенню ефективності обробки даних і забезпечує адаптивність процесу планування переміщення в умовах динамічних змін середовища. Запропонований підхід дозволяє реалізувати безпечно переміщення КФС шляхом уникнення зіткнень із перешкодами та досягнення цільової точки за скінченний час.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення можливостей запропонованої моделі, зокрема на її адаптацію до тривимірних середовищ та більш складних сценаріїв руху. Важливим напрямом є врахування невизначеності та зашумленості сенсорних даних, що дозволить підвищити стійкість системи до реальних умов експлуатації. Перспективним також є інтеграція методів підкріплювального навчання з метою підвищення адаптивності та автономності прийняття рішень.

Водночас, потребує подальшого дослідження ефективність різних архітектур нейронних мереж і гібридних моделей у контексті задач планування переміщення КФС. Важливим практичним етапом є реалізація та експериментальна апробація розробленого планувальника на реальних кіберфізичних платформах. Також доцільно враховувати енергетичні та ресурсні обмеження системи, що дозволить підвищити ефективність її функціонування та забезпечити оптимальне використання обчислювальних ресурсів.

Список використаних джерел

1. Костенко В. Аналіз методів та алгоритмів планування траєкторій для групового застосування БПЛА *Measuring and computing devices in technological processes*. 2025. 10.31891/2219-9365-2025-83-42.
2. Чечель Т. О., Носова Т. В. Метод розробки біонічного підходу до ендопротезування фалангового суглобу кисті людини. *Інформаційні технології і автоматизація – 2024* : матеріали XVII міжнародної науково-практичної конференції, 31 жовтня – 1 листопада 2024 р. Одеса : Видавництво ОНТУ, 2024 р. С. 809–81. URI: <https://openarchive.nure.ua/handle/document/29231>.
3. Шинський О. Й., Калюжний П. Б., Дорошенко В. С. Біонічний підхід до виготовлення литих легковагих металоконструкцій для будівництва споруд модульного типу. *Процеси лиття*, 2022. № 150 (4). <https://doi.org/10.15407/plit2022.04.063>.
4. Dong Lu, He Z., Song C., Sun C. A review of mobile robot motion planning methods: from classical motion planning workflows to reinforcement learning-based architectures. *Arxiv*. 2022. № 4. URI: https://arxiv.org/abs/2108.13619?utm_source=chatgpt.com.
5. Yu J., Su Y., Liao Y. The Path Planning of Mobile Robot by Neural Networks and Hierarchical Reinforcement Learning. *Front. Neurorobot.* 2020. Vol. 142020. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2020.00063>.
6. She J., Xiang F., Xu B., Chen L., Wang Y., Liu N., Zou W., Ma G., Yu B., Ba K. Bionic Energy-Efficient Inverse Kinematics Method Based on Neural Networks for the Legs of Hydraulic Legged Robots. *Biomimetics* 2025, № 10(6), 403. <https://doi.org/10.3390/biomimetics10060403>.
7. Liu W., Zhang M., Xu Q., Xie L. Survey on data-driven control and its application in cyber-physical energy systems. *Cyber-Physical Energy Systems*. 2025. Vol. 1, Issue 1, Pp. 28–48. <https://doi.org/10.1016/j.cpes.2025.08.004>.
8. Бець С.М. Біоніка та дизайн інтер'єру. Використання біологічних методів та структур для формування гармонійного середовища. *Theory and practice of design*. 2022. 10.18372/2415-8151.25.16791.
9. Радіолокатор бічного огляду. URI: <https://www.radartutorial.eu/20.airborne/ab06.uk.html>.
10. Introduction to SAR. URI: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/3.4/help/analysis/image-analyst/introduction-to-synthetic-aperture-radar.htm>.



11. Sveleba S., Brygilevych V., Katerynychuk I., Kuno I., Karpa I., Semotiuk O., Shmyhelskyi Y., Sveleba N. Multilayer neural networks – as determined systems. *JCPPEE*. 2021; Vol. 11, № 2: pp. 26–31. <https://doi.org/10.23939/jcppee2021.02.026>.

Дата першого надходження статті до видання: 24.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 25.05.2026

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



S. Hryhorenko, L. Protasova, O. Yevseiev

National University “Odesa Polytechnic”

BIONIC-BASED NEURAL NETWORK MOTION PLANNER FOR A CYBER-PHYSICAL SYSTEM IN A TWO-DIMENSIONAL SPACE

Summary

This paper presents a bionic-based approach to the synthesis of a neural network motion planner for a cyber-physical system operating in a two-dimensional space. The proposed method is grounded in the principles of afferent synthesis, which enable the integration of heterogeneous information, including sensory data, system state parameters, and target coordinates, into a unified decision-making framework. Such an approach allows the system to exhibit adaptive and goal-oriented behavior in environments characterized by uncertainty and dynamic changes.

The motion planning problem is formalized as a nonlinear mapping from the input space, defined by lidar-based distance measurements, navigation data, and goal position, to the output space of control parameters. These parameters include the desired direction of motion, velocity, and additional control coefficients required for trajectory execution. The planner operates in real time, ensuring timely processing of incoming data and rapid response to environmental changes, including the appearance of dynamic obstacles.

The architecture of the planner incorporates artificial neural networks as its computational core, with particular attention given to both multilayer feedforward networks and convolutional neural networks. Their applicability is justified by their ability to efficiently process high-dimensional sensory inputs and to generalize complex nonlinear dependencies between environmental states and control actions.

The proposed approach enables safe navigation by preventing collisions and ensuring convergence to the target point within a finite time. It also provides a flexible framework for integrating autonomous and operator-driven control modes. The obtained results demonstrate the potential of combining bionic principles with neural network models for the development of intelligent motion planning systems in cyber-physical environments.

Keywords: cyber-physical system, neural network planner, bionic approach, afferent synthesis, motion planning, artificial neural networks, vision system.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-2-6>

УДК 004.932:004.93'1:004.272

Є. В. Місько, аспірант

ORCID: 0009-0008-6719-2701

Державний університет імені Івана Франка

e-mail: misko-y@zu.edu.ua

АРХІТЕКТУРНІ ПІДХОДИ ДО РОЗШИРЕННЯ КІНЕМАТИКИ ПЕРСОНАЖА В СЕРЕДОВИЩІ UNREAL ENGINE

Анотація. У статті досліджено архітектурні обмеження базового класу `UCharacterMovementComponent` в Unreal Engine. Виявлені обмеження критичні для мережевих систем, де непередбачувані розриви кінематики ускладнюють алгоритми екстраполяції та компенсації затримки. Запропоновано підхід, заснований на перехопленні фізичних розрахунків під час колізії та використанні векторної алгебри замість непередбачуваної фізики твердих тіл. Розроблено математичну модель збереження імпульсу: використовуючи скалярний та векторний добуток нормалі поверхні, алгоритм обчислює дотичну траєкторію без втрати початкової швидкості. Сформульовано диференціальну модель контролю швидкості (Soft Cap), яка замінює базовий ліміт `MaxWalkSpeed` на алгоритм постійного асимптотичного зниження імпульсу. Інтеграція методу з проекцією вектора гравітації дозволила реалізувати фізично коректне накопичення інерції залежно від топології рівня. Практична імплементація довела перевагу Data-Driven підходу, забезпечивши збереження плавності кінематичних функцій та повну алгоритмічну керованість поведінки контролера.

Ключові слова: Unreal Engine, архітектура програмних рушіїв, кінематика персонажа, векторна алгебра, збереження імпульсу, локомоція, розробка систем.

Постановка проблеми. У проектуванні динамічних систем руху персонажа (локомоції) головним інженерним питанням є детерміноване управління кінематикою, яке безпосередньо впливає на чутливість керування (responsiveness) та узгодженість станів у розподіленому середовищі. Компонент руху є зв'язком між дискретним введенням користувача та неперервною зміною стану об'єкта в тривимірному просторі. Питання полягає у вирішенні конфлікту між швидкістю реакції на керування (responsiveness) та необхідністю підтримки реалістичної траєкторії руху. Для динамічних проектів, де динамічна система базується на інерції (momentum-based movement), система повинна не просто переміщувати об'єкт, а й коректно зберігати та трансформувати його кінетичну енергію під час взаємодії з оточенням.

У сучасних програмних рушіях, зокрема в Unreal Engine, локомоція зазвичай спирається на кінематичні контролери (Character Controllers), а не на повну динамічну симуляцію твердих тіл (Rigid Body Dynamics). Такий підхід потрібен для абсолютного контролю над поведінкою персонажа та детермінованості обчислень для алгоритмів мережевої синхронізації [1–3]. Використання кінематичних перевірок дозволяє уникнути типових проблем фізичних рушіїв, як нумерична нестабільність симуляції (jittering) та недетерміновані реакції при зіткненні, проте воно накладає суворі обмеження на обробку імпульсів.

Базовий модуль Unreal Engine – клас `UCharacterMovementComponent` (СМС) – це складна система, оптимізована під стандартні сценарії: ходьбу, біг та прості стрибки. Проте внутрішня логіка СМС має спрямованість на стандартні кінематичні моделі ухил. Наприклад, під час обробки зіткнень із вертикальними поверхнями рушій застосовує функцію `SlideAlongSurface`, яка автоматично обнуляє вектор швидкості, спрямований у бік перешкоди. Для користувача це виглядає як миттєва зупинка при торканні стіни під гострим кутом, що повністю руйнує кінематичний процес у проектах, де локомоція має бути безперервною.



Стандартна реалізація обмежень швидкості в СМС працює за принципом примусового обрізання (Hard Clamp). Як тільки швидкість перевищує ліміт $MaxWalkSpeed$, система примусово обрізає вектор, не враховуючи джерела прискорення. У контексті розробки розширеної кінематики, такої як Wallrun або високошвидкісне ковзання, такі обмеження стають критичним бар'єром. Виникає потреба в модифікації життєвого циклу оновлення стану персонажа (Physics Tick), де розробник може втрутитися в розрахунки до того, як рушій застосовує свої стандартні методи гасіння інерції. Це вимагає розробки архітектурних надбудов, які дозволять системі динамічно розрізняти типи поверхонь та адаптувати вектори руху в реальному часі, зберігаючи при цьому цілісність колізійної моделі.

Аналіз останніх досліджень. Проблематика розширення кінематики віртуального персонажа активно розглядається. В офіційній документації Epic Games детально описано принципи функціонування базового класу `UCharacterMovementComponent` (СМС) [4, 5]. Зазначається, що стандартна модель непружних зіткнень рушія застосовує алгоритм ковзання вздовж поверхні, який автоматично відсікає вектор швидкості, перпендикулярний до перешкоди.

У дослідженнях S. Prasanth розглядається вибір між Rigid Body та кінематичними контролерами [6]. Доведено, що фізичні системи на базі сил часто виявляються непередбачуваними, оскільки на них впливають невеликі неточності кроку симуляції. Такі фізичні симуляції також важливо передбачити (екстраполювати) [7–9]. Натомість Data-Driven підхід із жорстким маніпулюванням векторами швидкості залишається стандартом індустрії [10].

Підходи до створення відчуття інерції без використання чистої фізики мас описані в матеріалах GDC на прикладі розробки обчислювального середовища Mirror's Edge [11]. Ключовим фактором названо алгоритмічне збереження кінетичної енергії на рівні векторів. Еволюція підходів до локомоції в Unreal Engine також стимулювала розробку нового експериментального плагіна Mover [12], який пропонує модульну систему станів замість монолітного коду СМС.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Мета роботи полягає у формулюванні архітектурних розширень базового компонента руху Unreal Engine для подолання його кінематичних обмежень та забезпечення детермінованого збереження імпульсу умовного віртуально гоперсонажа. Це передбачає створення алгоритмів збереження імпульсу та впровадження детермінованих моделей контролю швидкості, що дозволяють обійти обмеження стандартних кінематичних контролерів без переходу до високонавантажених симуляцій фізики твердих тіл.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі архітектурні проблемні моменти на рівні базового компонента руху ігрового рушія:

1. Дослідити механізм імпульсного гасіння вбудованого контролера руху при взаємодії з вертикальною геометрією та сформулювати модель, яка забезпечує детерміноване збереження кінетичної енергії при виконанні маневру – Wallrun.
2. Замінити базове жорстке обрізання швидкості системним лімітом $MaxWalkSpeed$ на алгоритмічну модель поступового зниження імпульсу (Soft Cap).
3. Розробити алгоритм перевірки простору для безпечної динамічної зміни розмірів колізійного обмежувача під час трансформацій (Shape-shifting), усунувши ризик проникнення крізь геометрію.

Основна частина. Аналіз обмежень базової архітектури `UCharacterMovementComponent`. Підсистема руху в Unreal Engine працює за принципом дискретних часових кроків. Ключовим вузьким місцем для динамічної локомоції є фаза виконання руху. Під час переміщення об'єкта рушій використовує геометричне зондування (Capsule Sweep). Якщо фіксується зіткнення, алгоритм перераховує вектор швидкості, видаляючи всю кінетичну енергію, що спрямована в бік перешкоди. При взаємодії зі стіною під гострим кутом це призводить до майже повної зупинки персонажа.



Алгебраїчна модель збереження імпульсу (Wallrun). Для реалізації механіки бігу по стіні зі збереженням інерції розроблено алгоритм перехоплення розрахунків у кадрі реєстрації колізії (Impact Frame) [10]. Ініціація стану відбувається через аналіз геометрії перешкоди. Система вилучає вектор нормалі поверхні стіни. Для перевірки кута наближення обчислюється скалярний добуток між вектором погляду та нормаллю стіни.

Основою алгоритму є знаходження дотичної траєкторії. Для цього застосовується векторний добуток (Cross Product) нормалі стіни та світового вектора вертикалі (Up Vector) [13]. Отриманий дотичний вектор вказує напрямком вздовж стіни. Оскільки він може бути спрямований у протилежний бік, виконується скалярне порівняння зі старим вектором швидкості користувача.

Відновлення кінетичної енергії відбувається шляхом множення нормалізованого дотичного вектора на модуль швидкості, що існував до удару. Додатково в алгоритм інтегровано вектор компенсації мікрівдривів. До загального вектора швидкості додається локальна сила, спрямована проти нормалі стіни, що надійно притискає колізійну капсулу до поверхні.

Диференціальна модель деградації імпульсу (Soft Cap). Базовий клас руху використовує жорстке обрізання: якщо швидкість перевищує MaxWalkSpeed, модуль вектора миттєво прирівнюється до ліміту (Hard Clamp). Для розв'язання цієї проблеми розроблено підсистему поступового гасіння швидкості (Soft Cap). Замість жорсткого присвоєння використовується диференціальний алгоритм лінійної інтерполяції. Якщо швидкість перевищує ліміт, система розраховує нову цільову швидкість з урахуванням часу кадру та коефіцієнта деградації. Це забезпечує плавне зниження швидкості.

Поведінка контролера на схилах інтегрована з цією моделлю. Алгоритм проектує вектор гравітації на нормаль підлоги, отримуючи вектор гравітаційного ковзання. Скалярний добуток цього вектора з напрямком руху визначає контекст топології. При русі вниз до вектора швидкості додається прискорення, а коефіцієнт деградації обнуляється, імітуючи відсутність тертя. При русі вгору активується підвищений коефіцієнт гальмування.

Топологічна валідація при зміні габаритів (Shape-shifting). Динамічне розширення колізійного обмежувача (збільшення CapsuleHalfHeight) часто створює просторові проблеми. Базова реакція рушія на такий стан – агресивне виштовхування об'єкта, що призводить до провалювання крізь геометрію.

Проблема вирішується імплементацією предиктивної перевірки простору. Перед фактичною зміною параметрів колізії логіка контролера викликає метод геометричного тестування (OverlapBlockingTestByChannel). Система віртуально проектує збільшену капсулу у поточні координати персонажа. Трансформація превентивно відхиляється, якщо функція повертає наявність перетину з геометрією.

Методологія та результати експериментів. Для верифікації розроблених архітектурних підходів було створено тестовий полігон у середовищі Unreal Engine. Об'єктом дослідження виступав модифікований компонент UCharacterMovementComponent. Важливо було порівняння збереження кінетичної енергії між базовою моделлю локомоції (Default CMC) та розширеною архітектурою (Extended CMC із застосуванням векторного Wallrun та Soft Cap).

Експеримент проводився при частоті оновлення 60 Гц. Базова максимальна швидкість (MaxWalkSpeed) була встановлена на позначці 600 одиниць (uu/s). Тестовий маршрут включав розгін, стрибок під кутом 45 градусів на вертикальну площину та приземлення на схил із кутом 30 градусів. Заміри вектора швидкості проводилися у трьох фазах. Результати профілювання наведені у таблиці (табл. 1).



Таблиця 1

Порівняльний аналіз збереження кінетичної енергії
у базовій та розширеній архітектурі локомотиву

Фаза тестування	Базова архітектура (Default CMC)	Розширена архітектура (Extended CMC)
Швидкість перед зіткненням	600 uu/s	600 uu/s
Швидкість вздовж стіни (Wallrun)	185 uu/s (Втрата 31 % інерції)	598 uu/s (Втрата 0.4 % інерції)
Приземлення на схил (0.0 сек)	210 uu/s (Швидкість падіння)	650 uu/s (Імпульс збережено)
Рух по схилу вниз (через 1.0 сек)	600 uu/s (Спрацював Hard Clamp)	940 uu/s (Робота Soft Cap)

Згідно з результатами, базова архітектура автоматично поглинає 69 % кінетичної енергії через застосування непружної колізії. При подальшому русі по схилу швидкість миттєво обмежується дефолтним лімітом (600 uu/s). Застосування розробленої моделі дозволило зберегти 99,6 % початкового імпульсу під час проходження вздовж стіни. На похилій поверхні алгоритм Soft Cap продемонстрував здатність накопичувати інерцію (швидкість зросла до 940 uu/s) без розривів кінематичної функції.

Висновки. Проведене дослідження підтверджує, що базова архітектура компонента руху в Unreal Engine має серйозні обмеження для систем високодинамічної локомотиву. Вбудовані алгоритми обробки колізій неминуче призводять до втрати інерції персонажа. Запропоновані архітектурні підходи дозволяють обійти ці обмеження. Перехоплення розрахунків у момент колізії та застосування векторного аналізу простору забезпечило збереження майже 100 % кінетичної енергії при контакті з перешкодами. Інтеграція моделі поступового зниження імпульсу адаптувала кінематику до топології рівня, реалізувавши фізично-коректне ковзання на похилих поверхнях із приростом швидкості до 56 % понад базовий ліміт. Цей алгоритмічний підхід значно кращий за непередбачувану фізику твердих тіл при розробці контролерів персонажа. Перспективи подальших розвідок у даному напрямку полягають у декомпозиції розроблених алгоритмів для їх інтеграції в масові багатокористувацькі репліковані середовища, а також в оптимізації серверної частини коду задля забезпечення високої детермінованості станів у системах із великою кількістю одночасних підключень.

Список використаних джерел

1. Клейпул М., Клейпул К. Затримка та дії гравця в онлайн-іграх. *Communications of the ACM*. 2006. Т. 49, № 11. С. 40–45. DOI: <https://doi.org/10.1145/1167838.1167860>
2. Лю С. та ін. Огляд та таксономія методів компенсації затримки для мережевих комп'ютерних ігор. *ACM Computing Surveys*. 2022. Т. 54, № 11s. С. 1–34. DOI: <https://doi.org/10.1145/3519023>
3. Мотоо Т. та ін. Компенсація мережевої затримки на стороні клієнта для онлайн-шутерів. *IEEE Access*. 2021. Т. 9. С. 125674–125689. URL: <https://scispace.com/pdf/client-side-network-delay-compensation-for-online-shooting-4m5jqc0ica.pdf>
4. Компонент руху персонажа. Документація Unreal Engine. *Epic Developer Community*. URL: <https://dev.epicgames.com/documentation/unreal-engine/movement-components-in-unreal-engine> (дата звернення: 10.04.2026).
5. Довідник API Unreal Engine. Клас UCharacterMovementComponent. URL: <https://dev.epicgames.com/documentation/unreal-engine/API/Runtime/Engine/UCharacterMovementComponent> (дата звернення: 14.04.2026).
6. Прасант С. Великі дебати: RigidBody проти Character Controller для руху гравця в Unity. *Medium*. 2023. URL: <https://sivakumar-prasanth.medium.com/the-great-debate-rigidbody-vs-character-controller-for-player-movement-in-unity-c551a52ff340>
7. Фідлер Г. Мережева фізика. *Gaffer On Games*. 2014. URL: <https://gafferongames.com/categories/networked-physics/>



8. Харитонов В. Ю. Адаптивний алгоритм екстраполяції для спільних віртуальних середовищ. *Proceedings of the 11th ACM SIGGRAPH International Conference*. 2012. С. 255–261.
9. Хамаданіан П. та ін. Екхо: Синхронізація медіа в хмарних іграх між декількома кінцевими точками. *ACM SIGCOMM 2023 Conference*. 2023. С. 1–17.
10. Векторна математика для початківців геймдеву. *Game Developer*. URL: <https://www.gamedeveloper.com/programming/vector-maths-for-game-dev-beginners>
11. О'Коннор Р. Створення руху від першої особи для Mirror's Edge. *GDC Vault*. 2017. URL: <https://gdcvault.com/play/1387/Creating-First-Person-Movement-for>
12. Особливості та концепції плагіна Mover в Unreal Engine. *Epic Games Developers*. URL: <https://dev.epicgames.com/documentation/unreal-engine/mover-features-and-concepts-in-unreal-engine>
13. Березький О. В. Методи та алгоритми комп'ютерної графіки в інформаційних системах. Тернопіль : ТНЕУ, 2018. 240 с.

Дата першого надходження статті до видання: 24.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 25.05.2026

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



Ye. Misko

Zhytomyr Ivan Franko State University

ARCHITECTURAL APPROACHES TO EXTENDING CHARACTER KINEMATICS IN THE UNREAL ENGINE ENVIRONMENT

Summary

The article examines the architectural limitations of the base class `UCharacterMovementComponent` in Unreal Engine, specifically concerning complex kinematic movements and momentum preservation. While highly optimized for standard bipedal locomotion, this component exhibits rigid constraints during high-velocity, physics-based interactions. The identified limitations are critical for multiplayer networked systems, where unpredictable kinematic discontinuities and hard-coded collision responses severely complicate server-side extrapolation and client-side latency compensation algorithms, often leading to visual desynchronization in fast-paced scenarios.

To address these fundamental issues, an innovative architectural approach is proposed based on intercepting low-level physical calculations during collision events. Instead of relying on the engine's default, often unpredictable rigid body dynamics for character collision resolution, the proposed architecture utilizes precise vector algebra. A robust mathematical model of momentum preservation has been developed and integrated into the custom movement logic. By using the scalar and vector products of the impacted surface normal, the algorithm calculates the optimal tangent trajectory. This allows the virtual character to glide along complex geometry without the abrupt loss of initial kinetic energy that typically occurs in the base engine implementation upon hitting an obstacle.

Furthermore, a differential speed control model, defined as a “Soft Cap,” was formulated. This model systematically replaces the basic `MaxWalkSpeed` absolute limit, which traditionally truncates velocity vectors instantly and artificially. Instead, the Soft Cap employs an algorithm for the constant asymptotic reduction of momentum. This allows characters to temporarily exceed standard speed limits while smoothly decaying the excess velocity over time, drastically improving the fluidity of mechanics. Integrating this method with continuous gravity vector projection allowed for physically correct inertia accumulation strongly dependent on the level's topology, dynamically translating gravitational pull into forward momentum on descents.

Practical implementation proved the significant superiority of the Data-Driven approach. It ensures absolute smoothness of kinematic functions and full algorithmic controllability of the controller's behavior, providing a highly scalable foundation for modern, movement-intensive mechanics.

Keywords: Unreal Engine, game engine architecture, character kinematics, vector algebra, momentum preservation, locomotion, game development.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-2-7>

УДК 004.827:519.816

А. В. Швед¹, д-ка техн. наук, проф.

ORCID: 0000-0003-4372-7472

Є. О. Давиденко², канд. техн. наук, доц.

ORCID: 0000-0002-0547-3689

*Чорноморський національний університет імені Петра Могили*¹e-mail: avshved@chmnu.edu.ua²e-mail: davydenko@chmnu.edu.ua

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ СИТУАЦІЙНОГО УПРАВЛІННЯ В СКЛАДНИХ СИСТЕМАХ ДЛЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В УМОВАХ ПОЗАШТАТНИХ СИТУАЦІЙ

Анотація. Метою роботи є дослідження нових підходів спрямованих на вирішення задачі синтезу та прийняття ефективних рішень в складних системах. Розглянуто питання застосування методів ситуаційного моделювання для забезпечення підтримки процесів прийняття рішень в умовах позаштатних ситуацій. Дістав подальшого розвитку *СВР*-підхід на основі математичного апарату теорії грубих множин. Запропонований підхід дозволяє розбивати базу прецедентів на класи за ступенем приналежності прецеденту до сформованої цільової множини, що в свою чергу забезпечує можливість звуження множини пошуку прототипів рішень, які відповідають параметрам поточної проблемної ситуації. Запропонований підхід становить теоретичну основу для побудови інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень у складних системах управління.

Ключові слова: ситуаційне моделювання, проблемна ситуація, метод міркувань за прецедентами, теорія грубих множин, апроксимація цільової множини.

Постановка проблеми. В основу концепції побудови складних систем покладено системний підхід, який дозволяє розглядати систему через сукупність взаємопов'язаних елементів (підсистем, компонентів), що взаємодіють із зовнішнім середовищем через входи (сигнали, запити, ресурси, дані та ін.) та виходи, що відображають результати її функціонування. Складні системи характеризуються багатокомпонентністю, емерджентністю, нелінійністю, структурною та функціональною складністю, адаптивністю, високим ризиком виникнення позаштатних унікальних ситуацій, що можуть мати важкі наслідки. Управління сучасними складними системами в умовах високого рівня невизначеності, мінливості зовнішнього та внутрішнього середовища, обмеженості ресурсної бази, ускладнення процесів, що в них протікають, вимагає постійної адаптації та координації дій спрямованих на забезпечення їх стійкого функціонування. В таких умовах виникає необхідність застосування більш гнучких та ефективних принципів управління та вирішення поточних технологічних проблемних ситуацій.

Ситуаційне управління це такий підхід в управлінні, який дозволяє вирішувати слабоструктуровані або частково формалізовані задачі, що виникають у складних організаційних, технічних, соціальних, економічних, та ін. системах. В основу такого управління покладені принципи командної роботи та синтезу колективних управлінських рішень в умовах реального часу по мірі виникнення проблем відповідно до поточної ситуації. Під ситуацією розуміється оцінка (аналіз, узагальнення) стану характеристик об'єктів системи та зв'язків між ними [1]. Ситуаційне управління передбачає регулювання штатних і «проблемних» (позаштатних) ситуацій, що виникають у складних системах. До позаштатних відносяться такі ситуації, що виникають в процесі експлуатації різних систем та не носять типовий характер, для них не напрацьовано алгоритми їх вирішення та вони сприяють виникненню небезпечних станів в системах, що мають високий ризик катастрофічних наслідків.



Методи ситуаційного управління спираються на суб'єктивні, евристичні знання фахівців та адаптуються під поточну проблемну ситуацію, яка потребує вирішення. Ефективним інструментом ситуаційного управління є метод міркувань за прецедентами (*CBR* – Case-Based Reasoning), який використовує накопичений досвід для вирішення поточних проблемних ситуацій.

Аналіз останніх досліджень. В основу *CBR*-підходу покладена ідея повторного використання раніше вирішених проблем (прецедентів). Кожен прецедент акумулює параметри проблемної ситуації та досвід її вирішення. Відповідно до [9] прецедент являє собою фрагмент знання відповідної предметної області в конкретному контексті, що зберігає досвід, необхідний для досягнення мети аналітика (експерта), що аналізує та вирішує проблемну ситуацію. *CBR*-підхід успішно використовується в різних галузях людської діяльності (медицина, техніка, юриспруденція та ін.), а також активно застосовується в системах експертного діагностування, підтримки прийняття рішень, ситуаційного управління, при вирішенні задач пошуку рішень в маловивчених предметних областях, прогнозування, узагальнення накопиченого досвіду [1, 2, 12].

База прецедентів (БПр) містить інформацію про опис проблемних ситуацій, що відбулись, та досвід їх вирішення. При створенні БПр для опису існуючої системи знань щодо певної предметної області необхідно вирішити наступні питання: визначення параметрів (атрибутів, характеристичних ознак), що описують прецедент, визначення способу представлення (моделі) для опису та подання прецедентів у базі прецедентів, та способу організації прецедентів у БПр. В основу проєктування структури БПр можуть бути покладені різні моделі даних від класичних (ієрархічна, реляційна) до сучасних, таких як об'єктно-орієнтована, нереляційна, наприклад, документо-орієнтована, та інші [7].

В основу методу міркувань за прецедентами покладено *CBR*-цикл [2, 4, 8, 10]. Найбільшого поширення набув *CBR*-цикл, запропонований у [2], який складається із чотирьох послідовних етапів: вилучення, повторне використання, перегляд та збереження нового прецеденту.

Перший етап (пошук прецедентів) полягає у пошуку та вилученні із бази прецедентів одного або декількох найбільш близьких прецедентів до аналізованої проблемної ситуації. На другому етапі відбувається спроба вирішення поточної проблемної ситуації (задачі) за рахунок розробки та впровадження адаптованих до нового кейсу (прецеденту) рішень на основі отриманої інформації та знань, що містяться у вилученого прецеденту. У разі неможливості адаптації вилученого прецеденту відбувається його перегляд та корегування у відповідності до поточної задачі. Останній етап полягає у збереженні нового прецеденту та прийнятого рішення для вирішення аналогічних проблем у майбутньому.

Зазвичай для опису прецеденту використовується параметрична модель, яка дозволяє описати сукупність характеристичних ознак, що дозволяють однозначно охарактеризувати проблемну ситуацію, описати множину можливих значень, які можуть приймати відповідні ознаки, визначити їх значущість шляхом введення вагових коефіцієнтів.

В такому випадку для опису прецеденту може бути використана бінарна пара виду

$$Case = \{S, D\}. \quad (1)$$

В моделі (1) параметр S містить опис аналізованої проблемної ситуації, параметр $D = \{d_j \mid j = \overline{1, m}\}$ описує сукупність характеристичних ознак можливого рішення поточної проблемної ситуації.

В модель виду (1) може бути введений додатковий параметр R , який містить опис результату впровадження відповідного рішення.

Проте подання прецеденту у вигляді моделі (1) не дозволяє врахувати існуючі залежності між його параметрами. Зазначена проблема може бути вирішена на основі комбінованого під-



ходу, який дозволяє вдосконалити та розширити параметричне подання прецеденту елементами онтологічної моделі у вигляді фреймів, продукційних правил, семантичних мереж та ін. [7]. Такий підхід дозволяє більш точно відображати особливості та специфіку проблемної ситуації.

Подання прецедентів на основі фреймів є більш простим та природнім способом структурованого подання існуючої системи знань. Фрейм має певну внутрішню структуру, яка складається із переліку слотів. Кожен слот подається певною структурою даних, яка дозволяє організувати та представити існуючу систему знань, що характеризує досліджуваний об'єкт. У термінології *CBR* фрейм може представляти прецедент, тоді як слот буде ототожнюватися із параметром (атрибутом) прецеденту [11]. Слот може містити примітивне значення або вказівник на інший фрейм; прецеденти, подані як фрейми, також можуть мати семантичні зв'язки, їх параметри можуть бути як примітивними так і складеними.

Об'єктно-орієнтоване подання прецедентів дозволяє представляти дані більш складної структури. В цьому випадку прецеденти представляються як колекції об'єктів, кожен з яких описується набором пар атрибут-значення. Структура об'єкта описується класом об'єкта [6].

Текстове подання прецедентів використовується у *CBR*-системах в яких деякі або всі наявні джерела знань доступні лише в текстовому форматі. Пошук прецедентів сформованих на основі текстових описів є більш складною задачею, оскільки вимагає більших обчислювальних ресурсів [5].

Ієрархічне подання прецедентів дозволяє описати прецеденти у вигляді деревоподібної або графоподібної структури, наприклад, на основі семантичних мереж. Таке подання дозволяє описати різні відношення між параметрами; представляти знання про предметну область в наглядній та структурованій формі; будувати представлення прецедентів на різних рівнях абстракції, що дозволяє проводити пошук на відповідному рівні абстракції за меншою кількістю параметрів [17].

Подання прецедентів на основі продукційної моделі дозволяє описати і встановити залежності між параметрами прецедентів і проблемної ситуації для конкретної предметної області на основі експертних правил продукційного типу («ЯКЩО» *умова*, «ТО» *дія*). У цьому випадку прецеденти можна представити як сукупність предикатів [16]. Предикати, які не мають умовної частини, є фактами. Перевагою представлення предикатів є те, що такий підхід використовує як правила, так і факти для представлення прецеденту [7].

Для вирішення задачі пошуку та вилучення прецедентів із БПр найбільшого поширення набули [3, 16]: метод вилучення прецедентів на основі дерева рішень, метод вилучення прецедентів на основі знань, індуктивні підходи, метод найближчого сусіда.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Припустимо, що в деякий момент часу t в системі виникає позаштатна ситуація $s(t) \in S$, що потребує вирішення. Проблемна ситуація може бути охарактеризована переліком кількісних та якісних ознак (параметрів) та описана кортежем виду:

$$s(t) = \langle P, V \rangle, \quad (2)$$

де $P = \{p_i \mid i = \overline{1, m}\}$ – не порожня скінчена множина параметрів поточної ситуації;

$V = \bigcup_{p_i \in P} V_{p_i}$ – не порожня скінчена множина значень відповідних параметрів $p_i \in P$.

Проблемна ситуація $s(t) \in S$ характеризує такий стан системи, при якому значення показників $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ мають певні відхилення від заданих базових (запланованих) значень, які характеризують стабільну роботу системи.



Модель (2) може бути доповнена додатковим параметром $W = \{w_i \mid i = \overline{1, m}\}$ – множиною вагових коефіцієнтів відповідних параметрів.

Задача полягає у пошуку ефективного управлінського рішення d для вирішення проблемної ситуації $s(t) \in S$, з метою запобігання, або мінімізації її негативних наслідків.

Виходячи із нотації СВР-підходу опис проблемної (позаштатної) ситуації $s(t)$ та шляхів її вирішення може бути поданий у формі прецеденту відповідно до моделі (1)

$$Case_{s(t)} = \langle s(t), d \rangle.$$

Таким чином, множина всіх вирішуваних в рамках модельованої предметної області проблемних ситуацій та ухвалених для їх вирішення рішень утворюють БПр системи $CL = \{Case_{s(t)}^l \mid l = \overline{1, k}\}$, $k = |S|$.

Для пошуку можливих шляхів вирішення проблемної ситуації поданої прецедентом $Case_{s(t)}$ необхідно серед елементів БПр CL визначити таку підмножину $CL' \subset CL$, елементи якої в найбільшій мірі відповідають поточній проблемній ситуації $Case_{s(t)}$.

Для вирішення поставленої задачі в роботі пропонується підхід до класифікації прецедентів у БПр за рахунок введення специфічних видів апроксимацій в рамках математичної нотації теорії грубих множин (ТГМ) та пошуку такого прецеденту $Case_l \in CL$ (підмножини прецедентів $CL' \subset CL$), який є найбільш близьким до цільового прецеденту $Case_{s(t)}$.

Основна частина. В рамках ТГМ існуючі знання відносно аналізованої предметної області можуть бути структуровані та подані у вигляді реляційної системи виду [13, 15]:

$$K = (U, R), \quad (3)$$

де $U \neq \emptyset$ – кінцева множина елементів (аналізованих об'єктів);

R – сімейство відношень еквівалентності на U , на основі якого можуть бути сформовані класи еквівалентності $IND(R)$ елементів U .

Тоді через $[x]R$ позначимо клас (категорію) в R , що містить елемент $x \in U$. В межах кожного такого класу елементи U вважаються невідмінними.

Цільова множина $X \subseteq U$ вважається R -точною (або R -визначеною), в базі знань K , якщо вона є об'єднанням деяких категорій, що виділені на U шляхом відношення еквівалентності R [13, 15]. Якщо X не може бути точно визначена в базі знань K , то така цільова множина $X \subseteq U$ вважається R -неточною або R -грубою [13, 15].

Введемо поняття відношення приналежності елемента U . ТГМ трактує відношення приналежності елемента до певної цільової множини в більш широкому сенсі ніж теорія множин: елемент x із точністю належить заданій цільовій множині X при існуючих знаннях R (нижнє відношення приналежності); можливо, що елемент x належить цільовій множині X при існуючих знаннях R (верхнє відношення приналежності); елемент x не належить цільовій множині.

Ступінь приналежності елемента заданій цільовій множині в ТГМ визначається шляхом введення специфічних видів апроксимацій цільової множини [13, 15]:

\underline{R} -нижньою апроксимацією множини X вважається така підмножина елементів U , які із упевненістю належать до цільової множини X :

$$\underline{R}X = \{x \in U : [x]_R \subseteq X\}, \text{ або } x \in \underline{R}X, \text{ за умови } [x]_R \subseteq X. \quad (4)$$

\overline{R} -верхньою апроксимацією множини X вважається така підмножина елементів U , які можуть належати до цільової множини X :

$$\overline{R}X = \{x \in U : [x]_R \cap X \neq \emptyset\}, \text{ або } x \in \overline{R}X, \text{ за умови } [x]_R \cap X \neq \emptyset. \quad (5)$$



На основі \bar{R} -верхньої апроксимації можна визначити підмножину елементів U , які точно не належать до X , такі елементи входять до негативної області X [13, 15]:

$$NEG_R(X) = U - \bar{R}X. \quad (6)$$

Підмножина елементів U , які одночасно належать \bar{R} -верхній апроксимації та не входять до її \underline{R} -нижньої апроксимації, відноситься до граничної області грубої множини X [13, 15]:

$$BN_R(X) = \bar{R}X - \underline{R}X. \quad (7)$$

Гранична область містить елементи універсуму, які потенційно можуть належати до множини X . Це область невизначеності, для коректного поводження з якою була розроблена теорія грубих множин.

При вирішенні задачі класифікації методи ТГМ дозволяють моделювати невизначеність щодо приналежності деяких елементів універсуму заданій цільовій множині, а також оцінювати ступінь цієї невизначеності або повноти наявних знань [14]:

$$\alpha_R(X) = \frac{|\underline{R}X|}{|\bar{R}X|}, \quad X \neq \emptyset, \quad (8)$$

де $|Y|$ – кардинальність множини Y .

Розглянемо основні положення процедури класифікації елементів БПр за ступенем приналежності прецедентів деякій визначеній цільовій множині та пошуку найбільш подібного до цільової ситуації прецеденту використовуючи комбінований підхід на основі методів ТГМ та CBR-підходу.

Згідно з нотацією теорії грубих множин БПр CL може бути поставлена у відповідність бази знань виду (3), де $U = CL = \{Case_l \mid l = \overline{1, k}\}$ – універсум прецедентів; R – відношення еквівалентності. Припустимо, що задано деякий цільовий прецедент, що характеризує аналізовану проблемну ситуацію $Case_{targ}$. Прецеденти $Case_l \in CL$, $l = \overline{1, k}$ та цільовий прецедент $Case_{targ}$ відповідають моделі (1).

Якщо значення релевантної ознаки $p_i \in V_i$, що дозволяє описати поточну проблемну ситуацію, яка подана прецедентом $Case_{targ}$ відповідно до моделі (2), є безперервною величиною, то для проведення подальшого аналізу методами ТГМ вони мають бути дискретизовані.

На першому етапі запропонованої процедури вирішується задача формування цільової множини прецедентів $U_{targ} \subset U$, $U_{targ} = \{Case_j \mid j = \overline{1, b}\}$, $b \leq |U|$, $U_{targ} \neq \emptyset$. Цільова множина U_{targ} може бути задана провідним фахівцем аналізованої предметної області (аналітиком, експертом); формуватися за результатами процедури фільтрації прецедентів за сформованою сукупністю найбільш репрезентативних параметрів $p_i \in P'$ ($P' \subset P$) цільового прецеденту та заданих відповідних околиць їх значень (мінімальні та максимальні межі для пошуку). Ознаки (параметри прецеденту), які були використані при формуванні цільової множини видаляються із подальшого аналізу при виділенні класів еквівалентності, пошуку верхньої та нижньої апроксимацій цільової множини.

На другому етапі вирішується задача класифікації знань БПр на основі математичного апарату ТГМ. Виділимо наступні класи: клас cl_1 – містить такі $Case_l \in CL$, які із точністю належать до цільової множини $U_{targ} \subset U$; клас cl_2 – містить такі $Case_l \in CL$, які із упевненістю не належать до заданої $U_{targ} \subset U$.

Алгоритм бінарної класифікації можна представити наступними послідовними кроками:

1. Визначення класів еквівалентності $E = \{E_q \mid q = \overline{1, n}\}$ за заданою множиною класифікаційних атрибутів $P \setminus P'$: елементи $Case_l$ та $Case_j$ відносяться до одного класу E_q , якщо вони мають ідентичні значення всіх атрибутів $p_i \in P'$, $P' \subset P$.



2. Визначення \bar{R} -верхньої, R -нижньої апроксимацій та негативної області NEG_R цільової множини U_{targ} відповідно до (4)–(6).

3. Побудова правил класифікації:

$$\forall Case_i \in U : \begin{cases} Case_i \rightarrow cl_1, & \text{якщо } Case_i \in \underline{R}(U_{targ}); \\ Case_i \rightarrow cl_2, & \text{якщо } Case_i \in NEG(U_{targ}). \end{cases}$$

4. Звуження множини пошуку прототипів рішень для подальшого пошуку найбільш подібного до аналізованої проблемної ситуації прецеденту.

На основі отриманих на попередньому кроці результатів вихідна сукупність прецедентів звужується до області пошуку $U' = cl_1$. При такому підході із подальшого аналізу відкидаються $Case_i \in CL$, які за певних умов можуть належати до цільової множини $U_{targ} \subset U$.

Область подальшого пошуку прототипів рішень U' додатково може бути розширена за рахунок елементів граничної області цільової множини $U' = cl_1 \cup BN_R$.

На третьому етапі серед виділеного набору прецедентів $Case_j \in U'$, визначається найбільш близький (подібний) прецедент до аналізованої проблемної ситуації, наприклад, на основі метричних методів:

$$\min(d(Case_j, Case_{targ})), \forall Case_j \in U', 1 \leq j \leq |U'|,$$

де d – деяка міра близькості між аналізованими прецедентами в заданому метричному просторі, $d(Case_j, Case_{targ}) \in [0, 1]$.

Розглянемо основні принципи процесу синтезу рішень в складних системах в умовах позаштатних ситуацій на основі запропонованого підходу (рис. 1).

За результатами аналізу об'єкта управління здійснюється фіксація його фактичного стану в деякий момент часу t та оцінка відхилень поточних значень показників від планових (стандартних, нормативних). Наявність значних відхилень дозволяє ідентифікувати певні проблемні ситуації $s(t)$, що порушують стабільне функціонування об'єкта управління. Параметри поточної проблемної ситуації $s(t)$ передаються на вхід блоку пошуку прототипів рішень, в якому вирішуються три основні задачі: звуження множини пошуку прототипів рішень, пошук та вилучення із БПр такого рішення (прецеденту), або підмножини прецедентів, значення параметрів яких є найбільш подібними до значень параметрів поточної проблемної ситуації $s(t)$.

Наступним кроком є спроба застосування вилученого прецеденту для вирішення поточної проблемної ситуації $s(t)$. У разі неможливості повторного використання проводиться процедура перегляду та коригування вилученого прецеденту для забезпечення досягнення цілей необхідних для вирішення поточної проблемної ситуації $s(t)$. Таким чином формується новий кейс (прецедент) за рахунок адаптації отриманої інформації та знань, що містяться у вилученого прецеденту.

Запропоноване вирішення (управлінське рішення) поточної проблемної ситуації впроваджується у дію, здійснюючи вплив на об'єкт управління, оцінюється його якість та ефективність за ступенем досягнення поставлених цілей (зворотній зв'язок 1). Якщо запропоноване управлінське рішення не відповідає визначеним вимогам, то здійснюється його коригування (зворотний зв'язок 2), або коригуються параметри звуження та пошуку прототипів рішень, наприклад, вносяться зміни до цільової множини прецедентів (зворотній зв'язок 3).

Останнім етапом є збереження нового прецеденту до БПр, що описує сценарій вирішення поточної проблемної ситуації $s(t)$ та результати впровадження запропонованого рішення.

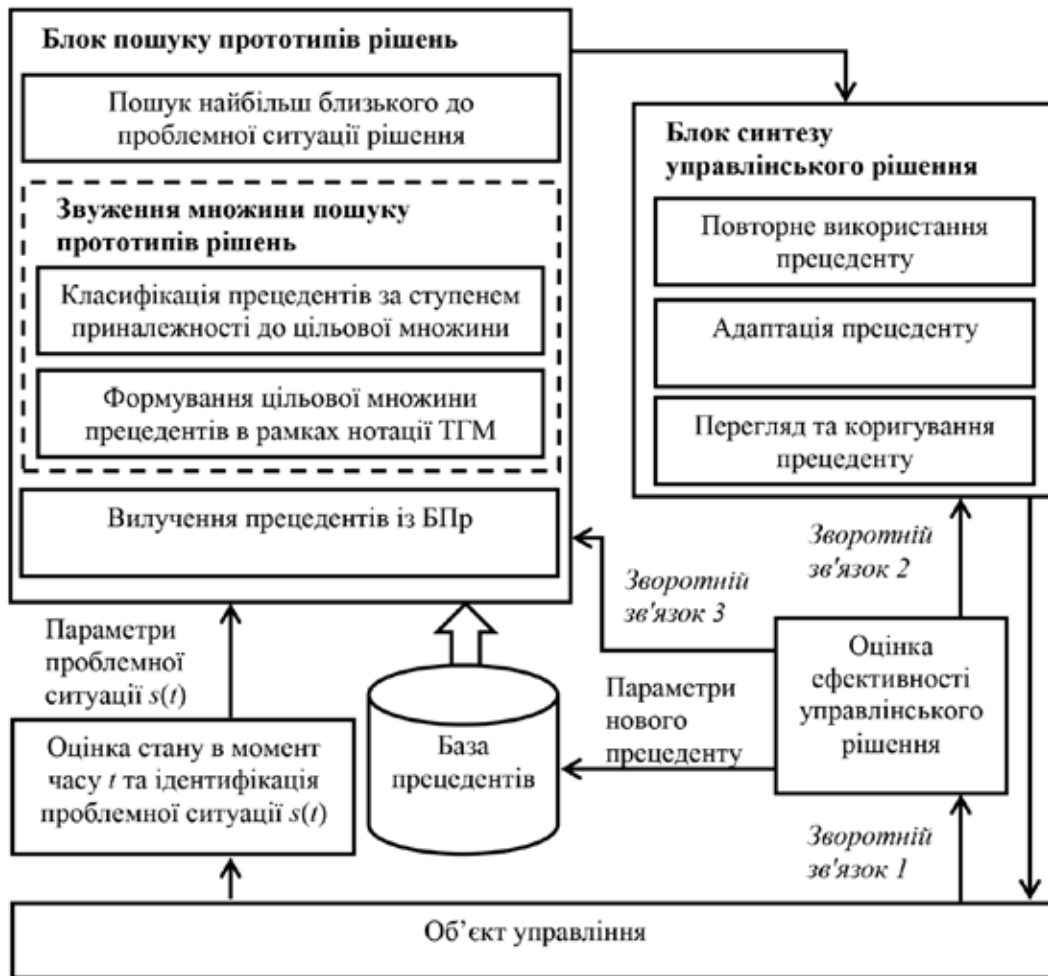


Рис. 1. Структурна схема процесу прийняття рішень в умовах позаштатних ситуацій

Висновки. В роботі досліджена проблематика застосування методів ситуаційного моделювання в складних системах для підтримки процесів синтезу та прийняття рішень при вирішенні нетипових ситуацій, використовуючи або адаптуючи вже накопичений досвід вирішення подібних задач. В якості «інструменту» пошуку прототипів варіантів вирішення поточної проблемної ситуації, які містяться в базі знань з метою їх можливого застосування чи адаптації, розглянуто метод міркувань на основі прецедентів.

В роботі досліджена можливість застосування методів теорії грубих множин для вирішення задачі подання та виведення знань на основі методу міркувань за прецедентами. Запропонована модифікація *CBR*-підходу дозволяє звужувати область пошуку прецедентів в базі, пришвидшуючи процедуру пошуку прототипів рішень. Область подальшого пошуку найбільш близького до аналізованої проблемної ситуації прецеденту може бути звужена до підмножини прецедентів, які із точністю належать до заданої цільової множини, або додатково розширена за рахунок прецедентів, що належать до граничної області заданої цільової множини. Цільова множина прецедентів може бути сформована на основі експертного підходу або за визначеним переліком параметрів прецеденту. Запропонований підхід може становити теоретичне підґрунтя для побудови прецедентних систем підтримки прийняття рішень у складних системах управління.

**Список використаних джерел**

1. Коваленко І. І., Швед А. В., Антіпова К. О. Моделі подання та виведення знань у системах ситуаційного управління: навч. посіб. Миколаїв: Ліон, 2018. 91 с.
2. Aamodt A., Plaza E. CBR: foundational issues, methodological variations and system approaches. *AI Communications*. 1994. 7(1). 39–59.
3. Abou Assali A., Lenne D., Debray B. Case Retrieval in OntologyBased CBR Systems. In: *Advances in Artificial Intelligence, Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg*. 2009. 5803. 564–571.
4. Allen B. Case-based reasoning: business applications. *Communications of the ACM*. 1994. 37(3). 40–42.
5. Ashley K., Stefanie B. Developing Mapping and Evaluation Techniques for Textual Case-Based Reasoning. AAAI Technical Report; WS-98-12. 1998.
6. Bergmann R. Experience Management: Foundations, Development Methodology, and Internet-Based Applications. Springer, 2002.
7. El-Sappagh S., Elmogy M. Case Based Reasoning: Case Representation Methodologies. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2015. 6(11). 192–208. DOI: 10.14569/IJACSA.2015.061126
8. Hunt J. Evolutionary case based design. In: *Progress in Case-based Reasoning. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg*, 1995. 1020. 17–31.
9. Kolodner J. Case-Based Reasoning. Morgan Kaufmann Publishers, 2014. 668 p.
10. Kolodner J., Leake D. A tutorial introduction to case-based reasoning. In *Case-Based Reasoning: Experiences, Lessons and Future Directions*. AAAI/MIT Press, 1996. 31–65.
11. Negnevitsky M. Artificial Intelligence: A Guide to Intelligent Systems. Addison-Wesley, 2004.
12. Pal S. K., Shiu S. C. K. Foundation of soft case-based reasoning. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2004. 300 p.
13. Pawlak Z. A Primer on rough sets: a new approach to drawing conclusions from data. *Cardozo Law Review*. 2001. 22(5). 1407–1415.
14. Pawlak Z. Rough classification. *International Journal of Man-Machine Studies*. 1983. 20 (5). 469–483.
15. Pawlak Z. Rough sets, theoretical aspects of reasoning about data. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1991. 229 p.
16. Simon S., Sankar P. Foundations of Soft Case-Based Reasoning. Wiley-Interscience, 2004.
17. Watsona I., Perera S. A hierarchical case representation using context guided retrieval. *Journal of Knowledge-Based Systems*. 1998. 11. 285–292.

Дата першого надходження статті до видання: 01.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 26.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 25.05.2026

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



A. Shved, Ye. Davydenko

Petro Mohyla Black Sea National University

**SITUATIONAL MANAGEMENT IN COMPLEX SYSTEMS FOR EMERGENCY
DECISION-MAKING: APPLICATION AND APPROACHES****Summary**

The process of synthesis and decision-making in complex social, economic, technical, organizational, and other systems typically occurs under a high level of uncertainty, a dynamic external and internal environment, limited time and resources, and a significant number of contradictory factors that describe the complex processes occurring in such systems. The situation becomes more complicated when addressing strategic, long-term, complex problems, which are often poorly structured, difficult to formalize and solve rigorously theoretically. The paper considers the application of situational modeling methods to support decision-making processes in complex systems for extraordinary situations solving. Situational modeling methods allow overcoming the mentioned difficulties



and problems in solving weakly structured or partially formalized tasks that arise in complex systems, leveraging the accumulated professional experience of specialists in a given subject area. The paper considers the possibility of using of the case based reasoning method to provide support for decision-making processes in extraordinary situations. A modification of the CBR approach has been proposed based on the mathematical apparatus of rough set theory. The proposed approach involves defining approximations of the target set of precedents for the purpose of classifying precedents and subsequently searching for them in the database of precedents. Which in turn allows narrowing the search set of solution prototypes that match the parameters of the current problem situation, which in turn helps reduce the time required to solve the classification and search problems. The use of rough set theory methods allows for acquisition and processing of knowledge about precedents generated under uncertainty and the presence of imprecise, raw, contradictory source data. The proposed approach provides a theoretical basis for building intelligent decision support systems in complex management systems.

Keywords: situational modeling, abnormal situation, case-based reasoning, rough set theory, approximation of the target set.



МАШИНОБУДУВАННЯ (ЗА СПЕЦІАЛІЗАЦІЯМИ)

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-2-8>

УДК 633.853:62-1

Я. В. Білокін¹, аспірант

ORCID: 0009-0003-4510-2780

В. В. Дідур², д-р техн. наук, проф.

ORCID: 0009-0002-4416-195X

¹Полтавський державний аграрний університет²Уманський національний університет садівництва

e-mail: didur.vv@gmail.com

**ОБҐРУНТУВАННЯ ТА РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ ВІДТИСКУ РІДКОЇ ФАЗИ
З КАПІЛЯРНО-ПОРИСТОГО ТІЛА**

Анотація. У статті розглянуто задачу математичного опису відтиску рідкої фази з деформівного капілярно-пористого тіла в умовах пресування. Показано, що складність процесу зумовлена одночасною зміною тиску в рідині та скелеті твердої фази, а також зміною проникності пористого середовища внаслідок його ущільнення. Для опису процесу запропоновано два підходи: розв'язання диференціального рівняння відтиску за сталого коефіцієнта напірної провідності та розв'язання нелінійної задачі зі змінним коефіцієнтом, який залежить від тиску. Для побудови розв'язку використано метод Бубнова-Гальоркіна, поліноми Лежандра, матричний апарат і чисельне інтегрування методом Ейлера. Встановлено, що модель зі сталим коефіцієнтом напірної провідності дозволяє описати загальні закономірності процесу, однак не забезпечує потрібної точності. Більш адекватним є підхід зі змінним коефіцієнтом напірної провідності, для якого застосовано підстановку Кірхгофа та отримано нелінійну систему звичайних диференціальних рівнянь. Результати можуть бути використані для аналізу процесів пресування олійних матеріалів і для інженерного обґрунтування параметрів шнекових пресів.

Ключові слова: капілярно-пористе тіло, відтиск рідкої фази, пористе середовище, пресування, напірна провідність, математична модель, шнековий прес.

Постановка проблеми. Олійний матеріал під час пресування є складною багатокомпонентною системою, у якій одночасно відбуваються ущільнення твердої фази, перерозподіл навантаження між рідиною і скелетом, фільтрація рідкої фази та зміна проникності капілярно-пористої структури [1, 3, 5, 6]. Саме ця деформаційна мінливість середовища ускладнює математичний опис процесу відтиску та не дозволяє обмежитися спрощеними моделями з постійними параметрами [1, 5, 6].

Для інженерного проектування пресового обладнання, особливо шнекових пресів, необхідний адекватний математичний опис, який би враховував змінність властивостей матеріалу в процесі навантаження [2, 4, 7]. Без такого опису складно надійно прогнозувати розподіл тиску, інтенсивність виділення рідкої фази та час перебігу процесу [3, 5, 6]. Сучасні дослідження також підтверджують, що деформація пористого середовища істотно впливає на параметри фільтрації, а в шнекових пресах характер течії і відведення олії залежить не лише від геометрії робочого органа, а й від еволюції властивостей матеріалу під тиском [4–8].

Аналіз останніх досліджень. У сучасній науковій літературі задачі фільтрації та відтиску рідкої фази з пористих середовищ розглядаються переважно в межах моделей деформівного пористого тіла, де проникність і напружено-деформований стан взаємопов'язані [1, 5]. У роботі про багатофазну фільтрацію в деформівному пористому середовищі показано, що деформа-

ція матриці істотно змінює характеристики руху рідини і має бути безпосередньо включена в математичну модель [5].

Окремий напрям досліджень стосується саме шнекового відтиску олії. У сучасній праці з моделювання конфігурації шнекового преса для відтиску сафлорової олії відзначено, що задача відтиску рідкої фази з дисперсного матеріалу повинна описуватися як поєднання ущільнення, фільтрації та геометричного впливу пресувальної камери [2, 7]. Автори підкреслюють необхідність математичного обґрунтування конструктивних параметрів преса на основі моделей відтиску [2, 7].

Дослідження конструкції олієвідвідних каналів шнекових пресів також підтверджують, що ефективність виділення рідкої фази визначається не лише прикладеним тиском, а й умовами відведення фільтрату та зміною стану матеріалу в зерній зоні [4]. Це узгоджується з підходом, за яким тиск рідини і тиск у скелеті необхідно розглядати спільно [3, 4].

Крім того, реальні вимірювання тиску, моменту і поточкових характеристик у шнековому пресі показують, що динаміка процесу є нестационарною, а спрощені лінійні моделі мають обмежену точність [8]. Це підтверджує доцільність переходу до нелінійних моделей зі змінними коефіцієнтами, які краще відтворюють реальний процес відтиску [5, 6, 8–10].

Отже, аналіз сучасних досліджень свідчить, що для опису відтиску рідкої фази з капілярно-пористого тіла найбільш обґрунтованими є моделі, які одночасно враховують деформацію середовища, нелінійну зміну фільтраційних характеристик і часову еволюцію тиску [1, 5–8].

Формулювання мети статті. Метою роботи є обґрунтування математичної постановки та розв'язання задачі відтиску рідкої фази з капілярно-пористого тіла з урахуванням деформації пористого середовища, а також порівняння підходів за сталого і змінного коефіцієнта напірної провідності.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- сформулювати початкову математичну модель процесу відтиску;
- розв'язати задачу одновимірного відтиску за сталого коефіцієнта напірної провідності;
- побудувати нелінійну модель для випадку, коли коефіцієнт напірної провідності залежить від тиску;
- застосувати метод Бубнова–Гальоркіна, поліноми Лежандра та метод Ейлера для отримання чисельного розв'язку;
- оцінити придатність обох підходів для опису реального процесу пресування.

Основна частина. Передумови математичного опису процесу. Головною особливістю відтиску рідкої фази пресуванням є те, що деформація матеріалу супроводжується зміною проникності каналів твердої фази. Це означає, що капілярно-пористе тіло не можна вважати середовищем зі сталими фільтраційними характеристиками. У зв'язку з цим процес описують через тиск у скелеті твердої фази P_c і тиск рідини $P_{\text{ж}}$, які разом утворюють зовнішній тиск.

Раніше для такого процесу було отримано рівняння розвитку тиску:

для каркаса твердої фази:

$$\frac{\partial P_c}{\partial \tau} = \frac{k}{-\frac{\partial P_{\text{ж}}}{\partial P_c}(1 + \varepsilon)\rho_{\text{ж}}g} \cdot \frac{\partial^2 P_c}{\partial x^2} \quad (1)$$

для рідини, що віджимается:

$$\frac{\partial P_{\text{ж}}}{\partial \tau} = \frac{k}{-\frac{\partial \varepsilon}{\partial P_c}(1 + \varepsilon)\rho_{\text{ж}}g} \cdot \frac{\partial^2 P_{\text{ж}}}{\partial x^2} \quad (2)$$



де ε – коефіцієнт пористості;

$\rho_{\text{ж}}$ – густина рідини;

g – прискорення вільного падіння;

k – коефіцієнт фільтрування;

x – координата;

τ – час.

Коефіцієнт:

$$K = \frac{k}{-\frac{\partial \varepsilon}{\partial P_c} (1 + \varepsilon) \rho_{\text{ж}} g} \quad (3)$$

тракується як коефіцієнт напірної провідності, тобто параметр, що характеризує швидкість вирівнювання напорів у рідині або тисків у скелеті матеріалу.

Розв'язання задачі за сталого коефіцієнта напірної провідності. На першому етапі задачу одновимірного відтиску сформульовано у вигляді:

$$\frac{\partial P_{\text{ж}}}{\partial \tau} = K \frac{\partial^2 P_{\text{ж}}}{\partial x^2} \quad (4)$$

де $K = \text{const}$. Це можливо на підставі гіпотези, що зовнішній тиск під час пресування дорівнює сумі тиску в рідині та тиску в скелеті, а в початковий момент весь прикладений тиск сприймається рідиною.

Початкова умова:

$$P_{\text{ж}}(x, 0) = 1 \quad (5)$$

Гранична умова:

$$P_{\text{ж}}(0, \tau) = 0 \quad (6)$$

Для розв'язання застосовано метод Бубнова–Гальоркіна, а як пробну функцію використано ряд за парними поліномами Лежандра:

$$P_{\text{ж}}(x, \tau) = \sum_{i=1}^n a_i(\tau) [P_0(1-x) - P_{2i}(1-x)] \quad (7)$$

Поліноми Лежандра обчислювали за формулою Родріга:

$$P_n(\lambda) = \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n}{d\lambda^n} (\lambda^2 - 1)^n \quad (8)$$

Для практичного розрахунку було прийнято чотиричленний розклад. Використано поліноми:

$$P_0(\lambda) = 1 \quad (9)$$

$$P_2(\lambda) = \frac{3\lambda^2 - 1}{2} \quad (10)$$

$$P_4(\lambda) = \frac{35\lambda^4 - 30\lambda^2 + 3}{8} \quad (11)$$

$$P_6(\lambda) = \frac{231\lambda^6 - 315\lambda^4 - 105\lambda^2 - 5}{16} \quad (12)$$

$$P_8(\lambda) = \frac{6435\lambda^8 - 1202\lambda^6 + 6930\lambda^4 - 1260\lambda^2 + 35}{128} \quad (13)$$



Початкові коефіцієнти часових проєкцій визначали через матричну систему, побудовану після почергового множення пробної функції на координатні складові та інтегрування на відрізок $x \in [0;1]$. Далі задача була зведена до системи звичайних диференціальних рівнянь, яку розв'язували методом Ейлера. Для забезпечення стійкого інтегрування було встановлено крок $h = 0,005$ за приведеною часовою координатою.

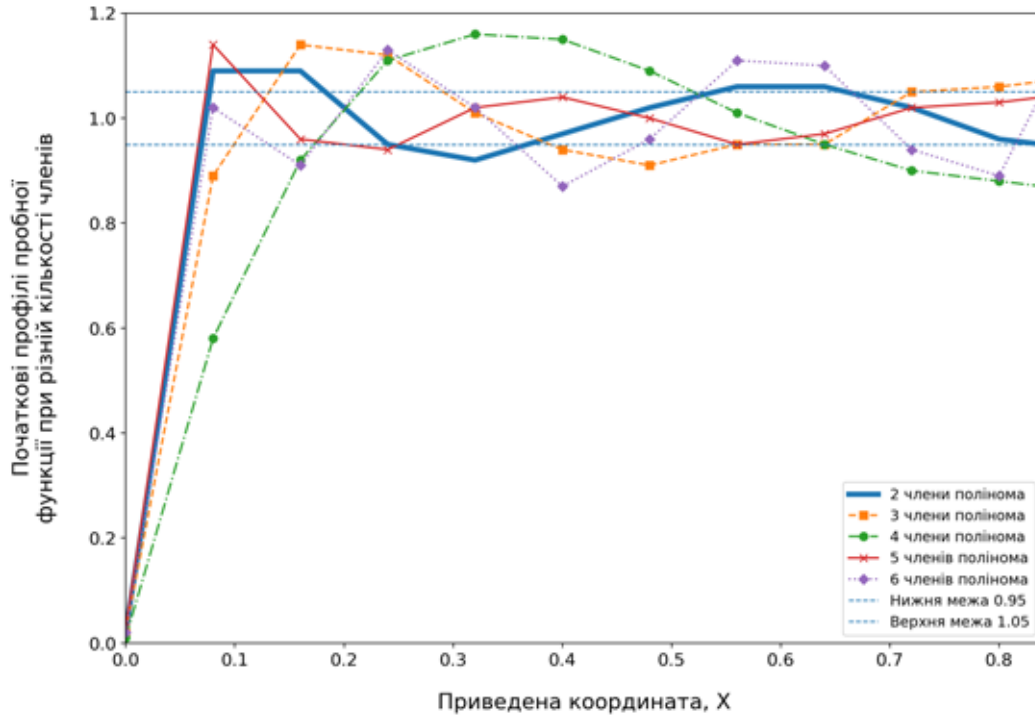


Рис. 1. Графіки початкових профілів пробної функції при різній кількості членів полінома

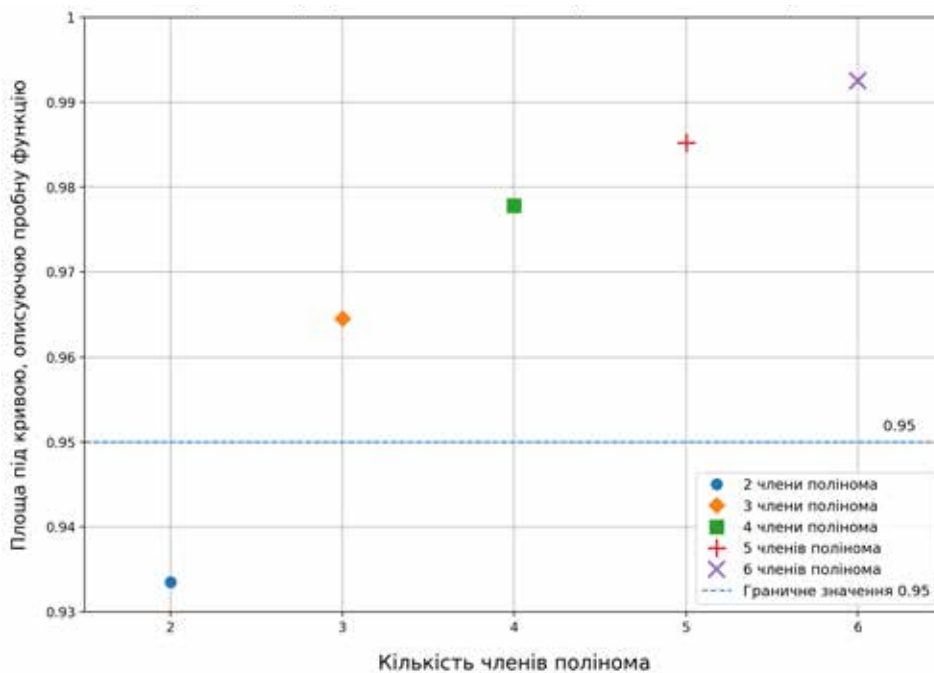


Рис. 2. Графік зміни площ під кривими часових проєкцій, що описують пробну функцію

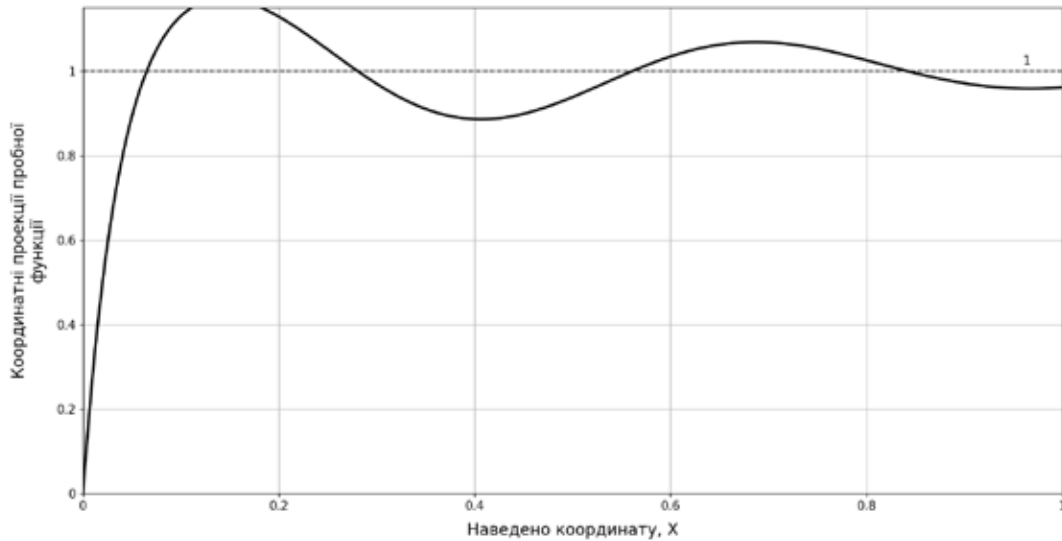


Рис. 3. Пробна функція в початковий момент часу залежно від приведеної координати

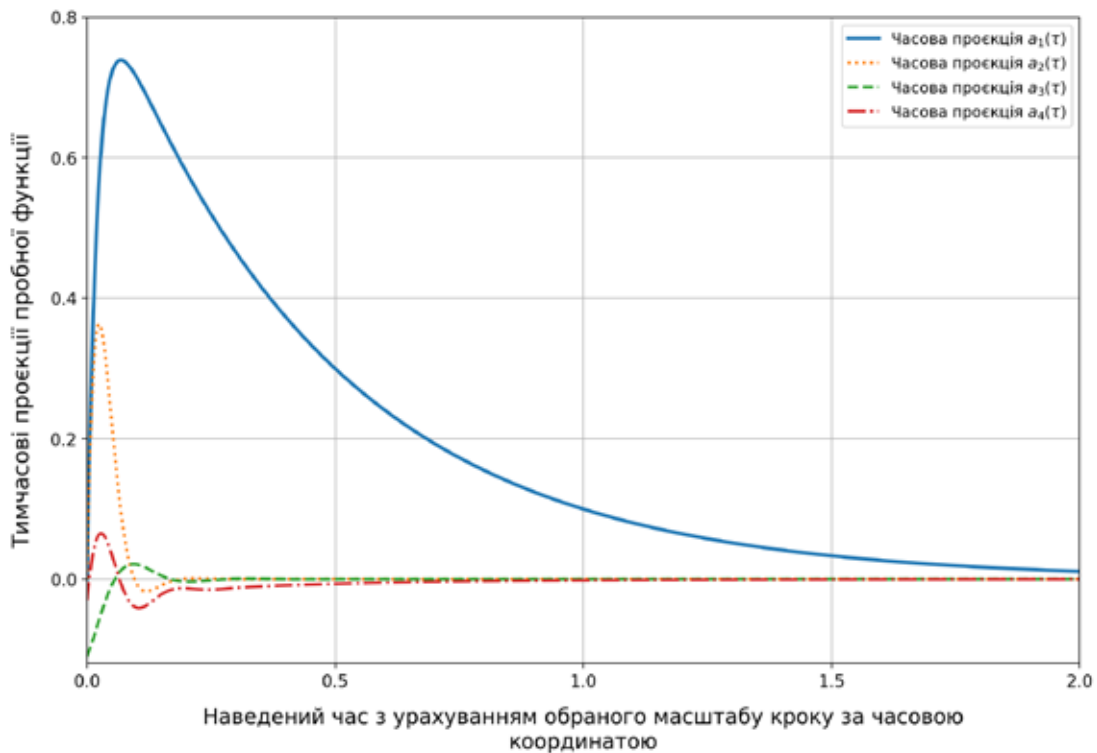


Рис. 4. Графіки часових рядів коефіцієнтів $a_1(\tau)$, $a_2(\tau)$, $a_3(\tau)$, $a_4(\tau)$ за сталого коефіцієнта напірної провідності

Тиск у скелеті пресованого матеріалу визначали з урахуванням сталості зовнішнього тиску:

$$P_c = 1 - P_{ж} \quad (14)$$

Отримані результати показали загальну правильність підходу, але аналіз експериментальних даних виявив недостатню точність моделі зі сталим коефіцієнтом напірної провідності.

Розв'язання задачі зі змінним коефіцієнтом напірної провідності. На другому етапі для опису процесу відтиску було прийнято нелінійне рівняння:



$$\frac{\partial P_{жс}}{\partial \tau} = K(P) \frac{\partial^2 P_{жс}}{\partial x^2} \quad (15)$$

де $K(P)$ – змінний коефіцієнт напірної провідності.

Для нього прийнято експоненційну залежність:

$$K(P) = K_y e^{\gamma P} \quad (16)$$

де K_y – коефіцієнт пропорційності;

γ – коефіцієнт нелінійності.

Оскільки це рівняння не можна безпосередньо розділити на часову та координатну складові, застосовано підстановку Кірхгофа:

$$\delta = \int K(P) dP \quad (17)$$

Після інтегрування отримують залежність допоміжної змінної δ від тиску рідини та зворотний зв'язок $P_{жс}(\delta)$. Це дало змогу перетворити вихідне нелінійне рівняння до форми, придатної для застосування методу Гальоркіна.

Пробну функцію для допоміжної змінної також шукали у вигляді розкладу за поліномами Лежандра:

$$\delta(x, \tau) = \sum_{i=1}^4 a_i(\tau) [P_0(1-x) - P_{2i}(1-x)] \quad (18)$$

Після побудови матричної системи було отримано нелінійну систему звичайних диференціальних рівнянь, у якій права частина є білінійною формою від часових проекцій. Для чисельного інтегрування знову використано метод Ейлера, але для стійкого розрахунку було прийнято крок $h = 0,05$, максимальне значення приведеної часової координати – 140, а кількість кроків – 500.

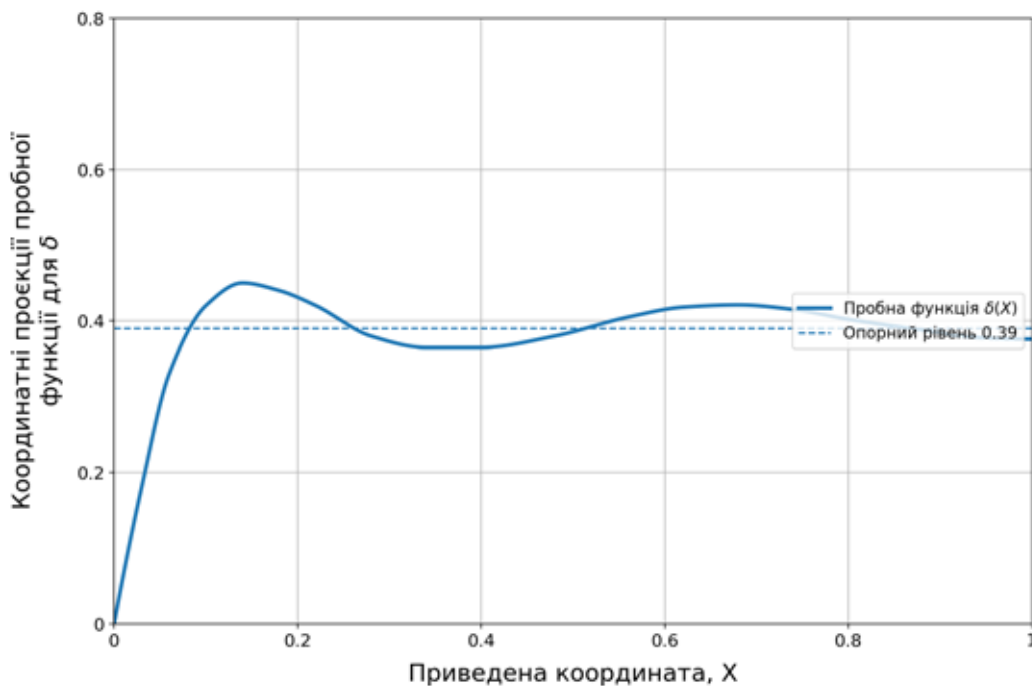


Рис. 5. Пробна функція в початковий момент часу для допоміжної змінної δ залежно від приведеної координати

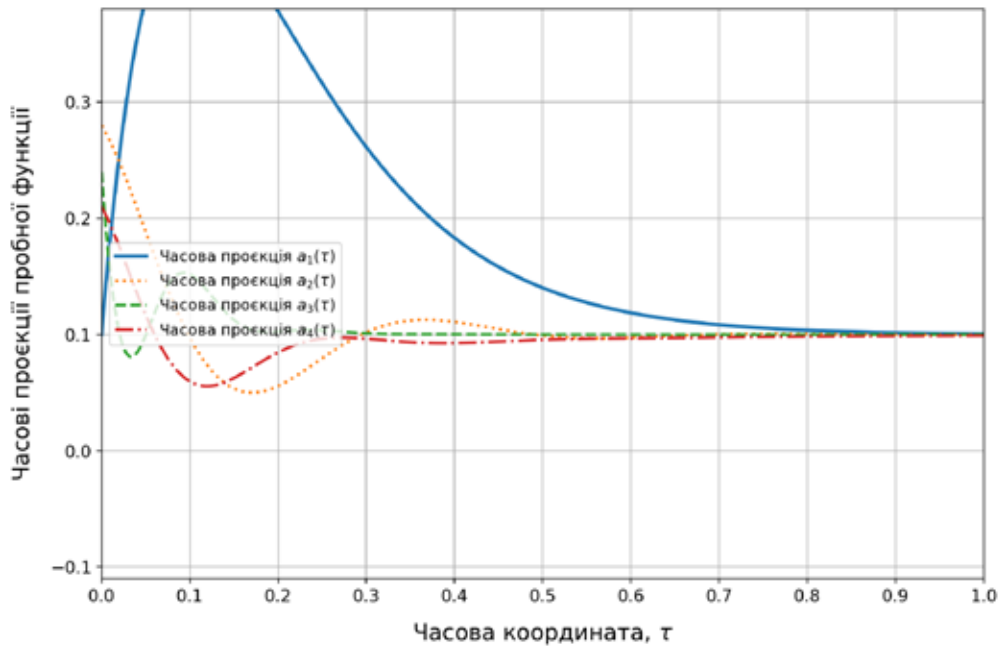


Рис. 6. Графік часових рядів коефіцієнтів $a_1(\tau)$, $a_2(\tau)$, $a_3(\tau)$, $a_4(\tau)$ при $a_0 = 0,147$ і $\gamma = 2,2855$

Саме ця модель забезпечила більш реалістичний опис процесу, оскільки врахувала зміну фільтраційних характеристик середовища внаслідок деформації. Такий висновок узгоджується із сучасними роботами, у яких нелінійні моделі для деформівних пористих середовищ демонструють кращу відповідність реальним процесам фільтрації та пресування.

Висновки. У роботі обґрунтовано математичну постановку задачі відтиску рідкої фази з капілярно-пористого тіла та показано, що ключовим у її розв'язанні є врахування деформації середовища і зміни фільтраційних характеристик у процесі пресування.

Розв'язання лінійної задачі за сталого коефіцієнта напірної провідності дозволило побудувати базовий опис процесу, одержати часові проєкції і визначити характер перерозподілу тиску між рідиною та скелетом твердої фази. Проте ця модель виявилася недостатньо точною для відтворення реального процесу відтиску.

Запровадження змінного коефіцієнта напірної провідності, що залежить від тиску, а також використання підстановки Кірхгофа, методу Бубнова–Гальоркіна і чисельного інтегрування методом Ейлера дали змогу отримати більш адекватний нелінійний розв'язок. Це підтверджує доцільність використання нелінійних моделей для опису відтиску рідкої фази з деформівних пористих середовищ.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості застосування побудованої моделі для інженерного аналізу та вдосконалення пресового обладнання, насамперед шнекових пресів для відтиску олії.

Список використаних джерел

1. Bear J. *Dynamics of Fluids in Porous Media*. New York : American Elsevier Publishing Company, 1972.
2. Sorin-Stefan B. Calculus Elements for Mechanical Presses in Oil Industry. In: *Agricultural and Food Engineering Working Document*. London : IntechOpen, 2013. DOI: 10.5772/53159.
3. Owolarafe O. K., Faborode M. O. Mathematical modelling and simulation of the hydraulic expression of oil from oil palm fruit. *Biosystems Engineering*. 2008. Vol. 101, No. 3. P. 331–340.
4. Hudzenko M., Vasylyv V., Zheplinska M., Sarana V., Gorenkov D. Study of the effectiveness of the design of the oil removal channels of screw presses for squeezing out oil. *Animal Science and Food Technology*. 2023. Vol. 14, No. 4. P. 58–73. DOI: 10.31548/animal.4.2023.58.



5. Burnashev V. F., Datsko B. M., Datsko O. I. Mathematical Modeling of Multi-Phase Filtration in a Deformable Porous Medium. *Computation*. 2023. Vol. 11, No. 6. Art. 112. DOI: 10.3390/computation11060112.
6. Теплофізична модель процесу прес-екструзії олійних культур / В. В. Дідур, Я. В. Білокінь, О. В. В'юник, Г. І. Дашивець. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. Технічні науки* : електронне наукове фахове видання. / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. Запоріжжя : Видавничий дім «Гельветика», 2025. Вип. 15, т. 2. С. 32–36. DOI: <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-4>
7. Mursalykova M., Akhmetov R., Kassenova G., et al. Mathematical Modeling of Screw Press Configuration for Safflower Oil Extraction. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, No. 5. Art. 3057. DOI: 10.3390/app13053057.
8. Carré P., et al. Investigating pressure, torque, cage strain and flows dynamic in screw press during oil extraction. *OCL*. 2025. Vol. 32. Art. 14.
9. Didur, V., Kyurchev, V., Chebanov, A., Aseev, A. (2019). Increasing the Efficiency of the Technological Process of Processing Castor-Oil Seeds into Castor Oil. In: Nadykto, V. (eds) *Modern Development Paths of Agricultural Production*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14918-5_3
10. Процеси і апарати. Механічні та гідромеханічні процеси: підручник / В. С. Бойко, К. О. Самойчук, В. Г. Тарасенко [та ін.]. Мелітополь, 2021. 445 с.

Дата першого надходження статті до видання: 24.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 25.05.2026

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



Ya. Bilokin¹, V. Didur²

¹Poltava State Agrarian University

²Uman National University of Horticulture

JUSTIFICATION AND SOLUTION OF THE PROBLEM OF LIQUID PHASE PRINTING FROM A CAPILLARY-POROUS BODY

Summary

Oily material during pressing is a complex multicomponent system in which compaction of the solid phase, redistribution of load between the liquid and the skeleton, filtration of the liquid phase and change in permeability of the capillary-porous structure occur simultaneously. It is this deformation variability of the medium that complicates the mathematical description of the impression process and does not allow us to limit ourselves to simplified models with constant parameters. The aim of the work is to substantiate the mathematical formulation and solution of the problem of liquid phase imprinting from a capillary-porous body taking into account the deformation of the porous medium, as well as to compare approaches for a constant and variable pressure conductivity coefficient. The article substantiates and solves the problem of liquid phase expression from a capillary-porous body under pressing conditions. It is shown that the main difficulty of the process lies in the coupled evolution of liquid pressure, solid skeleton pressure, and permeability of the deformable porous medium. Two approaches are considered: a linear model with a constant pressure-conductivity coefficient and a nonlinear model with a pressure-dependent coefficient. The Bubnov–Galerkin method, Legendre polynomials, matrix transformations, Kirchhoff substitution, and Euler numerical integration were applied to obtain the solution. It was found that the constant-coefficient model reproduces the general trend of pressure redistribution but does not provide sufficient accuracy for describing the real pressing process. The nonlinear formulation with a variable pressure-conductivity coefficient provides a more adequate description of liquid phase expression from the porous material. The obtained results can be used for the analysis and engineering design of screw presses and other equipment for oil-bearing material processing.

Keywords: capillary-porous body; liquid phase imprint; porous medium; pressing; pressure conductivity; mathematical model; screw press.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-2-9>

УДК 004.942

Є. А. Гавриленко, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0003-4501-445X

О. Є. Мацулевич, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-5553-709X

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

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

АЛГОРИТМ ФОРМУВАННЯ ОБВОДУ НА ОСНОВІ ОБЛАСТІ РОЗТАШУВАННЯ ЕВОЛЮТИ МОНОТОННОЇ КРИВОЇ

Анотація. Алгоритми геометричного моделювання кривих ліній із заданим поєднанням характеристик, що інтерполюють точкові ряди складної конфігурації, є основою розробки систем автоматизованого проектування виробів, обмежених функціональними поверхнями. Необхідні властивості поверхні забезпечуються характеристиками інтерполюючої кривої, яка використовується в якості елемента каркасу моделі, основними з яких є регулярна зміна значень кривини та мінімальна кількість особливих точок. У статті запропоновано спосіб формування послідовності, що складається із скільки завгодно великої кількості заданих вихідних і призначених проміжних точок, які можна інтерполювати монотонною кривою лінією. Спосіб є необхідним етапом створення алгоритму формування обводу, який із заданою точністю представляє криву лінію із заданими властивостями, що інтерполює послідовність точок довільної конфігурації. Коректність запропонованих у роботі рішень підтверджує розв'язання тестового прикладу.

Ключові слова: інтерполяція, монотонна крива лінія, проміжні точки, нормаль, центр кривини, еволюта, область розташування кривої, обвід, похибка.

Постановка проблеми. Системи автоматизованого проектування (САПР) є важливим складником сучасного виробництва. Їх застосування значною мірою забезпечує підвищення якості виготовлення виробів за нижчою вартістю та за менший час. Поряд із збільшенням обчислювальних потужностей комп'ютерів фундаментальним завданням ефективного застосування САПР є розробка досконалішого математичного забезпечення CAD/CAM/CAE систем.

Методи геометричного моделювання кривих ліній із заданим поєднанням характеристик, які інтерполюють точкові ряди складної конфігурації, є основою розробки САПР виробів, обмежених функціональними поверхнями [1, 6]. Геометричне моделювання поверхонь визначає функціональні якості великої кількості об'єктів. До таких об'єктів, насамперед, належать вироби з аеро- та гідродинамічними обводами в авіабудуванні, автомобілебудуванні, суднобудуванні, енергетичному та хімічному машинобудуванні [7]. Складні поверхні часто моделюються на основі лінійчатих каркасів, елементи яких формуються в результаті інтерполяції послідовностей точок, розташованих на поверхні. При цьому геометричні характеристики кривої, що інтерполює, забезпечують експлуатаційні якості виробу. Для зазначених виробів основною функціональною характеристикою є заданий характер обтікання середовищем поверхні. Основними характеристиками інтерполюючої кривої, що дозволяють забезпечити необхідні властивості поверхні, є регулярна зміна значень кривини та мінімальна кількість особливих точок [3, 8].

Залежно від способу представлення інформації, методи інтерполяції можна розділити на дві групи. До першої групи віднесемо методи безперервного геометричного моделювання, коли результатом є модель, представлена функцією чи сукупністю функцій. У даних методах завдання інтерполяції послідовності точок, вирішується шляхом формування обводу, що складається з ділянок аналітично заданих кривих, зістикованих у вихідних точках.



При формуванні інтерполюючої кривої з дуг кривих другого порядку [9, 19] гарантується відсутність неконтрольованого виникнення точок перегину, проте уникнути точок з екстремальними значеннями кривини неможливо. Коригування форми обводу здійснюється шляхом зміни положень дотичних у вихідних точках. Якщо положення дотичних у вихідних точках зафіксовані, локальне коригування можливе при використанні дуг еліпсів.

Використання для формування обводу В-сплайнів [10] забезпечує ширші можливості управління формою обводу. В-сплайн визначається контрольними точками, що його задають, кожній з яких відповідає функція сполучення. Крива апроксимує ламану лінію, що з'єднує контрольні точки. Порядок гладкості обводу, що формується, забезпечується ступенем функцій сполучення. При збільшенні порядку гладкості збільшується ступінь функцій сполучення і число вершин багатокутника, що задає сплайн. Це призводить до зменшення можливості локального коригування форми кривої. Одночасно зростає можливість виникнення осциляцій. Поліпшення стикування сегментів обводу вимагає збільшення ступеня сплайну, що спричиняє зростання кількості контрольних точок. Це ускладнює процес локального коригування форми та параметрів сплайну. Крім того, при інтерполяції великої кількості точок складно забезпечити монотонну зміну кривини вздовж сплайну.

Відсутність осциляції обводу, що формується на основі В-сплайну, можна забезпечити за рахунок контролю форми багатокутника, що його задає. Сучасні САД-системи дозволяють керувати формою багатокутника, що задає В-сплайн, в інтерактивному режимі [11]. За великої кількості вихідних точок забезпечити відсутність осциляції в ручному режимі важко чи неможливо. Ці особливості обмежують можливості забезпечення заданих характеристик обводів, що формуються на основі сплайнів.

Перевагою розглянутих методів безперервного геометричного моделювання є аналітичний опис ділянок кривих, що дозволяє однозначно визначити обвід, що формується, і характеристики в його вузлах. Одночасно це призводить до нав'язування кривої, що інтерполює точковий ряд, властивостей кривих, ділянками яких моделюється обвід. Збільшення числа умов, що накладаються на геометричний образ, що формується такими методами, вимагає збільшення параметричного числа кривих ліній, які становлять його визначник. Це призводить до неконтрольованого виникнення у кривих особливих точок, що знижує якість одержуваного рішення. Наразі зазначена проблема не має кардинального рішення.

До другої групи віднесемо дискретне геометричне моделювання, що передбачає рішення у вигляді впорядкованої множини точок [4, 12]. Такий підхід відкриває можливість контролю характеристик інтерполюючої кривої за рахунок відмови від її аналітичного подання та використання в якості інструмента формоутворення алгоритмів, що визначають положення проміжних точок кривої. Однак, дотепер ця потенційна можливість дискретного геометричного моделювання значною мірою не реалізована. Основними завданнями, вирішення яких дозволить підвищити ефективність дискретного підходу, є контроль геометричних властивостей кривої лінії через характеристики послідовностей точок, що їй належать, і оцінка точності дискретної інтерполяції. Завданням методу дискретної інтерполяції, що розробляється, є формування послідовності, що складається з вихідних і новопризначених проміжних точок, які можливо інтерполювати кривою лінією із заданими характеристиками. Основною характеристикою кривої, що інтерполює сформовану нашим методом послідовність точок, є мінімальна, виходячи з вихідних даних, кількість особливих точок.

Пропонується така схема дискретної інтерполяції.

1. Початкова послідовність точок розбивається на частини, які можна інтерполювати кривою лінією, що не містить особливих точок. Таку лінію називатимемо монотонною, тому що

вздовж неї значення кривини змінюються регулярно і монотонно. Будь-яку криву лінію можна розглядати як таку, що складається із монотонних частин, зістикованих в особливих точках.

2. Формуються послідовності, що складаються із скільки завгодно великої кількості точок, які задають монотонні частини інтерполюючої кривої. Це вихідні та проміжні точки, які призначаються у процесі моделювання. Формування зазначеної послідовності точок називатимемо згущенням. Новопризначені проміжні точки називатимемо точками згущення.

Згущення здійснюється до того часу, поки похибка дискретної інтерполяції стане менше заданої величини. Цю похибку оцінюватимемо розмірами області можливого розташування ділянок монотонної кривої, що інтерполює.

3. Формується обвід, що складається з ділянок безперервних ліній, який інтерполює згущену послідовність точок і розташовується всередині області можливого розташування монотонної кривої. Такий обвід з необхідною точністю представляє криву лінію із заданими геометричними характеристиками.

Аналіз останніх досліджень. Завдання формування області можливого розташування монотонної кривої, що інтерполює, як послідовності замкнених контурів, стикованих між собою у вихідних точках вирішена в статтях [5, 13, 14]. Область можливого розташування ділянки кривої $i \dots i+1$, обмежена дугами кіл. Це кола, стичні з кривою у вихідних точках (CK_i та CK_{i+1}) і кола, які дотичні до стичного кола і дотичної прямої в іншій вихідній точці (рис. 1).

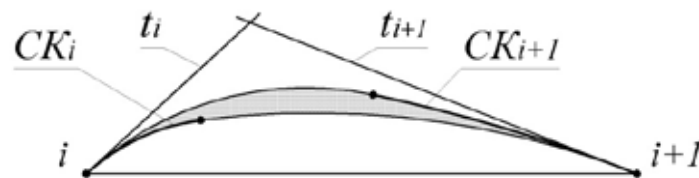


Рис. 1. Область можливого розташування ділянки монотонної інтерполюючої кривої

Межі області розташування ділянки однозначно визначаються положенням центрів кривини монотонної кривої, які відповідають точкам, що обмежують ділянку.

Завдання визначення положень центрів кривини, що відповідають вихідним точкам, для монотонної кривої лінії, яка інтерполює точковий ряд $\dots i-1, i, i+1 \dots$ вирішено у статтях [2, 15].

Кожен із центрів кривини призначається в межах діапазону, межі якого визначені на основі аналізу взаємного розташування стичних, дотичних та прилеглих кіл, які визначаються точками, що належать монотонній кривій (рис. 2).

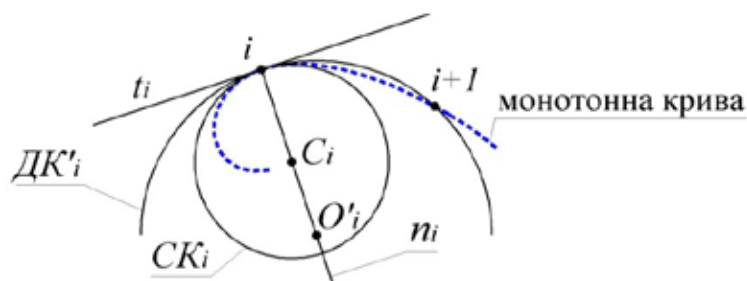


Рис. 2. Розташування стичних і дотичних кіл щодо монотонної кривої

Коло, що дотичне з кривою в точці i та перетинає криву у точці, яка розташована поза CK_i , позначено як DK'_i . Дотичне коло, що проходить через точку розташовану всередині CK_i , позначається як DK_i . На рисунку центри CK_i та DK'_i позначені як C_i та O'_i відповідно.

В результаті аналізу розташування та розмірів стичних та дотичних кіл, які визначаються послідовністю точок призначених на кривій, вздовж якої значення радіусів кривини монотонно збільшуються, отримано співвідношення:

$$\dots < R_{i-1} < R_{DK'_{i-1}} < R_{DK_i} < R_{DK'_i} < R_{DK_{i+1}} < R_{i+1} < \dots, \quad (1)$$

де R_i , R_{DK_i} , $R_{DK'_i}$ – радіуси CK_i , $'DK_i$, DK'_i , відповідно.

Прилегле коло (PK_i) проходить через три послідовні точки $i-1$, i , $i+1$, які призначені на кривій (рис. 3).

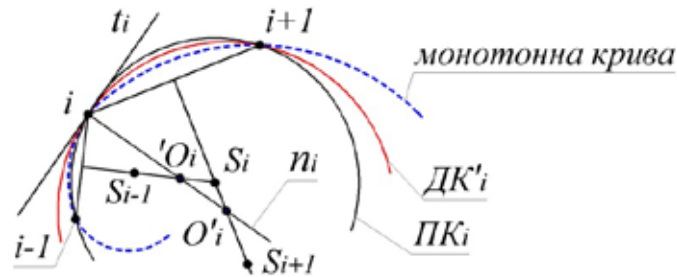


Рис. 3. Розташування прилеглих та дотичних кіл

В результаті аналізу розташування та розмірів прилеглих та дотичних кіл отримано співвідношення:

$$\dots < R_{PK_{i-1}} < R_{DK'_{i-1}} < R_{DK_i} < R_{PK_i} < R_{DK'_i} < R_{DK_{i+1}} < R_{PK_{i+1}} < \dots, \quad (2)$$

де R_{PK_i} – радіус PK_i .

Зі співвідношення (2) випливає умова, при виконанні якої послідовність точок можна інтерполювати монотонною кривою:

$$\dots < R_{PK_{i-1}} < R_{PK_i} < R_{PK_{i+1}} < \dots$$

Співвідношення (1) і (2) визначають діапазони, в межах яких повинні розташовуватися відповідні вихідним точкам нормалі та центри кривини монотонної кривої, що інтерполює.

Положення центрів PK_{i-1} , PK_i , PK_{i+1} (точки S_{i-1} , S_i , S_{i+1} відповідно) визначає межі можливого розташування нормалі n_i кривої у вихідній точці i . Для виконання (2) нормаль n_i повинна перетинати відрізки $[S_{i-1}, S_i]$ та $[S_i, S_{i+1}]$ одночасно. Точки O'_i та O'_{i+1} , у яких нормаль перетинає ці відрізки, є центрами $'DK_i$ та DK'_i відповідно. Одночасно для виконання (1) нормаль n_{i-1} повинна перетинати відрізок $[S_{i-1}, O'_i]$, а нормаль n_{i+1} – відрізок $[O'_{i+1}, S_{i+1}]$. Для досягнення рівномірного збільшення значень кривини вздовж кривої, що формується, оптимальним буде положення нормалей n_i і n_{i+1} , при якому вони поділяють відрізок $[S_i, S_{i+1}]$ на рівні частини: $|S_i, O'_i| = |O'_i, O'_{i+1}| = |O'_{i+1}, S_{i+1}|$. У статті [15] запропоновано алгоритм одночасного призначення нормалей у всіх вихідних точках, при яких вони поділяють відповідні відрізки, обмежені центрами прилеглих кіл, у пропорції близькій до оптимальної.

Призначене положення нормалі автоматично визначає діапазон можливого розташування центру кривини, що їй належить. Відповідно до (1) для нормалі n_i таким діапазоном є відрізок $[O'_i, O'_{i+1}]$. Положення центрів кривини призначається всередині зазначених діапазонів з урахуванням властивостей еволюти монотонної кривої [16]:

- еволюта є опуклою кривою лінією;
- нормалі кривої лінії є дотичні її еволюти у відповідних центрах кривини;
- довжина будь-якої ділянки еволюти дорівнює різниці значень радіусів кривини в точках, що обмежують відповідну ділянку вихідної кривої.

Призначені у вихідних точках нормалі інтерполюючої кривої і центри кривини, що їм належать, визначають послідовність базисних трикутників (BT_i) (рис. 4).

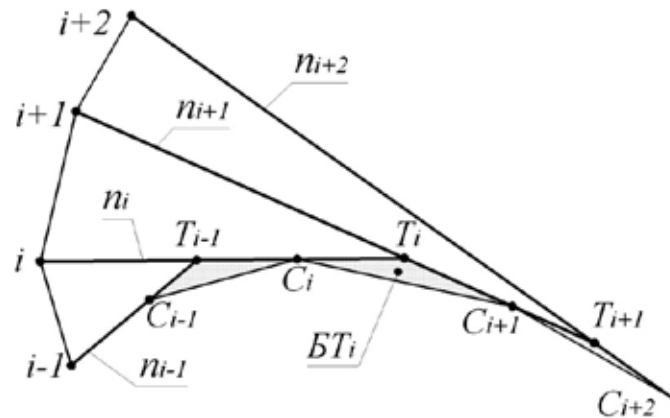


Рис. 4. Послідовність базисних трикутників

Методика призначення положень центрів кривини інтерполюючої кривої, які відповідають вихідним точкам, забезпечує виконання для кожного з базисних трикутників співвідношення:

$$|C_i, C_{i+1}|R_{i+1} - R_i|C_i, T_i| + |C_{i+1}, T_i|. \quad (3)$$

Співвідношення (3) є необхідною умовою формування в межах кожного з базисних трикутників ділянки еволюти монотонної кривої лінії, яка інтерполює задані вихідні точки. Отримана область розташування еволюти визначає криву, що інтерполює, з точністю, яка визначається вихідним точковим рядом. При вирішенні практичних завдань ця точність може бути недостатньою.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою статті є розробка алгоритму інтерполяції, що реалізує спосіб формування на основі вихідної області розташування еволюти інтерполюючої кривої нової послідовності, що складається з будь-якої великої кількості вихідних і проміжних точок, які з заданою точністю представляють монотонну криву.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- розробити спосіб призначення положень нормалей та центрів кривини, що відповідають проміжним точкам кривої;
- розробити спосіб визначення положень проміжних точок інтерполюючої кривої, що відповідають призначеним для них характеристикам;
- запропонувати спосіб визначення абсолютної похибки, з якою послідовність точок, що формується, представляє монотонну криву;
- випробувати запропоновані способи щодо положень проміжних точок для вихідної послідовності точок, призначених на монотонній кривій лінії;
- сформулювати алгоритм інтерполяції, що реалізує запропоновані способи.

Розробка зазначених способів потребує вирішення наступних завдань:

- визначення області можливого розташування нормалі інтерполюючої монотонної кривої в проміжній точці;
- визначення області можливого розташування центру кривини, що відповідає проміжній точці;
- визначення області розташування проміжної точки.

Основна частина. Після призначення для вихідних точок центрів кривини згущення може здійснюватися локально на окремих ділянках і в довільній послідовності. Умовою призначення точки згущення є існування області можливого розташування монотонної кривої лінії,

яка інтерполуює послідовність точок, що формується. Кожен крок згущення передбачає послідовне визначення положення нормалі, центру кривини та відповідної точки згущення. Кожен із зазначених елементів призначається в межах діапазону, межі якого визначаються виходячи з характеристик кривої, що інтерполуює.

Призначивши нормаль n_{ce} , що відповідає точці згущення i -ї ділянки (i_{ce}) і центр кривини (C_{ce}), розташований на цій нормалі, всередині вихідного BT_i отримуємо два нових базисних трикутники – C_i, C_{ce}, T_1 ($'BT_{ce}$) та C_{ce}, C_{i+1}, T_2 (BT'_{ce}). За умови розташування ділянки еволюти монотонної кривої в межах $'BT_{ce}$ та BT'_{ce} слід (рис. 5):

$$|C_b C_{ce}| + |C_{ce} C_{i+1}| \leq R_{i+1} - R_i \leq |C_b T_1| + |T_1 T_2| + |T_2 C_{i+1}|. \quad (4)$$

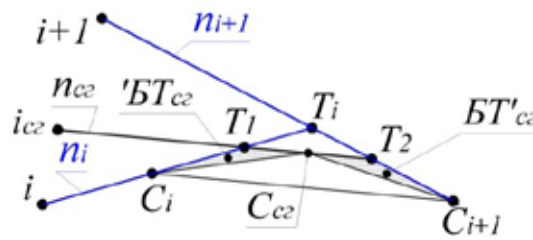


Рис. 5. Згущення ділянки вихідної послідовності точок

Визначимо межі діапазону, у кордонах якого має розташовуватися нормаль n_{ce} відповідно до умови (4). При цьому вимагаємо, щоб n_{ce} була паралельна прямій (C_b, C_{i+1}) . Зазначене обмеження коректне, оскільки ділянка еволюти (C_b, C_{i+1}) – опукла крива. Це гарантує наявність в одній із точок ділянки еволюти дотичної прямої, яка паралельна хорді $[C_b, C_{i+1}]$.

Положення n_{ce} , коли відстань між нормаллю та прямою (C_b, C_{i+1}) мінімальна, визначається співвідношеннями:

$$\begin{cases} |C_i, T_1| + |T_1, T_2| + |T_2, C_{i+1}| = R_{i+1} - R_i; \\ |C_i, T_1| : |C_i, T_i| = |C_{i+1}, T_2| : |C_{i+1}, T_i|. \end{cases} \quad (5)$$

Виходячи з (5) і подоби трикутників C_i, C_{i+1}, T_i та T_1, T_2, T_i мінімальну відстань між n_{ce} і прямою (C_b, C_{i+1}) (h_{min}) можна виразити через параметри вихідного BT_i :

$$h_{min} = \frac{2S(R_{i+1} - R_i - c)}{c(a + b - c)}, \quad (6)$$

де S – площа BT_i , $a = |C_b, T_i|$, $b = |C_{i+1}, T_i|$, $c = |C_b, C_{i+1}|$.

У разі коли відстань між n_{ce} і (C_b, C_{i+1}) дорівнює h_{min} , ламана $C_i - T_1 - T_2 - C_{i+1}$ є єдиним варіантом еволюти ділянки монотонної кривої $(i, i+1)$ і ця ділянка складається з двох гладко зістигнених дуг кіл з центрами в точках T_1 і T_2 .

Максимально можлива відстань (h_{max}) між n_{ce} та (C_b, C_{i+1}) дорівнює висоті трикутника C_b, C_{i+1}, C_{ce} , сторони якого визначаються співвідношеннями:

$$\begin{cases} |C_b, C_{ce}| + |C_{ce}, C_{i+1}| = R_{i+1} - R_i; \\ |C_b, C_{ce}| = |C_{ce}, C_{i+1}|. \end{cases} \quad (7)$$

Відстань від точки C_{ce} до прямої (C_b, C_{i+1}) не може перевищувати величину h_{max} , яку можна розрахувати за формулою:

$$h_{max} = \frac{1}{2} \sqrt{(R_{i+1} - R_i)^2 - |C_b, C_{i+1}|^2}. \quad (8)$$

Якщо відстань від точки C_{cr} до прямої (C_i, C_{i+1}) дорівнює h_{max} , то ділянка монотонної кривої $(i, i+1)$ складається з трьох гладко зістикованих дуг кіл з центрами в точках C_i, C_{cr}, C_{i+1} .

Призначення n_{cr} , відстань якої від (C_i, C_{i+1}) знаходиться в діапазоні $h_{min} < h_{cr} < h_{max}$ дозволяє формувати ділянку еволюти у вигляді гладкої опуклої лінії. Така еволюта задає евольвенту з регулярно і монотонною зміною кривини.

Після призначення положення нормалі n_{cr} на неї визначається діапазон можливого розташування центру кривини C_{cr} . Це відрізок $[C_1, C_2]$, де C_1 – положення точки C_{cr} , при якому радіус кривини (R_{cr}) у точці згущення мінімальний (з можливих положень точки C_{cr} найбільш наближена до точки i_{cr}); C_2 – положення центру кривини, при якому R_{cr} максимальний.

Положення точок C_1 і C_2 визначається з умови $|C_i, C_{cr}| + |C_{cr}, C_{i+1}| = R_{i+1} - R_i$. Виконання умови означає, що у випадку коли R_{cr} максимальний або мінімальний еволюта ділянки кривої – ламана лінія $C_i - C_{cr} - C_{i+1}$, а геометричне місце положень точки C_{cr} – еліпс з фокусами в точках C_i, C_{i+1} та довжиною великої осі, що дорівнює $R_{i+1} - R_i$ [17]. У прямокутній системі декартових координат з початком у центрі відрізка $[C_i, C_{i+1}]$ і позитивним напрямом осі абсцис, що збігається з вектором $\vec{C_i, C_{i+1}}$, цей еліпс визначається рівнянням:

$$\frac{x^2}{(R_{i+1} - R_i)^2} + \frac{y^2}{(R_{i+1} - R_i)^2 - |C_{i+1}, C_i|^2} = \frac{1}{4}. \quad (9)$$

За різних положень нормалі n_{cr} межі діапазону $[C_1, C_2]$ отримуємо в перетині нормалі та еліпса (рис. 6).

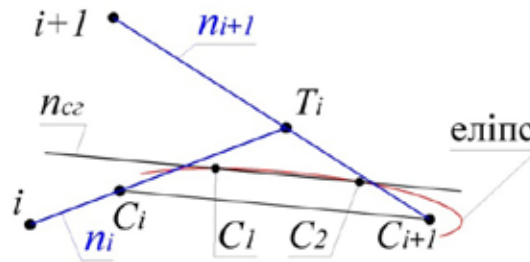


Рис. 6. Визначення діапазону розташування центру кривини

Якщо точки C_1 чи C_2 опиняються поза BT_i , то межею діапазону розташування C_{ce} є точка T_1 чи T_2 відповідно.

Завдання формування послідовності точок, що належать монотонній кривій, має рішення при призначенні центру кривини в будь-якій точці відрізка $[C_1, C_2]$. Якщо це не суперечить додатковим умовам, що накладаються на криву яка формується, то C_{ce} призначається в центрі $[C_1, C_2]$.

Діапазон розташування точки згущення i_{ce} визначається на нормалі n_{ce} виходячи з призначеного положення центру кривини C_{ce} . Цей діапазон обмежений мінімальним (R_{min}) та максимальним (R_{max}) значеннями, які може приймати радіус кривини інтерполюючої кривої в точці згущення:

$$R_{min} \leq R_{cr} \leq R_{max}. \quad (10)$$

Розташування еволюти монотонної кривої в межах $'BT_{cr}$ та BT'_{cr} означає:

$$\begin{cases} |C_i, C_{ce}| \leq R_{ce} - R_i \leq |C_i, T_1| + |T_1, C_{ce}|; \\ |C_{i+1}, C_{ce}| \leq R_{i+1} - R_{ce} \leq |C_{ce}, T_2| + |T_2, C_{i+1}|. \end{cases} \quad (11)$$



Виходячи з (11) в якості нижньої межі діапазону (10) повинна бути призначена більша з величин $R_i + |C_b, C_{cz}|$ або $R_{i+1} - (|C_{i+1}, T_2| + |T_2, C_{cz}|)$. Верхня межа діапазону дорівнює меншій із величин $R_i + |C_b, T_1| + |T_1, C_{cz}|$ або $R_{i+1} - |C_{i+1}, C_{cz}|$.

Покажемо, що запропонована схема призначення положення нормалі n_{cz} та меж діапазону розташування центру кривини $[C_1, C_2]$ гарантує наявність діапазону (10) при будь-якому співвідношенні величин, з яких вибираються значення R_{min} та R_{max} .

Якщо центр кривини займає крайнє положення $C_{cz} \equiv C_2$, то величини $R_i + |C_b, C_{cz}|$ та $R_{i+1} - |C_{i+1}, C_{cz}|$ рівні. Очевидно, що тоді $|C_{i+1}, C_{cz}| < |C_{i+1}, T_2| + |T_2, C_{cz}|$ (рис. 5), а значить і

$$R_i + |C_b, C_{cz}| > R_{i+1} - (|C_{i+1}, T_2| + |T_2, C_{cz}|). \quad (12)$$

При переміщенні C_{cz} від C_2 у бік C_1 відстань $|T_2, C_{cz}|$ збільшується швидше, ніж зменшується $|C_b, C_{cz}|$. Це означає, що співвідношення (12) зберігається, а значення $R_{min} = R_i + |C_b, C_{cz}|$.

Аналогічні міркування доводять:

$$R_{max} = R_{i+1} + |C_{i+1}, C_{cz}|.$$

Виходячи із співвідношень $|C_b, C_{cz}| < |C_b, C_2|$, $|C_{i+1}, C_{cz}| > |C_{i+1}, C_2|$ та $R_i + |C_b, C_2| = R_{i+1} - |C_{i+1}, C_2|$ можна стверджувати, що розташування нормалі n_{cz} в межах діапазону $h_{min} < h_{cz} < h_{max}$, а центру кривизни C_{cz} у межах відрізка $[C_1, C_2]$ гарантує виконання умови $R_{min} < R_{max}$ отже, і наявність діапазону можливого розташування точки згущення.

Значення радіуса кривини в точці згущення призначається рівним $R_{max} = 0,5(R_{min} + R_{max})$. Положення точки згущення визначаємо відклавши від C_{cz} відрізок, довжина якого дорівнює R_{cz} .

Інтерполяція послідовності, що складається із скільки завгодно великого числа точок монотонною кривою лінією можлива за відповідності характеристик базисних трикутників, що задають її еволюту, вимозі (3). Запропонована схема призначення нормалі псг та центру кривини C_{cz} , відповідних точці згущення, гарантує формування всередині вихідного базисного трикутника двох нових базисних трикутників згущення, характеристики яких відповідають вимозі (3). Кожен вихідний або отриманий в результаті згущень базисний трикутник задає область можливого розташування відповідної ділянки інтерполюючої кривої [12].

Збереження заданих характеристик базисних трикутників, що формуються в процесі будь-якої кількості згущень, дозволяє стверджувати, що послідовне призначення нормалей, центрів кривини і точок згущення в межах діапазонів, що враховують область можливого вирішення задачі, гарантує формування точкового ряду, який можна інтерполювати монотонною кривою лінією.

Розв'язання задачі формування точкового ряду, який можна інтерполювати монотонною кривою лінією розглянемо на прикладі згущення послідовності точок, призначених на гілці параболи, яка задана рівнянням $y = \frac{x^2}{300}$. В якості вихідної взята послідовність точок, яка була використана в роботі [15] для визначення області розташування еволюти монотонної кривої лінії.

Характеристики вихідної послідовності точок наведені у таблиці 1.

Після призначення нормалей та центрів кривини монотонної кривої лінії, що відповідають вихідним точкам, отримана область розташування еволюти монотонної кривої. Характеристики вихідної області розташування еволюти наведено у таблиці 2.

Послідовність згущення точкового ряду покажемо на прикладі третьої вихідної ділянки.

Діапазон розташування нормалі монотонної кривої в точці згущення визначається мінімальною $h_{min} = 0,887$ мм і максимальною $h_{max} = 1,258$ мм відстанню між нормаллю та основою BT_3 . Після призначення положення нормалі по центру зазначеного діапазону на ній визначено діапазон розташування центру кривини монотонної кривої у точці згущення: $|C_1, C_2| = 9,873$ мм.



Призначені положення нормалі та центру кривини, що відповідають точці згущення, визначили діапазон її можливого розташування, величина якого дорівнює $R_{\min} - R_{\max} = 0,009$ мм.

Після призначення за аналогічною схемою точок згущення інших ділянок отримано послідовність точок, характеристики якої наведені у таблиці 3.

Таблиця 1

Характеристики вихідного точкового ряду

i	Координати точки, мм		Довжина хорди супровідної ламаної лінії, мм	Радіус прилеглого кола, мм	Сектор розташування нормалі, °
	x	y			
1	30	3	31,32	–	–
2	60	12	33,54	188,58	1,074
3	90	27	36,62	238,73	1,074
4	120	48	84,85	348,37	1,386
5	180	108	103,23	570,09	2,727
6	240	192	123,55	1002,64	2,244
7	300	300	–	–	–

Таблиця 2

Характеристики області розташування еволюти монотонної кривої

i	Радіус дотичного кола, мм		Радіус кривини монотонної кривої, мм	Діапазон розташування нормалі, мм	Діапазон розташування центру кривини, мм	Діапазон розташування точки згущення, мм
	$R'_{ДК_i}$	$R_{ДК'_i}$				
1	–	166,74	155,10	0,274	6,782	0,008
2	176,10	201,94	184,56	0,312	7,895	0,008
3	218,66	260,65	239,79	0,371	9,873	0,009
4	319,22	384,88	350,61	0,428	38,581	0,011
5	468,62	693,55	569,53	0,527	52,231	0,023
6	837,83	1200,0	986,86	0,863	112,846	0,058
7	1422,14	–	1729,04	–	–	0,146

Таблиця 3

Характеристики згущеного точкового ряду

i	Координати точки, мм		Довжина хорди супровідної ламаної лінії, мм	Радіус прилеглого кола, мм	Радіус дотичного кола, мм		Радіус кривини монотонної кривої, мм
	x	y			$R'_{ДК_i}$	$R_{ДК'_i}$	
1	30	3	14,62	–	–	153,27	155,10
2	44,2	6,5	16,73	167,13	161,14	173,61	165,84
3	60	12	15,44	187,53	182,48	196,5	184,56
4	74,1	18,3	18,12	212,79	205,80	221,59	212,81
5	90	27	17,28	237,99	231,11	247,40	239,79
6	104,5	36,4	19,36	266,25	258,71	277,96	266,26
7	120	48	18,03	352,14	342,08	358,21	350,61
8	148,3	73,4	46,93	428,94	392,05	474,50	426,13
9	180	108	45,19	564,34	519,17	626,10	569,53
10	207,7	143,7	58,10	741,47	704,36	800,27	741,70
11	240	192	52,09	949,93	887,12	1087,21	986,86
12	266,4	236,9	71,49	1448,43	1367,221	1666,43	1438,99
13	300	300	–	–	1694,45	–	1729,04



В результаті згущення сформовано нову послідовність точок. Значення радіусів прилеглих кіл уздовж отриманих точок послідовно збільшуються, що є необхідною умовою їхньої подальшої інтерполяції монотонною кривою. Нормалі, призначені у вихідних точках та точках згущення, визначають нову послідовність дотичних кіл. Співвідношення значень радіусів прилеглих, дотичних і стичних кіл відповідає умовам (1) і (2), що підтверджує коректність призначених характеристик інтерполюючої кривої.

Для оцінки абсолютної похибки, з якою отримана в результаті згущення послідовність точок задає криву, що інтерполює, можна використовувати діапазон розташування точки згущення (10). Після того, як довжина діапазону для кожної з ділянок згущеної послідовності точок стає менше заданої величини, послідовність вважається сформованою. Залежно від умов поставленого завдання, крива, що інтерполює, може бути представлена областю можливого розташування або обводом. У другому варіанті в межах області можливого розташування інтерполюючої кривої формується гладкий обвід, складений з дуг кіл [13], еліпсів або B-сплайном [14]. Запропонована в [13] методика формування обводу забезпечує найбільшу точність подання кривої, що інтерполює.

В результаті проведених досліджень запропоновано алгоритм формування гладкого обводу, який із заданою точністю представляє криву, яка інтерполює послідовність точок довільної конфігурації.

1. Вихідна послідовність точок поділяється на частини, вздовж яких радіуси прилеглих кіл збільшуються або зменшуються. Кожна з таких частин визначає монотонну криву лінію.

2. Для кожної вихідної точки визначається діапазон розташування нормалі монотонної кривої, у межах якого призначається положення нормалі. Положення центрів кривини призначаються у межах відрізків, які належать відповідним нормалям, межі яких забезпечують виконання умови (3). Нормалі та призначені на них центри кривини задають послідовність базисних трикутників, яка є вихідною областю можливого розташування еволюти інтерполюючої кривої.

3. Виконується локальне згущення ділянок вихідної послідовності точок. Точка згущення призначається в межах діапазону, що визначається положенням нормалі та центру кривини, попередньо призначених для точки згущення, а також нормаллями та центрами кривини, що задають відповідний базисний трикутник. Точковий ряд вважається сформованим, коли діапазони розташування точки згущення на всіх ділянках стають меншими за задану точність інтерполяції.

4. Отримана послідовність базисних трикутників задає область можливого розташування інтерполюючої кривої в межах якої формується обвід.

Висновки. У роботі запропоновано спосіб формування послідовності, що складається із заданих вихідних та призначених проміжних точок, які можна інтерполювати монотонною кривою лінією.

Вихідними даними визначення положень проміжних точок є координати вихідних точок і конфігурація області можливого розташування еволюти інтерполюючої кривої. Область розташування еволюти обмежена послідовністю базисних трикутників, що визначається характеристиками кривої, що інтерполює, – нормаллями, призначеними у вихідних точках, і центрами кривини, призначеними на цих нормаллях.

Алгоритм призначення положення проміжної точки засновано на формуванні області розташування еволюти монотонної кривої, що інтерполює отриману послідовність точок. Основу алгоритму складають розроблені у роботі способи:

- призначення положень нормалей інтерполюючої кривої, що відповідають проміжним точкам;
- призначення положень центрів кривини, що належать цим нормаллям;



– визначення положень проміжних точок, що відповідають призначеним нормалям та центрам кривини.

Для кожної проміжної точки положення нормалі призначається в межах діапазону, межі якого однозначно визначаються положенням нормалей та центрів кривини, призначених для попередньої та наступної вихідних точок. Призначення нормалі всередині діапазону визначає відрізок, що належить їй, який є діапазоном можливого розташування центру кривини монотонної кривої в проміжній точці.

В результаті призначення нормалі та центру кривини, всередині вихідного базисного трикутника отримуємо два нових базисних трикутники, конфігурація яких визначає межі діапазону можливого розташування проміжної точки. Кожен із трикутників є областю розташування ділянки еволюти інтерполюючої кривої, яка обмежена призначеною проміжною точкою та однією з двох вихідних точок (попередньою або наступною).

Призначення нормалі, центру кривини або проміжної точки в крайньому з можливих положень задає відповідну ділянку еволюти у вигляді ламаної лінії, а ділянка кривої, що інтерполює, буде складатися з гладко зістикованих дуг кіл. В результаті призначення зазначених елементів усередині відповідних діапазонів отримуємо нову послідовність точок та характеристики регулярної монотонної кривої, яка інтерполює ці точки.

Після призначення проміжної точки вона розглядається як вихідна для призначення наступних точок. Проміжні точки можуть призначатися на вихідних ділянках у довільній послідовності, а їхнє остаточне число може бути як завгодно велике. Всі монотонні криві, що інтерполюють послідовність точок, що формується, і мають в них призначені характеристики, проходять всередині діапазону можливого розташування проміжної точки на кожній з ділянок. Довжиною зазначених діапазонів можна оцінювати абсолютну похибку, з якою послідовність точок задає криву, що інтерполює. Після того, як максимальна абсолютна похибка стає меншою за задану величину, послідовність точок вважається сформованою.

Коректність запропонованого алгоритму та його складових способів досліджена при інтерполяції послідовності точок, призначених на гілці параболи. Як вихідна взята послідовність з 7 точок, яка була використана в роботі [15] для визначення вихідної області розташування еволюти монотонної кривої лінії. В результаті призначення проміжної точки на кожній із ділянок, обмежених сусідніми вихідними точками, сформована нова послідовність з 13 точок. Конфігурація отриманої послідовності точок і призначені в них характеристики інтерполюючої кривої відповідають умовам належності точок до монотонної кривої лінії. Ця відповідність забезпечує подальше збільшення кількості проміжних точок при збереженні можливості інтерполяції послідовності точок, що формується, монотонною кривою лінією.

Призначення положень проміжних точок і характеристик кривої лінії, що інтерполює, на основі області можливого розташування її еволюти спрощує геометричну схему вирішення задачі, зменшує кількість необхідних обчислень, забезпечує задану точність дискретної інтерполяції.

Отримані у цій роботі результати доповнюють результати, отримані в роботах [13–15]. В результаті отримано метод та алгоритм формування обводу, який із заданою точністю представляє регулярну криву лінію, що містить мінімальну кількість особливих точок та інтерполює вихідну послідовність точок довільної конфігурації.

Алгоритм пропонує послідовне вирішення наступних завдань:

- вихідна послідовність точок розбивається на частини, які можна інтерполювати кривою лінією, яка не містить особливих точок;
- формуються послідовності, що складаються з вихідних та проміжних точок, які із заданою точністю задають монотонні частини інтерполюючої кривої;



- формуються області можливого розташування монотонних частин інтерполуючої кривої;
- формується обвід, що складається з ділянок безперервних ліній, який інтерполуює отриману послідовність точок і розташовується всередині області можливого розташування кривої, що інтерполуює.

Список використаних джерел

1. Гавриленко Є.А., Холодняк Ю.В., Найдіш А.В., Лебедев В.А. Створення САД-моделей поверхонь із використанням спеціалізованого програмного забезпечення. *Прикладні питання математичного моделювання*. Херсон : ХНТУ, 2020. Т. 3, № 2.2. С. 66–75.
2. Гавриленко Є.А., Холодняк Ю.В., Тетервак І.Р. Метод інтерполяції точкових рядів для формування гладких обводів. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. К. : КНУБА, 2024. Вип. 107. С. 54–73. URL: <http://ageg.knuba.edu.ua/article/view/323559>
3. Ковальов Ю.М. Основи геометричного моделювання : навч. посіб., К. : Вища школа, 2003. 231 с.
4. Найдіш В.М. Дискретна інтерполяція : навч. посіб., Мелітополь : Люкс, 2008. 250 с.
5. Холодняк Ю. В. Варіативне дискретне геометричне моделювання обводів на основі базисних трикутників по заданому закону зміни кривини : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Мелітополь, 2016. 24 с.
6. Werghe N., Fisher R., Robertson C., Ashbrook A.: Object reconstruction by incorporating geometric constraints in reverse engineering. *Comput. Aided Des.* 31, 1999, 363–399. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0010-4485\(99\)00038-X](https://doi.org/10.1016/S0010-4485(99)00038-X).
7. Cai C., Yang Y., Jia Y., Wu G., Zhang H., Yuan F., Qian Q., Li Q.: Aerodynamic load evaluation of leading edge and trailing edge windward states of large-scale wind turbine blade under parked condition. *Appl. Energy*. 350, 2023, 121744. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121744>.
8. Hashemian A., Imani B. M.: A new quality appearance evaluation technique for automotive bodies including effect of flexible parts tolerances. *Mech. Based Des. Struct. Mach.* 46, 2018, 157–167. DOI: <https://doi.org/10.1080/15397734.2017.1321487>.
9. Hewett D. P., Ockendon J. R., Smyshlyaev, V. P.: Contour integral solution of the parabolic wave equation. *Wave Motion*. 84, 2019, 90–109 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2018.09.015>.
10. Hashemian A., Hosseini S. F.: An integrated fitting and fairing approach for object reconstruction using smooth NURBS curves and surfaces. *Comput. Math. with Appl.* 76(7), 2018, 1555–1575. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.camwa.2018.07.007>.
11. Massarwi F., Elber G. A B-spline based framework for volumetric object modeling. *Comput. Aided Design*. 78, 2016, 36–47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2016.05.003>.
12. Havrylenko Y., Cortez J. I., Kholodniak Y., Aliksieieva H., Garcia G. T.: Modelling of surfaces of engineering products on the basis of array of points. *Teh. Vjesn.* 27(6), 2020, 2034–2043. DOI: <https://doi.org/10.17559/TV-20190720081227>.
13. Havrylenko Y., Kholodniak Y., Halko S., Vershkov O., Bondarenko L., Suprun O., Miroshnyk O., Shchur T., Šrutek M., Gackowska M.: Interpolation with Specified Error of a Point Series Belonging to a Monotone Curve. *Entropy* 23(5), 2021, 493. DOI: <http://doi.org/10.3390/e23050493>.
14. Havrylenko Y., Kholodniak Y., Halko S., Vershkov O., Miroshnyk O., Suprun O., Dereza O., Shchur T., Šrutek M.: Representation of a Monotone Curve by a Contour with Regular Change in Curvature. *Entropy* 23(7), 2021, 923 DOI: <http://doi.org/10.3390/e23070923>.
15. Kholodniak Y., Havrylenko Y., Halko S., Hnatushenko V., Suprun O., Volina T., Miroshnyk O., Shchur T.: Improvement of the algorithm for setting the characteristics of interpolation monotone curve. *Informatyka, Automatyka, Pomiarzy W Gospodarce I Ochronie Środowiska*, 13(4), 2023, 44–50. DOI: <https://doi.org/10.35784/iapgos.5392>.
16. Robbin J. W., Salomon D. A.: Introduction to Differential Geometry. Springer Spektrum, Zürich 2022, 432.
17. MacLane S.: Mathematics Form and Function. Springer, 1986.

Дата першого надходження статті до видання: 20.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 10.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 25.05.2026

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



**Ye. Havrylenko, O. Matsulevych***Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University***ALGORITHM FOR FORMING A CONTOUR BASED ON THE LOCATION AREA OF THE EVOLUTE OF A MONOTONE CURVE*****Summary***

Algorithms for geometric modeling of curved lines with a given combination of characteristics interpolating point sequences of complex configurations form the basis for developing computer-aided design systems for products bounded by functional surfaces. The surface is modeled using ruled frameworks, the elements of which are formed by interpolating point sequences. The key characteristics of the interpolating curve, which ensure the required surface properties, are regular changes in curvature values and a minimal number of singular points. This article develops a method for generating a sequence consisting of an arbitrarily large number of specified initial and assigned intermediate points, which can be interpolated by a monotonic curve. The positions of the intermediate points are determined based on pre-assigned characteristics of the interpolating curve—the positions of normals and curvature values. All monotonic curves interpolating the generated point sequence and having assigned characteristics lie within the range of possible intermediate point locations in each section. The length of the specified ranges can be used to estimate the absolute error with which the resulting point sequence defines the interpolating curve. The method developed in this paper is a necessary step in creating a contour generation algorithm located within the boundaries of the possible location of a monotonic curved line. The results obtained in this paper complement those of previous studies. As a result, a contour generation algorithm has been proposed that, with a given accuracy, represents a regular curved line containing a minimum number of singular points and an interpolating sequence of points of arbitrary configuration. The correctness of the solutions proposed in this paper is confirmed by the solution to a test example.

Keywords: interpolation, monotonous curved line, intermediate points, normal, center of curvature, evolute, curve extension area, outline, distortion.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-2-10>

УДК 621.039.58

С. В. Гулієнко, канд. техн. наук, доц.

ORCID: 0000-0002-9042-870X

В. В. Ясеньчук, аспірант

ORCID: 0009-0006-1012-9475

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

e-mail: 1vitaliy10@ukr.net

ВПЛИВ КУТА ОРІЄНТАЦІЇ КРУГЛОГО ТА ТРИКУТНОГО СПЕЙСЕРА НА ГІДРАВЛІЧНИЙ ОПІР

Анотація. У статті представлено результати досліджень впливу кута орієнтації круглого та трикутного спейсера на гідравлічний опір у каналах зворотного осмосу. Метою роботи було проведення чисельного моделювання гідродинаміки процесу і порівняння втрат тиску для стандартних спейсерів із круглими нитками та нового запропонованого спейсера з трикутним перерізом за кутів 90° та 45° . Наукова новизна полягає у вперше системному аналізі взаємного впливу форми поперечного перерізу спейсера та кута розташування ниток на гідродинаміку каналу.

Доведено, що трикутний профіль знижує перепад тиску на 20–30 % порівняно з круглим аналогом. Кут 45° для обох типів генерує вищий опір, ніж 90° , проте різниця між кутами для трикутних ниток менша, що свідчить про часткову компенсацію гідравлічних втрат завдяки оптимізованому обтіканню та зменшенню зон рециркуляції. Практична цінність дослідження полягає у запропонованому підході до розділення параметрів проектування: геометрія перерізу використовується для мінімізації ΔP , а кут орієнтації – для регулювання інтенсивності перемішування та стійкості до забруднення. Встановлено, що спейсер із трикутними нитками під 45° дозволяє зберегти переваги діагональної конфігурації щодо пригнічення концентраційної поляризації без критичного зростання енерговитрат. Отримані результати створюють теоретичну та інженерну основу для впровадження енергоефективних спейсерів у промислові мембранні модулі опріснення та очищення води.

Ключові слова: зворотний осмос, геометрія ниток, круглий переріз, трикутний переріз, кут орієнтації, перепад тиску, CFD-моделювання, енергоефективність, концентраційна поляризація.

Постановка проблеми. Однією з ключових проблем, з якими стикається людство, є забезпечення доступу до питної води. Ефективним шляхом її розв'язання є мембранне опріснення, серед якого технологія зворотного осмосу посідає провідне місце завдяки високій селективності та модульності [1–2].

Однак основним стримуючим фактором масового впровадження цієї технології залишається висока енергоємність процесу, значна частина якої витрачається на подолання гідравлічного опору живильного каналу. Ключовим елементом, що формує цей опір, є спейсер, який не лише забезпечує структурну цілісність мембранного пакета, але й ініціює гідродинамічні збурення для зменшення концентраційної поляризації та забруднення поверхні [3–4].

Попри десятиліття інженерної оптимізації, традиційні спейсери з круглими нитками демонструють обмежену ефективність через інтенсивний відрив потоку та утворення зон застою, що призводить до надмірних втрат тиску. Актуальність дослідження зумовлена нагальною потребою у зниженні питомої енерговитрати мембранних систем.

Наукова новизна полягає у комплексному підході до дослідження параметрів спейсера, а саме в роботі проаналізовано як вплив форми стандартного спейсера з круглим поперечним перерізом та раніше запропонованого модернізованого спейсера з трикутним поперечним перерізом [5], так і кута їх орієнтації 90° та 45° відносно вектора потоку.



Аналіз останніх досліджень. Упродовж останніх років інтенсифікація досліджень у галузі гідродинаміки спейсерних каналів зосереджувалася на пошуку оптимального балансу між масопереносом та гідравлічними втратами. Численні експериментальні та CFD-дослідження підтвердили, що кут орієнтації ниток є визначальним фактором [6–7]: конфігурація 45° забезпечує інтенсивніше перемішування, вищі дотичні напруження на мембрані та краще пригнічення концентраційної поляризації, але генерує вищий перепад тиску порівняно з ортогональною структурою 90° . Паралельно розвивалися підходи до модифікації геометрії спейсерів – досліджувалися овальні, гофровані, асиметричні та 3D-друковані профілі, які у окремих випадках демонстрували потенціал до зниження опору потоку, однак економічність виготовлення цих конфігурацій під питанням [8–9]. Відсутні системні дані щодо поведінки ниток з трикутним перерізом, теоретично здатних мінімізувати опір завдяки спрямованому обтіканню та локалізації відриву потоку біля гострих ребер. Саме ця прогалина – відсутність кількісної оцінки взаємодії геометрії перерізу та кута орієнтації у контексті гідравлічного опору – визначає предмет даної роботи та обґрунтовує необхідність спеціалізованого симуляційного дослідження, присвяченого розв'язанню цього питання.

Мета статті – є порівняння гідравлічного опору спейсерів із круглими та трикутними нитками при орієнтації 90° і 45° , кількісне визначення переваг трикутного профілю щодо зниження втрат тиску та обґрунтування оптимальної конфігурації для мінімізації енерговитрат у мембранних системах зворотного осмосу.

Основна частина. У даній роботі чисельне моделювання гідродинамічних процесів у каналах зі спейсерами виконувалося із застосуванням відкритого програмного забезпечення OpenFOAM-v2212, яке реалізує метод скінченних об'ємів для розв'язання задач механіки суцільних середовищ у наукових дослідженнях. Доцільність використання цього програмного комплексу для моделювання мембранних процесів підтверджена численними публікаціями [10–11], де продемонстровано його здатність адекватно відтворювати структуру турбулентних течій у складних геометріях та коректно прогнозувати гідравлічні втрати в каналах зі спейсерами. Побудова геометричних моделей досліджуваних конфігурацій спейсерів здійснювалася у FreeCAD 1.0.1, що дозволило з високою точністю задати параметри двох типів поперечного перерізу ниток (круглий та трикутний). Візуалізація та аналіз полів швидкостей, здійснювалися за допомогою ParaView 5.10.1. Використання цього інструменту дозволило виконати детальний якісний та кількісний аналіз структури течії, ідентифікувати зони відриву потоку, рециркуляції та локальні піки тиску, а також забезпечити наочне представлення отриманих даних.

Дослідження виконано для періодичного фрагмента міжмембранного каналу спіральнo-згорнутого мембранного модуля. Розрахункова область включала характерну комірку каналу з урахуванням геометрії нитки спейсера та поверхонь мембрани. Такий підхід є загальноприйнятним у CFD-аналізі регулярних структур і дозволяє коректно відтворити локальні гідродинамічні ефекти, що визначають інтегральний гідравлічний опір [12]. У межах роботи було змодельовано чотири базові конфігурації спейсерів, що зображені на рисунку 1.

Гідродинамічні дослідження гідравлічних характеристик спейсерів дозволили встановити чіткі закономірності впливу геометрії ниток та кута їхньої орієнтації на опір потоку в каналі. Отримані дані узагальнено на графічній залежності (рис. 2) та в табличній формі (табл. 1, 2), що дає змогу провести детальний порівняльний аналіз.

Загальна характеристика гідродинамічного опору Як видно з графіка (рис. 2), для всіх чотирьох досліджуваних конфігурацій спостерігається монотонне зростання гідравлічного опору зі збільшенням витрати живильного розчину. Ця залежність є нелінійною, що свідчить про перехід від ламінарного до перехідного та турбулентного режимів течії в діапазоні витрат 0,2–2,0 л/год. При цьому криві чітко розділяються на дві групи залежно від кута орієнтації

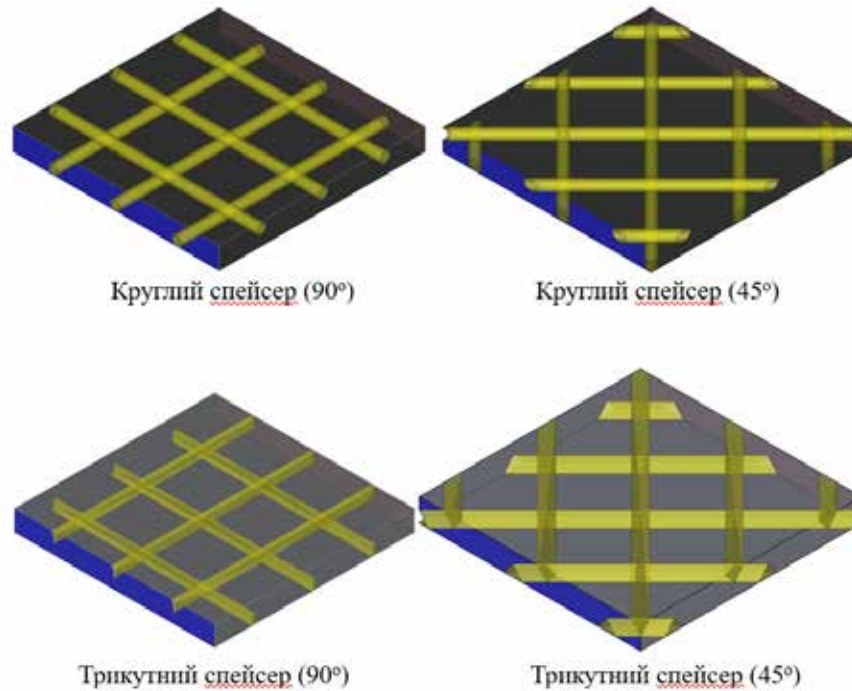


Рис. 1. Конфігурації досліджуваних спейсерів

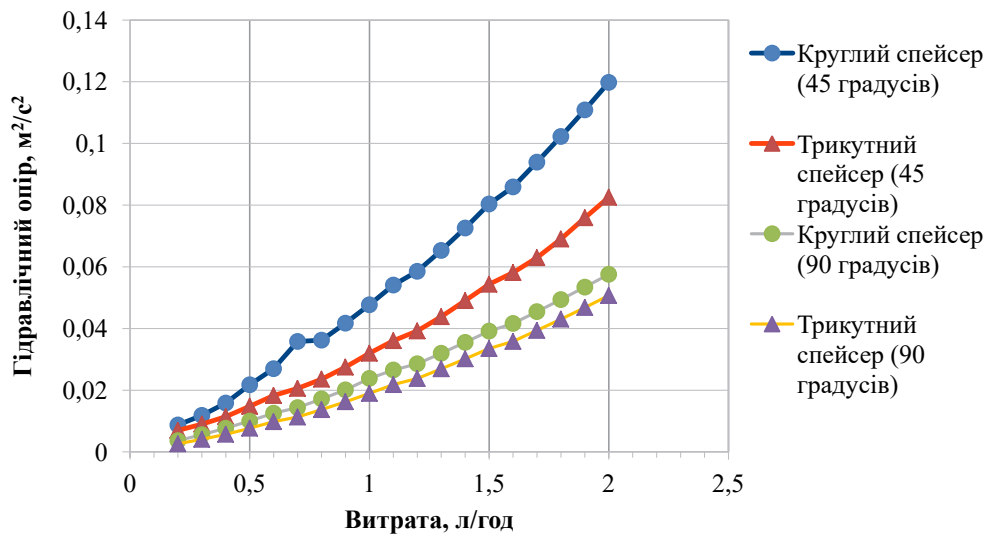


Рис. 2. Графік залежності гідрравлічного опору від витрати

ниток: конфігурації під кутом 45° (синя та червона лінії) демонструють значно вищий опір порівняно з конфігураціями під кутом 90° (сіра та жовта лінії). Порівняння кутів 90° та 45° підтверджує відомі гідродинамічні ефекти [13]. При куті 45° потік рідини змушений долати більшу кількість перешкод на одиницю довжини каналу, а траєкторія руху стає більш звивистою. Це призводить до інтенсифікації вихроутворення та збільшення шляху тертя, що і фіксується у вигляді вищого гідрравлічного опору. Наприклад, при витраті 2,0 л/год гідрравлічний опір круглого спейсера під 45° майже вдвічі перевищує гідрравлічний опір аналогічного спейсера під 90°. Це узгоджується з літературними даними про те, що діагональне розташування забезпечує краще перемішування ціною зростання витрат енергії на прокачування.



Таблиця 1

Гідрравлічний опір спейсерів при куті орієнтації ниток 45°

Витрата, л/год	Гідрравлічний опір при куті 45°, м ² /с ²		Відносна різниця, %
	Кругла конфігурація	Трикутна конфігурація	
0,2	0,008745253	0,006975952	20,23
0,3	0,01186524	0,0089887	24,24
0,4	0,015840583	0,011433502	27,82
0,5	0,021777298	0,014804183	32,02
0,6	0,026963259	0,018296189	32,14
0,7	0,035822145	0,020593347	42,51
0,8	0,036240707	0,023560661	34,99
0,9	0,041753287	0,02748982	34,16
1	0,047696327	0,031975853	32,96
1,1	0,054106316	0,03606174	33,35
1,2	0,058543763	0,03921653	33,01
1,3	0,065315394	0,043817863	32,91
1,4	0,072568487	0,049031594	32,43
1,5	0,080370023	0,054358681	32,36
1,6	0,085923179	0,058136188	32,34
1,7	0,093944724	0,062963388	32,98
1,8	0,102273875	0,068991348	32,54
1,9	0,110869201	0,075916481	31,53
2	0,119769104	0,08256529	31,06

Таблиця 2

Гідрравлічний опір спейсерів при куті орієнтації ниток 90°

Витрата, л/год	Гідрравлічний опір при куті 90°, м ² /с ²		Відносна різниця, %
	Кругла конфігурація	Трикутна конфігурація	
0,2	0,003666941	0,002604621	28,97
0,3	0,005571541	0,004083623	26,71
0,4	0,007692416	0,005705789	25,83
0,5	0,009998798	0,007669261	23,30
0,6	0,012569462	0,009798855	22,04
0,7	0,014365227	0,011307715	21,28
0,8	0,017172907	0,013700198	20,22
0,9	0,020110737	0,016248763	19,20
1	0,023807332	0,018953158	20,39
1,1	0,02655454	0,021810348	17,87
1,2	0,028571869	0,023795727	16,72
1,3	0,03197557	0,026925517	15,79
1,4	0,035527248	0,030154846	15,12
1,5	0,039159049	0,033508432	14,43
1,6	0,041648542	0,035820119	13,99
1,7	0,045467927	0,039385523	13,38
1,8	0,049383997	0,043023507	12,88
1,9	0,053421108	0,046805216	12,38
2	0,057571956	0,050688515	11,96

Ключовим результатом роботи є виявлення суттєвої переваги трикутного профілю ниток над традиційним круглим. Для обох кутів орієнтації (45° та 90°) криві опору трикутного спейсера розташовані нижче за відповідні криві круглого спейсера. Фізичне обґрунтування цього явища полягає в аеродинаміці обтікання тіл, яке можна побачити на рисунку 3 з зображеними полями швидкостей.

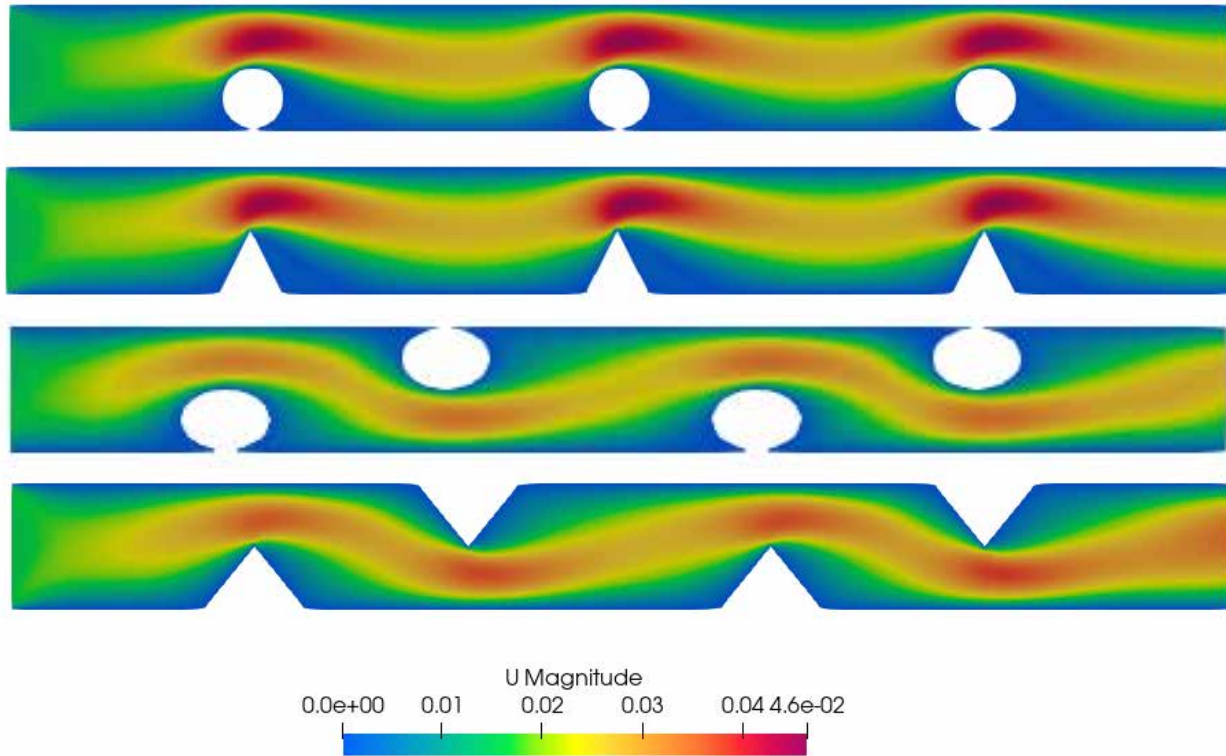


Рис. 3. Поля швидкостей досліджуваних спейсерів

Дані таблиць дозволяють кількісно оцінити вигравш від використання трикутної геометрії: Для кута 45° : Використання трикутних ниток забезпечує стабільне зниження гідравлічного опору на 30–35 % у всьому діапазоні витрат. Навіть при максимальній витраті (2,0 л/год) економія опору залишається високою – 31,06 %. Це свідчить про те, що трикутна форма ефективно працює як у перехідному, так і у розвиненому турбулентному режимі для діагональних спейсерів. Для кута 90° : Ефект від трикутного профілю також є позитивним, але має іншу динаміку. При малих витратах (ламінальний/перехідний режим) зниження опору є максимальним – 28,97 % (при 0,2 л/год). Однак зі збільшенням витрати відносно зниження опору дещо зменшується, досягаючи 11,96 % при 2,0 л/год.

Висновки. У результаті проведеного чисельного моделювання вперше системно оцінено вплив форми круглого та трикутного поперечного перерізу ниток спейсера під різними кутами їхньої орієнтації (90° та 45°) на гідравлічний опір каналу. Доведено, що трикутний профіль ниток забезпечує статистично значуще зниження перепаду тиску на 12–35% порівняно з традиційним круглим аналогом за ідентичних геометричних параметрів. Підтверджено, що для обох типів перерізу орієнтація ниток під кутом 45° генерує вищий гідравлічний опір порівняно з конфігурацією 90° , що пояснюється збільшенням ефективної фронтальної площі перешкоди, частішим перетином потоку з нитками та інтенсифікацією вторинних течій. Однак встановлено важливу закономірність: абсолютна та відносна різниця в опорі між кутами 45° та 90° для трикутних ниток є меншою, ніж для круглих. Це свідчить про те, що оптимізація форми перерізу частково компенсує негативний гідродинамічний вплив діагонального розташування, дозволяючи зберегти переваги кута 45° щодо інтенсифікації масопереносу без пропорційного зростання енерговитрат.

В подальшому планується проведення експериментальних досліджень для подальшої верифікації отриманих даних та виведення критеріальних рівнянь ефективності трикутного спейсера з кутною орієнтацією.

**Список використаних джерел**

1. Alkaisu A., Mossad R., Sharifian-Barforoush A. A Review of the Water Desalination Systems Integrated with Renewable Energy. *Energy Procedia*. 2017. Vol. 110. P. 268–274. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.138>.
2. Advances in Membrane Technologies for Heavy Metal Removal from Polluted Water: A Comprehensive Review / M. Dawam et al. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2025. Vol. 236, no. 7. <https://doi.org/10.1007/s11270-025-08035-6>.
3. Gu B., Adjiman C. S., Xu X. Y. The effect of feed spacer geometry on membrane performance and concentration polarisation based on 3D CFD simulations. *Journal of Membrane Science*. 2017. Vol. 527. P. 78–91. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.12.058>.
4. The evolution of feed spacer role in membrane applications for desalination and water treatment: A critical review and future perspective / N. Sreedhar et al. *Desalination*. 2023. Vol. 554. P. 116505. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116505>.
5. Huliienko S., Yasenchuk V., Gatilov K. Preliminary assessment of the performance of novel design of the spacer for the membrane module. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Екологія Людина Суспільство»*. 2025. P. 148–151.: <https://doi.org/10.20535/ehs2710-3315.2025.330194>.
6. Gu B., Adjiman C. S., Xu X. Y. The effect of feed spacer geometry on membrane performance and concentration polarisation based on 3D CFD simulations. *Journal of Membrane Science*. 2017. Vol. 527. P. 78–91. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.12.058>.
7. Feed spacer mesh angle: 3D modeling, simulation and optimization based on unsteady hydrodynamic in spiral wound membrane channel / K. K. Lau et al. *Journal of Membrane Science*. 2009. Vol. 343, no. 1–2. P. 16–33. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2009.07.001>.
8. Haidari A. H., Heijman S. G. J., van der Meer W. G. J. Optimal design of spacers in reverse osmosis. *Separation and Purification Technology*. 2018. Vol. 192. P. 441–456.
9. Novel spacer geometries for membrane distillation mixing enhancement / A. A. Ibrahim et al. *Desalination*. 2024. P. 117513. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117513>.
10. Designing Centrifugal Membrane Filters with Uniform-Pressure for UF/NF/RO separations / V. Geraldes et al. *Journal of Membrane Science*. 2024. P. 122752. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2024.122752>.
11. Huliienko S. V., Yasenchuk V. V., Protsiuk M. O. Refined Assessment of the Impact of Membrane Module Channel Curvature on Pressure Drop. *Journal of Applied Membrane Science & Technology*. 2025. Vol. 29, no. 1. P. 55–72. <https://doi.org/10.11113/jamst.v29n1.310>.
12. Spacer Designs for Improved Hydrodynamics and Filtration Efficiency in Sea Water Reverse Osmosis / S. Kerdi et al. *Membranes*. 2025. Vol. 15, no. 1. P. 32. <https://doi.org/10.3390/membranes15010032>.
13. Determining effects of spacer orientations on channel hydraulic conditions using PIV / A. H. Haidari et al. *Journal of Water Process Engineering*. 2019. Vol. 31. P. 100820. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100820>.

Дата першого надходження статті до видання: 22.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 14.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 25.05.2026

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



S. Huliienko, V. Yasenchuk

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

INFLUENCE OF THE ORIENTATION ANGLE OF CIRCULAR AND TRIANGULAR SPACERS ON PRESSURE DROP**Summary**

The article presents the results of a study on the influence of the orientation angle of circular and triangular spacers on hydraulic resistance in reverse osmosis channels. The aim of the work was to perform numerical modeling of the process hydrodynamics and to compare pressure losses for standard spacers with circular filaments and a novel proposed spacer with a triangular cross-section at angles of 90° and 45°. The scientific novelty lies in the first



systematic analysis of the mutual influence of the spacer filament cross-sectional shape and the filament orientation angle on the channel hydrodynamics.

It was demonstrated that the triangular profile reduces the pressure drop by 20–30% compared to the circular counterpart. The 45° angle generates higher hydraulic resistance than 90° for both types of spacers. However, the difference between the angles is smaller for triangular filaments, indicating partial compensation of hydraulic losses due to optimized flow streamlining and reduced recirculation zones. The practical value of the study lies in the proposed approach to separating design parameters: the cross-sectional geometry is used to minimize ΔP , while the orientation angle is used to control the intensity of mixing and fouling resistance. It was established that the spacer with triangular filaments at 45° allows maintaining the advantages of the diagonal configuration in terms of concentration polarization suppression without a critical increase in energy consumption. The obtained results provide a theoretical and engineering basis for the implementation of energy-efficient spacers in industrial membrane modules for desalination and water treatment.

Keywords: reverse osmosis, filament geometry, circular cross-section, triangular cross-section, orientation angle, pressure drop, CFD modeling, energy efficiency, concentration polarization.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-2-11>

УДК 626.845

Д. П. Журавель¹, д-р техн. наук
С. І. Пастушенко², д-р техн. наук
М. П. Артёмов³, д-р техн. наук
М. П. Волинкін⁴, інженер

ORCID: 0000-0002-6100-895X
ORCID: 0000-0002-1996-3558
ORCID: 0000-0002-2947-2664
ORCID: 0009-0006-4960-8537

¹Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

²Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут»

³Державний біотехнологічний університет

⁴Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»

e-mail: dmytro.zhuravel@tsatu.edu.ua

ХАРАКТЕРИСТИКА ВІДМОВ ЕЛЕМЕНТІВ ВОДОПОСТАЧАННЯ ДЛЯ СИСТЕМ КРАПЕЛЬНОГО ЗРОШЕННЯ

Анотація. У статті проведено системний аналіз досліджень відмов елементів водопостачання систем зрошення. Розглянуто основні типи відмов насосних станцій, трубопроводів, фільтраційних вузлів, краплинних ліній та систем автоматизації. Проаналізовано причини виникнення відмов, їх вплив на ефективність функціонування зрошувальних систем та методи оцінювання надійності. Встановлено ключові фактори, що визначають інтенсивність відмов, зокрема якість води, гідравлічні режими та рівень технічного обслуговування. Запропоновано напрями підвищення експлуатаційної надійності систем водопостачання.

Ключові слова: інтенсивність відмов, насосні станції, трубопроводи, краплинне зрошення, водопостачання, надійність, гідравлічні режими технічне обслуговування.

Постановка проблеми. Проблема дослідження надійності водопостачання зрошувальних систем набуває особливої актуальності в умовах змін клімату, зростання дефіциту водних ресурсів та підвищення вимог до ефективності сільськогосподарського виробництва. Стабільність функціонування зрошувальних систем безпосередньо залежить від безвідмовної роботи елементів водопостачання – водозабірних споруд, насосних станцій, напірних і розподільчих трубопроводів, фільтраційного обладнання, запірно-регулюючої арматури та засобів автоматизації. Порушення роботи хоча б одного з цих компонентів призводить до зниження тиску та витрати води, нерівномірності поливу, перевитрат електроенергії, аварійних простоїв і, як наслідок, до зменшення врожайності сільськогосподарських культур та економічних збитків. Водночас значна частина існуючих зрошувальних систем характеризується високим ступенем фізичного та морального зношування, що підвищує ймовірність відмов і ускладнює забезпечення стабільних гідравлічних режимів. Особливу небезпеку становлять приховані дефекти трубопроводів, корозійні процеси, кавітаційні явища в насосному обладнанні, гідравлічні удари, а також засмічення фільтраційних елементів через низьку якість води. Недостатній рівень автоматизації та технічної діагностики призводить до несвоєчасного виявлення несправностей і переходу локальних дефектів у масштабні аварії. Незважаючи на наявність окремих досліджень у сфері теорії надійності та експлуатації гідротехнічних систем, питання комплексної оцінки надійності саме систем водопостачання зрошення залишаються недостатньо розробленими, зокрема в частині врахування реальних умов експлуатації, змінних навантажень і впливу якості води на довговічність обладнання. Існує потреба у вдосконаленні методів прогнозування відмов, визначенні інтенсивності їх виникнення, оцінюванні показників безвід-



мовності, довговічності та ремонтпридатності, а також у розробленні науково обґрунтованих рекомендацій щодо підвищення коефіцієнта готовності систем. Таким чином, проблема дослідження надійності водопостачання зрошувальних систем полягає у необхідності створення ефективної методології оцінювання та прогнозування технічного стану їх елементів з урахуванням гідравлічних, конструктивних, експлуатаційних і природно-кліматичних чинників, що дозволить забезпечити безперебійне функціонування систем зрошення, раціональне використання водних та енергетичних ресурсів і підвищення економічної результативності аграрного виробництва.

Аналіз останніх досліджень. Системи зрошення функціонують у складних гідравлічних і експлуатаційних умовах, що зумовлює поступове зношування обладнання та виникнення аварійних ситуацій. Надійність роботи водозабірних споруд, насосних станцій, трубопроводів, фільтраційного обладнання, запірно-регулюючої арматури та систем автоматизації безпосередньо впливає на рівномірність подачі води, енергоспоживання, довговічність технічних засобів і врожайність сільськогосподарських культур [1–5]. Відмови можуть мати як раптовий характер, наприклад унаслідок гідроудару або руйнування труб, так і поступовий – через корозію, ерозійне зношування, старіння матеріалів чи засмічення фільтрів [6–10]. Дослідження показують, що найбільш вразливими елементами є трубопроводи та насосне обладнання, на які припадає основна частка експлуатаційних пошкоджень. Для насосів характерними причинами відмов є зношування підшипників, кавітаційні явища, порушення центрування валів, перевантаження електродвигуна та робота без достатнього водопостачання [11–16]. У трубопровідних мережах переважають корозійні процеси, механічні пошкодження, негативний вплив гідравлічних ударів і деградація полімерних матеріалів під дією температурних коливань та ультрафіолетового випромінювання. Значну роль у зниженні надійності відіграє якість води, зокрема підвищений вміст завислих часток і солей, що спричиняє інтенсивне засмічення фільтрів і краплинних емітерів [17–20]. У наукових дослідженнях для оцінювання надійності застосовують статистичні та ймовірнісні методи, зокрема визначення середнього напрацювання на відмову, інтенсивності відмов, побудову функцій розподілу часу безвідмовної роботи, використання розподілу Вейбулла, а також аналіз видів і наслідків відмов. Отримані дані дозволяють прогнозувати ресурс обладнання, оптимізувати графіки технічного обслуговування та зменшувати ризик аварій. Важливим чинником підвищення експлуатаційної надійності є впровадження автоматизованих систем контролю тиску й витрати води, застосування частотних перетворювачів для регулювання режимів роботи насосів, використання корозійностійких матеріалів і своєчасна діагностика технічного стану елементів системи [21–23]. Комплексний підхід до аналізу відмов, що поєднує технічний моніторинг, математичне моделювання та організаційні заходи, забезпечує підвищення коефіцієнта готовності систем зрошення та зниження експлуатаційних витрат. Таким чином, систематичне дослідження причин і закономірностей відмов елементів водопостачання є необхідною умовою забезпечення стабільної та економічно ефективної роботи сучасних зрошувальних систем.

Формулювання цілей статті. Метою статті є дослідження характеристики відмов елементів водопостачання для систем зрошення.

Основна частина. Надійність агрегату визначається надійністю всіх його підсистем, причому відмова будь-якої з них призводить до порушення нормального функціонування всього агрегату. Кожна підсистема може перебувати у двох станах – працездатному або непрацездатному, а ймовірність перебування у кожному з них підлягає кількісній оцінці. Водночас неможливо заздалегідь визначити момент відмови конкретної підсистеми, що зумовлює необхідність проведення діагностики та ремонту. З математичної точки зору такі процеси доцільно описувати як марковські, використовуючи відповідні графи станів.

Оскільки потоки подій, що зумовлюють переходи системи між станами, є найпростішими пуассонівськими та характеризуються відповідними інтенсивностями λ_{ij} і $m_{1,0}$, зрошувальне обладнання можна розглядати як систему з обмеженою кількістю дискретних станів. При цьому припускається, що всі переходи між станами s_i в s_j відбуваються під впливом таких потоків подій з певними інтенсивностями λ_{ij} ($i, j = 0, 1, 2, 3$). Зокрема, перехід системи з одного стану до іншого пов'язаний із потоком відмов окремого вузла, тоді як зворотний перехід обумовлюється потоком завершення його ремонту. Вже згадана система має одинадцять можливих станів: $S_0, S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8, S_9, S_{10}$.

Випадковий процес переходів між станами доцільно описувати через визначення ймовірностей цих станів, що змінюються в часі. $P_0(t), P_1(t) \dots P_{10}(t)$.

Або $P_1(t) = P\{S(t) = S_i\}$, где $P_1(t)$ – ймовірність того, що система S у момент часу t перебуває в стані S_i . Схему графа станів зрошувальної системи подано на рис. 1.

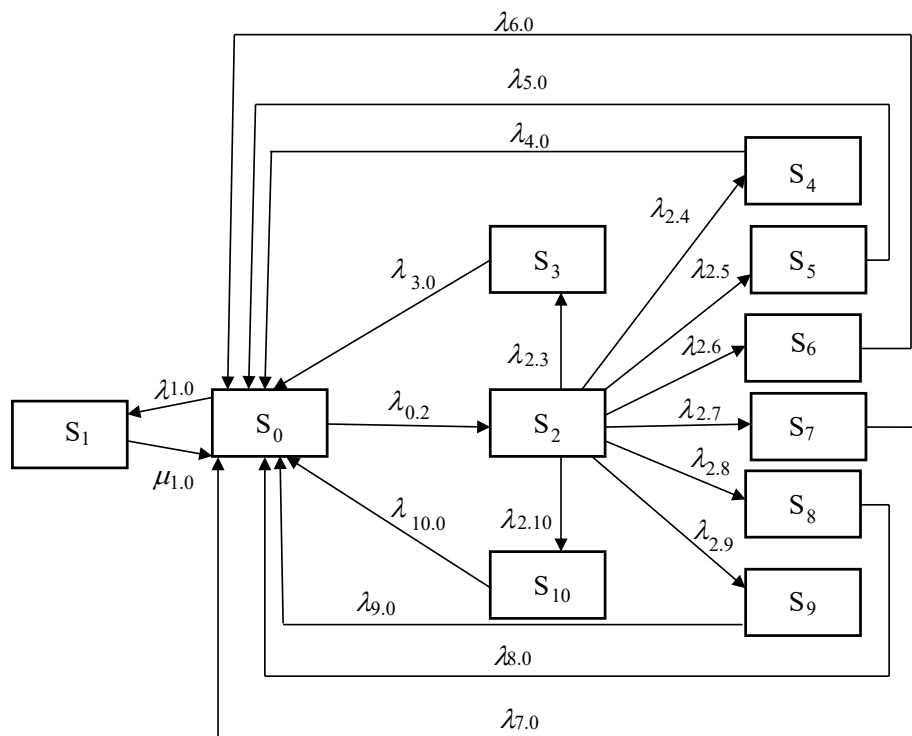


Рис. 1. Граф станів зрошувальної системи

S_0 – зрошувальна система (ЗС) перебуває у справному стані та функціонує; S_1 – ЗС є справною, але тимчасово не працює (простій); S_2 – ЗС перебуває в несправному стані та не функціонує (проводиться діагностування відмови); S_3 – ЗС не працює через відмову головного занурюваного насоса; S_4 – ЗС не функціонує внаслідок відмови поверхневого відцентрового насоса; S_5 – ЗС несправна, через відмову електромагнітного клапану; S_6 – ЗС несправна, через відмову вузла підготовки внесення добрив; S_7 – ЗС несправна, через відмову первинного перетворювача ступеню забруднення води; S_8 – ЗС несправна, через відмову первинного перетворювача вологості ґрунту; S_9 – ЗС несправна, через відмову дренажного відцентрового насосу; S_{10} – ЗС несправна, через відмову допоміжного відцентрового насосу.

Отримаємо систему диференціальних рівнянь Колмогорова для ймовірностей станів: в лівій частині кожного з них стоїть похідна ймовірності i -го стану. У правій частині – сума добутоків ймовірностей всіх станів (з яких йдуть стрілки в даний стан) на інтенсивності відповідних



потоків подій, мінус сумарна інтенсивність всіх потоків, які виводять систему з даного стану, помножена на ймовірність даного (i -го стану).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_0(t)}{dt} = \mu_{1\mu_0}(t) + \lambda_{3.0}P_3(t) + \lambda_{4.0}P_4(t) + \lambda_{5.0}P_5(t) + \lambda_{6.0}P_6(t) + \\ \lambda_{7.0}P_7(t) + \lambda_{8.0}P_8(t) + \lambda_{9.0}P_9(t) + \lambda_{10.0}P_{10}(t) - \lambda_{0.1}P(t) - \lambda_{0.2}P_0(t) \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = \lambda_{01}P_0(t) - \mu_{1.0}P_1(t) \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_{02}P_0(t)(\lambda_{2.3} + \lambda_{2.4} + \lambda_{2.5} + \lambda_{2.6} + \lambda_{2.7} + \lambda_{2.8} + \lambda_{2.9} + \lambda_{2.1}) \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda_{2.3}P_2(t) - \lambda_{3.0}P_3(t) \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = \lambda_{2.4}P_2(t) - \lambda_{4.0}P_4(t) \\ \frac{dP_5(t)}{dt} = \lambda_{2.5}P_2(t) - \lambda_{5.0}P_5(t) \\ \frac{dP_6(t)}{dt} = \lambda_{2.6}P_2(t) - \lambda_{6.0}P_6(t) \\ \frac{dP_7(t)}{dt} = \lambda_{2.7}P_2(t) - \lambda_{7.0}P_7(t) \\ \frac{dP_8(t)}{dt} = \lambda_{2.8}P_2(t) - \lambda_{8.0}P_8(t) \\ \frac{dP_9(t)}{dt} = \lambda_{2.9}P_2(t) - \lambda_{9.0}P_9(t) \\ \frac{dP_{10}(t)}{dt} = \lambda_{2.1}P_2(t) - \lambda_{10.0}P_{10}(t) \end{array} \right. \quad (1)$$

Очевидно, що для будь-якого моменту t сума ймовірностей всіх станів дорівнює одиниці:

$$\sum_{i=0}^{i=10} P_i(t) = 1 \quad (2)$$

Для розв'язання системи рівнянь задаємо початкові умови: у початковий момент часу система перебуває у стані S_0 з імовірністю $P_1(0) = 1$.

Відповідно до умови нормування, імовірності перебування в інших станах дорівнюють:

$$P_1(0) = P_2(0) = P_3(0) = P_4(0) = P_5(0) = P_6(0) = P_7(0) = P_8(0) = P_9(0) = P_{10}(0) = 0.$$

Використовуючи рівняння Колмогорова є можливість знайти ймовірності станів як функції часу.

В даному випадку інтерес представляють ймовірності системи $P_i(t)$ в граничному стаціонарному режимі ($t \rightarrow \infty$):

$$P_i = \lim_{t \rightarrow \infty} P_i(t). \quad (3)$$

Такий підхід характерний для стаціонарного режиму експлуатації, за якого зрештувальна система може переходити між станами, однак імовірності перебування в кожному з них залишаються незмінними. В зв'язку з тим, що гранична ймовірності постійні:

$$\frac{dP_i}{dt} = 0, \quad (4)$$

то замінюючи в рівняннях Колмогорова їх похідні нульовими значеннями, отримаємо систему алгебраїчних рівнянь.



$$\left\{ \begin{array}{l} (\lambda_{01} + \lambda_{02})P_0 = \mu_{10}P_1 + \lambda_{30}P_3 + \lambda_{40}P_4 + \lambda_{50}P_5 + \lambda_{60}P_6 + \\ \lambda_{70}P_7 + \lambda_{80}P_8 + \lambda_{90}P_9 + \lambda_{100}P_{10} \\ \mu_{10}P_1 = \lambda_{01}P_0 \\ (\lambda_{2.3} + \lambda_{2.4} + \lambda_{2.5} + \lambda_{2.6} + \lambda_{2.7} + \lambda_{2.8} + \lambda_{2.9} + \lambda_{2.1})P_2 = \lambda_{02}P_0 \\ \lambda_{30}P_3 = \lambda_{2.3}P_2 \\ \lambda_{40}P_4 = \lambda_{2.4}P_2 \\ \lambda_{50}P_5 = \lambda_{2.5}P_2 \\ \lambda_{60}P_6 = \lambda_{2.6}P_2 \\ \lambda_{70}P_7 = \lambda_{2.7}P_2 \\ \lambda_{80}P_8 = \lambda_{2.8}P_2 \\ \lambda_{90}P_9 = \lambda_{2.9}P_2 \\ \lambda_{100}P_{10} = \lambda_{2.1}P_2 \end{array} \right. \quad (5)$$

Ми сформували систему алгебраїчних рівнянь, що містить одинадцять невідомих. $P_0 \dots P_{10}$.

До цієї системи рівнянь додаємо додаткові умови: $\sum_{i=0}^{i=10} P_i(t) = 1$ (6)

З другого рівняння системи випливає:

$$P_0 = P_2 \left(\frac{\lambda_{2.3} + \lambda_{2.4} + \lambda_{2.5} + \lambda_{2.6} + \lambda_{2.7} + \lambda_{2.8} + \lambda_{2.9} + \lambda_{2.1}}{\lambda_{02}} \right) \quad (7)$$

Дальше

$$P_3 = P_2 \left(\frac{\lambda_{2.3}}{\lambda_{30}} \right) \quad (8)$$

$$P_4 = P_2 \left(\frac{\lambda_{2.4}}{\lambda_{40}} \right) \quad (9)$$

$$P_5 = P_2 \left(\frac{\lambda_{2.5}}{\lambda_{50}} \right) \quad (10)$$

$$P_6 = P_2 \left(\frac{\lambda_{2.6}}{\lambda_{60}} \right) \quad (11)$$

$$P_7 = P_2 \left(\frac{\lambda_{2.7}}{\lambda_{70}} \right) \quad (12)$$

$$P_8 = P_2 \left(\frac{\lambda_{2.8}}{\lambda_{80}} \right) \quad (13)$$

$$P_9 = P_2 \left(\frac{\lambda_{2.9}}{\lambda_{90}} \right) \quad (14)$$

$$P_{10} = P_2 \left(\frac{\lambda_{2.1}}{\lambda_{100}} \right) \quad (15)$$

Вирішуємо систему, підставляючи в нормувальну умову всі ймовірності, які виражені через P_2 :



$$\begin{aligned}
& P_2 \frac{(\lambda_{2.3} + \lambda_{2.4} + \lambda_{2.5} + \lambda_{2.6} + \lambda_{2.7} + \lambda_{2.8} + \lambda_{2.9} + \lambda_{2.1})}{\lambda_{02}} + \frac{\lambda_{01}}{\mu_{10}}. \\
& P_2 \frac{(\lambda_{2.3} + \lambda_{2.4} + \lambda_{2.5} + \lambda_{2.6} + \lambda_{2.7} + \lambda_{2.8} + \lambda_{2.9} + \lambda_{2.1})}{\lambda_{02}} + P_2 + P_2 \left(\frac{\lambda_{2.3}}{\lambda_{30}} \right) + \\
& + P_2 \left(\frac{\lambda_{2.4}}{\lambda_{40}} \right) + P_2 \left(\frac{\lambda_{2.5}}{\lambda_{50}} \right) + P_2 \left(\frac{\lambda_{2.6}}{\lambda_{60}} \right) + P_2 \left(\frac{\lambda_{2.7}}{\lambda_{70}} \right) + P_2 \left(\frac{\lambda_{2.8}}{\lambda_{80}} \right) + \\
& + P_2 \left(\frac{\lambda_{2.9}}{\lambda_{90}} \right) + P_2 \left(\frac{\lambda_{2.1}}{\lambda_{100}} \right) = 1. \tag{16}
\end{aligned}$$

Звідси:

$$\begin{aligned}
& P_2 \frac{(\lambda_{2.3} + \lambda_{2.4} + \lambda_{2.5} + \lambda_{2.6} + \lambda_{2.7} + \lambda_{2.8} + \lambda_{2.9} + \lambda_{2.1})}{\lambda_{02}} \cdot \left(1 + \frac{\lambda_{01}}{\mu_{10}} \right) + P_2 + \\
& + P_2 \left(\frac{\lambda_{2.4}}{\lambda_{40}} \right) + P_2 \left(\frac{\lambda_{2.5}}{\lambda_{50}} \right) + P_2 \left(\frac{\lambda_{2.6}}{\lambda_{60}} \right) + P_2 \left(\frac{\lambda_{2.7}}{\lambda_{70}} \right) + P_2 \left(\frac{\lambda_{2.8}}{\lambda_{80}} \right) + P_2 \left(\frac{\lambda_{2.9}}{\lambda_{90}} \right) + P_2 \left(\frac{\lambda_{2.1}}{\lambda_{100}} \right) = 1. \tag{17}
\end{aligned}$$

Після перетворення, маємо:

$$P_2 \left[\frac{\lambda_{2.3} + \dots + \lambda_{2.9} + \lambda_{2.1}}{\lambda_{02}} \left(1 + \frac{\lambda_{01}}{\mu_{10}} \right) + 1 + \left(\frac{\lambda_{2.3}}{\lambda_{30}} + \dots + \frac{\lambda_{2.9}}{\lambda_{90}} + \frac{\lambda_{2.1}}{\lambda_{100}} \right) \right] = 1 \tag{18}$$

Звідси, P_2 дорівнює:

$$P_2 = \frac{1}{\left[\left[\frac{\lambda_{2.3} + \dots + \lambda_{2.9} + \lambda_{2.1}}{\lambda_{02}} \left(1 + \frac{\lambda_{01}}{\mu_{10}} \right) + 1 + \left(\frac{\lambda_{2.3}}{\lambda_{30}} + \dots + \frac{\lambda_{2.9}}{\lambda_{90}} + \frac{\lambda_{2.1}}{\lambda_{100}} \right) \right] \right]} \tag{19}$$

$$P_2 = \left[\frac{\lambda_{2.3} + \dots + \lambda_{2.9} + \lambda_{2.1}}{\lambda_{02}} \left(1 + \frac{\lambda_{01}}{\mu_{10}} \right) + 1 + \left(\frac{\lambda_{2.3}}{\lambda_{30}} + \dots + \frac{\lambda_{2.9}}{\lambda_{90}} + \frac{\lambda_{2.1}}{\lambda_{100}} \right) \right]^{-1} \tag{20}$$

Маючи P_2 знаходимо $P_0, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8, P_9, P_{10}$.

Ймовірність P_1 визначаємо з умови нормування як різницю:

$$P_1 = 1 - (P_0 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8 + P_9 + P_{10}). \tag{21}$$

Отримані ймовірності станів покладені в основу визначення комплексних показників надійності зрощувальної системи. Тому коефіцієнт готовності K_G , є сумою ймовірностей працездатних станів, при справній і працюючій зрощувальній системі, а також при справній, але не працюючій зрощувальній системі (простою), з будь-яких причин не технічного характеру:

$$K_G = P_0 + P_1 \tag{22}$$

Підставляючи значення ймовірностей у формулу, отримуємо:

$$K_G = P_0 + [1 - (P_0 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8 + P_9 + P_{10})]. \tag{23}$$

Після перетворення виразу маємо:

$$K_G = 1 - P_2 - P_3 - P_4 - P_5 - P_6 - P_7 - P_8 - P_9 - P_{10}. \tag{24}$$



Виразивши ймовірності через P_2 , отримуємо:

$$K_{\Gamma} = 1 - P_2 \left(1 - \frac{\lambda_{2,3}}{\lambda_{30}} + \frac{\lambda_{2,4}}{\lambda_{40}} + \frac{\lambda_{2,5}}{\lambda_{50}} + \frac{\lambda_{2,6}}{\lambda_{60}} + \frac{\lambda_{2,7}}{\lambda_{70}} + \frac{\lambda_{2,8}}{\lambda_{80}} + \frac{\lambda_{2,9}}{\lambda_{90}} + \frac{\lambda_{2,1}}{\lambda_{100}} \right). \quad (25)$$

Підставивши у рівняння значення P_2 , які виражені через інтенсивності, отримуємо кінцеву формулу:

$$K_{\Gamma} = \frac{\lambda_{2,3} + \lambda_{2,4} + \lambda_{2,5} + \lambda_{2,6} + \lambda_{2,7} + \lambda_{2,8} + \lambda_{2,9} + \lambda_{2,1}}{\lambda_{2,3} + \dots + \lambda_{2,9} + \lambda_{2,1} + \frac{\lambda_{02}}{\left(1 + \frac{\lambda_{01}}{\mu_{10}}\right)} \left(1 + \frac{\lambda_{2,3}}{\lambda_{30}} + \dots + \frac{\lambda_{2,9}}{\lambda_{90}} + \frac{\lambda_{2,1}}{\lambda_{100}}\right)}. \quad (26)$$

При розгляді надійності зрошувальних систем слід також звернути увагу на ще один комплексний показник – коефіцієнт технічного використання $K_{\text{т.в.}}$.

$$K_{\text{т.в.}} = K_{\Gamma} - (P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8 + P_9 + P_{10}). \quad (27)$$

Підставляючи у рівняння значення коефіцієнта готовності, отримуємо:

$$K_{\text{т.в.}} = 1 - 2(P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8 + P_9 + P_{10}). \quad (28)$$

Звідси:

$$K_{\text{т.в.}} = 1 - 2 P_2 \cdot \left(\frac{\lambda_{2,3}}{\lambda_{30}} + \frac{\lambda_{2,4}}{\lambda_{40}} + \frac{\lambda_{2,5}}{\lambda_{50}} + \frac{\lambda_{2,6}}{\lambda_{60}} + \frac{\lambda_{2,7}}{\lambda_{70}} + \frac{\lambda_{2,8}}{\lambda_{80}} + \frac{\lambda_{2,9}}{\lambda_{90}} + \frac{\lambda_{2,1}}{\lambda_{100}} \right). \quad (29)$$

Підставляючи ймовірність P_2 , виражену через інтенсивності, отримуємо:

$$K_{\text{т.в.}} = 1 - \frac{2 \cdot \left(1 + \frac{\lambda_{2,3}}{\lambda_{30}} + \frac{\lambda_{2,4}}{\lambda_{40}} + \frac{\lambda_{2,5}}{\lambda_{50}} + \frac{\lambda_{2,6}}{\lambda_{60}} + \frac{\lambda_{2,7}}{\lambda_{70}} + \frac{\lambda_{2,8}}{\lambda_{80}} + \frac{\lambda_{2,9}}{\lambda_{90}} + \frac{\lambda_{2,1}}{\lambda_{100}} \right)}{\frac{\lambda_{2,3} + \dots + \lambda_{2,9} + \lambda_{2,1}}{\lambda_{02}} \cdot \left(1 + \frac{\lambda_{01}}{\mu_{10}} \right) + 1 + \left(\frac{\lambda_{2,3}}{\lambda_{30}} + \dots + \frac{\lambda_{2,9}}{\lambda_{90}} + \frac{\lambda_{2,1}}{\lambda_{100}} \right)}. \quad (30)$$

Для розрахунку інтенсивностей переходів λ_i і μ_{10} досліджуваної зрошувальної системи між станами застосовуємо таке співвідношення:

$$\lambda_i = (T_i)^{-1}; \quad (31)$$

$$\mu_{10} = T_{10}^{-1}. \quad (32)$$

де T_i – середня тривалість виконання i -ї операції.

Далі розраховуємо ймовірності переходів зрошувальної системи з одного стану в інший, без модернізації, тобто існуючої за формулою (16):

$$P_2 = \left[\left(\frac{0,025 + 0,02 + 0,05 + 0,0125 + 0,0143 + 0,063 + 0,05 + 0,018}{0,01} \right) \left(1 + \frac{0,19}{1} \right) + 1 + \frac{0,025}{0,0185} + \frac{0,02}{0,0084} + \frac{0,05}{0,067} + \frac{0,0125}{0,0042} + \frac{0,0143}{0,0084} + \frac{0,063}{0,2} + \frac{0,05}{0,034} + \frac{0,018}{0,0084} \right]^{-1} = 0,022.$$

Звідси, відповідно до формул (18 ... 25) обчислюємо ймовірності:

$$P_3 = 0,044; P_4 = 0,052; P_5 = 0,0165; P_6 = 0,066; P_7 = 0,0374; P_8 = 0,00693; P_9 = 0,032; P_{10} = 0,047.$$

По формулі (17) находимо P_0 , $P_0 = 0,022 \cdot 25,3 = 0,56$.



P_1 згідно формули (31) дорівнює $P_1 = 1 - 0,9 = 0,1$.

Звідси коефіцієнт готовності для існуючої зрошувальної системи, обчислюємо за формулою (32):

$$T_r = 0,056 + 0,1 = 0,66.$$

Розраховуємо ймовірності переходів модернізованої зрошувальної системи з одного стану в інший, за формулою (26):

$$P_2 = \left[\left(\frac{0,033 + 0,025 + 0,067 + 0,0153 + 0,02 + 0,1 + 0,056 + 0,025}{0,011} \right) \left(1 + \frac{0,19}{1} \right) + 1 + \frac{0,033}{0,0125} + \frac{0,025}{0,0084} + \frac{0,067}{0,067} + \frac{0,0153}{0,0042} + \frac{0,02}{0,0084} + \frac{0,01}{0,2} + \frac{0,056}{0,034} + \frac{0,025}{0,0084} \right]^{-1} = 0,017.$$

Для визначення значення часу на технологічне обслуговування та ремонт окремих вузлів зрошувальної системи і визначення коефіцієнта готовності, були використані результати експлуатаційних досліджень, а також експертні оцінки фахівців з ремонту та обслуговування системи зрошення (табл. 1 і 2).

Таблиця 1

Середні показники тривалості виконання технологічних операцій з діагностики зрошувальної системи

Найменування операцій	Характер використання системи зрошення			
	Існуючої		Модернізованої	
	Середній час виконання операції T_i	Інтенсивність переходу з одного стану в інший λ_{ij}	Середній час виконання операції T_i	Інтенсивність переходу з одного стану в інший λ_{ij}
1. Діагностування несправності і підготовка до ремонту головного занурювального насосу	$T_{2,3} = 40$	0,025	$T_{2,3} = 30$	0,033
2. Діагностування несправності і підготовка до ремонту поверхневого відцентрового насосу	$T_{2,4} = 50$	0,02	$T_{2,4} = 40$	0,025
3. Діагностування несправності і підготовка до ремонту фільтра електромагнітного клапану	$T_{2,5} = 20$	0,05	$T_{2,5} = 15$	0,067
4. Діагностування несправності і підготовка до ремонту вузла підготовки внесення добрив	$T_{2,6} = 80$	0,0125	$T_{2,6} = 65$	0,0153
5. Діагностування несправності і підготовка до ремонту первинного перетворювача ступеню забруднення води	$T_{2,7} = 70$	0,0143	$T_{2,7} = 50$	0,02
6. Діагностування несправності і підготовка до ремонту дренажного відцентрового насосу	$T_{2,8} = 16$	0,063	$T_{2,8} = 10$	0,1
7. Діагностування несправності і підготовка до ремонту допоміжного відцентрового насосу	$T_{2,9} = 20$	0,05	$T_{2,9} = 18$	0,056
8. Діагностування несправності і підготовка до ремонту краплинних ліній	$T_{2,1} = 55$	0,018	$T_{2,1} = 40$	0,025

Таблиця 2

Середні показники тривалості виконання технологічних операцій з ремонту зрошувальної системи

Найменування операцій	Характер використання системи зрошення			
	Існуючої		Модернізованої	
	Середній час виконання операції T_i	Інтенсивність переходу з одного стану в інший λ_{ij}	Середній час виконання операції T_i	Інтенсивність переходу з одного стану в інший λ_{ij}
1. Ремонт головного занурювального насосу	$T_{30} = 80$	0,0125	$T_{30} = 80$	0,0125
2. Ремонт поверхневого відцентрового насосу	$T_{40} = 120$	0,0084	$T_{40} = 120$	0,0084
3. Ремонт електро-магнітного клапану	$T_{50} = 15$	0,067	$T_{50} = 15$	0,067
4. Ремонт первинного перетворювача ступеню забруднення води	$T_{60} = 240$	0.0042	$T_{60} = 240$	0.0042
5. Ремонт вузла підготовки внесення добрив	$T_{70} = 120$	0,0084	$T_{70} = 120$	0,0084
6. Ремонт допоміж-ного відцентрового насосу	$T_{80} = 5$	0,2	$T_{80} = 5$	0,2
7. Ремонт клапана	$T_{90} = 30$	0,034	$T_{90} = 30$	0,034
8. Ремонт краплинних ліній	$T_{100} = 120$	0,0084	$T_{100} = 120$	0,0084
9. Підготовка до діагностики ремонтних робіт	$T_{02} = 100$	0,01	$T_{02} = 90$	0,011

Звідси, відповідно до формул (8...15) обчислюємо ймовірності:

$$P_3 = 0,045; P_4 = 0,05; P_5 = 0,017; P_6 = 0,062; P_7 = 0,04;$$

$$P_8 = 0,0025; P_9 = 0,028; P_{10} = 0,05.$$

По формулі (7) находимо P_0 , $P_0 = 0,017 \cdot 34,13 = 0,525$.

P_3 згідно формули (21) дорівнює $P_3 = 1 - 0,825 = 0,175$.

Звідси коефіцієнт готовності для модернізованої системи зрошення обчислюємо згідно з формулою (22):

$$T_r = 0,53 + 0,175 = 0,71.$$

Висновки:

1. Найбільш уразливими елементами систем водопостачання є насосні станції та краплинні лінії.

2. Ключовими факторами виникнення відмов є якість води, порушення гідравлічних режимів та недостатнє технічне обслуговування.

3. Використання методів теорії надійності дозволяє прогнозувати ресурс обладнання та знижувати ризик аварій.

4. Системний підхід до управління технічним станом забезпечує підвищення ефективності та довговічності зрошувальних систем.

5. Коефіцієнт готовності для існуючої системи зрошення становив 0,66, а для модернізованої 0,71.

Список використаних джерел

2. Журавель Д.П. та ін. Гідравліка, гідро- та пневмоприводи : підручник для здобувачів вищої освіти. Київ : ЦП «Компринт», 2021. 448 с., іл.
- Дідур В.А. Технічна механіка рідини і газу : підручник. Мелітополь : ТОВ «Колор Принт», 2019. 468 с.
- Дідур В.А. Гідравліка : підручник. Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2015. 624 с.



4. Дідур В.А. Гідравліка та її використання в агропромисловому комплексі : підручник. 2008. 577 с.
5. Бондар А.М.. Використання біологічної оливи для сільськогосподарської техніки. *Механізація та електрифікація сільського господарства* : загальнодержавний збірник / ННЦ «ІМЕСГ». Глеваха, 2019. Вип. № 10 (109). С. 125–131.
6. Galina Gritsaenko, Igor Gritsaenko, Andrei Bondar. Mechanism for the Maintenance of Investment in Agriculture / Modern Development Paths of Agricultural Production. *Springer Nature Switzerland AG.*, 2019. P. 29–40.
7. Kyrylo Samoichuk, Olga Viunyk, Dmytro Milko, Andrii Bondar Research on milk homogenization in the stream homogenizer with separate cream feeding. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 2020. Vol. 14. P. 142–148.
8. Dmitry Milko, Kyrylo Samoichuk, Yulia Postol Revealing new patterns in resourcesaving processing of chromium-containing ore raw materials by solidphase reduction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020. Vol. 1/12(103). P. 24–29.
9. Dmytro Milko, Oleksandr Sclyar, Radmila Sclyar, Ganna Pedchenko. Results of the nutritional preservation research of the alfalfa laying on storage with two-phase compaction. *INMATEH – Agricultural Engineering. National Institute Of Research-Development For Machines And Installations Designed To Agriculture And Food Industry – INMA Bucharest*, Vol. 60, no. 1 / 2020. P. 269–274.
10. Kyrylo Samoichuk, Nadiya Palyanichka, Vadim Oleksiienko, Serhii Petrychenko. Improving the quality of milk dispersion in a counter-jet homogenizer. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 2020. Vol. 14. P. 633–640.
11. Бондар А.М. Покращення та оцінка якісних показників відпрацьованих автотракторних олив для сільськогосподарської техніки. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*: електронне наукове фахове видання / ТДАТУ. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. Вип. 11, том 1. 15 с. DOI: 10.31388/2220-8674-2021-1-6.
12. Бондар А.М. Прогнозування ресурсу трибосистем при використанні сумішевих олив. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*: електронне наукове фахове видання / ТДАТУ. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. Вип. 11, том 1. 19 с. DOI: 10.31388/2220-8674-2021-1-10.
13. Бондар А.М., Дашивець Г.І., Паніна В.В. Обґрунтування швидкісних параметрів роботи машино-тракторного агрегату. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*: електронне наукове фахове видання / ТДАТУ. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. Вип. 11, том 2. С. 85–97. 13 с. DOI: 10.31388/2220-8674-2021-2-16.
14. Dmytro Zhuravel. Research of lubricant properties of used tractor motor oils. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*: електронне наукове фахове видання / ТДАТУ. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. Вип. 11, том 2. 18 с. DOI: 10.31388/2220-8674-2021-2-5.
15. Kuznetsov, M., Lysenko, O., Chebanov, A. (2021). Ensuring power balance in a hybrid power system with a backup generator. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (8 (114)), 6–15. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.245557>.
16. Бондар А.М., Дашивець Г.І., Паніна В.В. Методика обробки емпіричних даних якісних показників роботи колісної машини. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*: електронне наукове фахове видання / ТДАТУ ; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. Мелітополь : ТДАТУ, 2022. Вип. 12, том 2. 13 с. DOI: 10.31388/2220-8674-2022-2-2.
17. Samoichuk, K.; Petrychenko, S.; Bondar, A.; Hutsol, T.; Kubo' n, M.; Niemiec, M.; Mykhailova, L.; Gródek-Szostak, Z.; Sorokin, D. Modeling of Diesel Engine Fuel Systems Reliability When Operating on Biofuels. *Energies*, 2022, 15, 1795. <https://doi.org/10.3390/en15051795>.
18. Karpań, M.; Klimek, K.; Maj, G.; Bondar, A.; Lemeshchenko-Lagoda, V.; Boltianskyi, B.; Boltianska, L.; Syrotyuk, H.; Syrotyuk, S.; et al. Method of Evaluation of Materials Wear of Cylinder-Piston Group of Diesel Engines in the Biodiesel Fuel Environment. *Energies*, 2022, 15, 3416. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15093416>.
19. Журавель Д.П. Вплив технічного обслуговування і ремонту на надійність машин та обладнання при використанні біологічних рідин. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного*. Вип. 10. Том 1. Мелітополь, 2020. 9 с. DOI: 10.31388/2220-8674-2020-1-3.
20. Журавель Д.П. Рациональне використання біологічних олив для мобільних енергетичних засобів. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного*. Вип. 10. Том 1. Мелітополь, 2020. 17 с. DOI: 10.31388 / 2220-8674-2020-1-9.



21. Poliakov, A., Volokh, V., Andreev, A., та ін. Identifying patterns in the structural-phase transformations when processing oxide doped waste with the use of carbon reducer. (2024). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(12 (131), 25–30.

22. Rebenko, V., Lukianenko, I., Volokh, V., та ін. Establishing patterns of structural-phase transformations when processing technogenic waste of high-speed steels by carbon thermal reduction. (2025). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 12 (136), 6–11.

Дата першого надходження статті до видання: 20.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 14.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 25.05.2026

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



D. Zhuravel¹, S. Pastushenko², M. Artomov³, M. Volynkin⁴

¹*Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University*

²*Separate subdivision of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
“Brzezany Agrotechnical Institute”*

³*State University of Biotechnology*

⁴*Higher Educational Institution “Podillia State University”*

FAILURE CHARACTERISTICS OF WATER SUPPLY ELEMENTS FOR DRIP IRRIGATION SYSTEMS

Summary

The article conducts a systematic analysis of studies of failures of water supply elements of irrigation systems. The main types of failures of pumping stations, pipelines, filtration units, drip lines and automation systems are considered. The causes of failures, their impact on the efficiency of irrigation systems and methods for assessing reliability are analyzed. Key factors that determine the intensity of failures are identified, in particular water quality, hydraulic modes and the level of maintenance. Directions for increasing the operational reliability of water supply systems are proposed. The stability of irrigation systems directly depends on the trouble-free operation of water supply elements – water intake structures, pumping stations, pressure and distribution pipelines, filtration equipment, shut-off and control valves and automation equipment. Failure of at least one of these components leads to a decrease in pressure and water consumption, uneven irrigation, excess electricity consumption, emergency downtime and, as a result, to a decrease in crop yields and economic losses. At the same time, a significant part of existing irrigation systems is characterized by a high degree of physical and moral wear and tear, which increases the likelihood of failures and complicates the provision of stable hydraulic modes. Hidden defects in pipelines, corrosion processes, cavitation phenomena in pumping equipment, water hammer, as well as clogging of filtration elements due to low water quality are of particular danger. Insufficient level of automation and technical diagnostics leads to untimely detection of malfunctions and transition of local defects into large-scale accidents. Despite the existence of separate studies in the field of reliability theory and operation of hydraulic systems, the issues of comprehensive assessment of the reliability of irrigation water supply systems remain insufficiently developed, in particular in terms of taking into account real operating conditions, variable loads and the impact of water quality on the durability of equipment. There is a need to improve methods of predicting failures, determining the intensity of their occurrence, assessing indicators of failure-freeness, durability and maintainability, as well as developing scientifically based recommendations for increasing the availability coefficient of systems.

Keywords: failure rate, pumping stations, pipelines, drip irrigation, water supply, reliability, hydraulic modes, maintenance.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-2-12>

УДК 631.22:697.94:536.2:631.4

О. С. Ковязін¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-3027-872X

А. О. Парієв², канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-7193-1409

О. О. Дереза¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-2652-9853

С. В. Дереза¹

ORCID: 0000-0001-9797-0967

¹Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного²Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РОЗРАХУНКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ІНТЕГРАЛЬНИХ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ҐРУНТОВОГО МАСИВУ ДЛЯ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ҐРУНТОВО-ПОВІТРЯНОГО ТЕПЛООБМІННИКА

Анотація. У статті наведено результати експериментально-розрахункового визначення фізичних і теплофізичних характеристик ґрунту, які використовуються як вхідні параметри для чисельного моделювання роботи ґрунтово-повітряного теплообмінника системи геотермальної вентиляції. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю врахування фактичної неоднорідності ґрунтового профілю, оскільки літологічний склад, об'ємна густина, вологість і теплоакумулявальна здатність ґрунту істотно впливають на інтенсивність теплообміну між підземним повітропроводом і навколишнім ґрунтовим середовищем. Польові дослідження виконували на дослідному полігоні, де було змонтовано зразок системи геотермальної вентиляції. Під час ручного буріння свердловини здійснювали пошаровий відбір проб, визначали літологічний тип матеріалу, масу вилученої бурової порції, об'ємну густину та масову вологість. Межі окремих шарів встановлювали за результатами візуально-тактильного опису з урахуванням кольору, зернистості, пластичності, зв'язності, вологості та наявності включень. Отримані дані було узагальнено у вигляді стратиграфічної схеми з профілями зміни об'ємної густини та вологості за глибиною. Встановлено, що досліджуване середовище має неоднорідну літологічну будову та представлене послідовністю чорноземного шару, суглинків, супіску й глини різної консистенції. Показано, що об'ємна густина загалом зростає з глибиною, тоді як розподіл вологості має немонотонний характер. Для потреб розрахункового експерименту неоднорідний профіль було подано як еквівалентне однорідне середовище з середньозваженими параметрами. На основі експериментально встановлених значень об'ємної густини, вологості та літологічного складу, а також довідкових даних для відповідних типів матеріалу, визначено еквівалентні значення коефіцієнта теплопровідності та питомої теплоємності ґрунту, які становлять відповідно 0,926 Вт/(м·К) і 920 Дж/(кг·К). Отримані результати можуть бути використані як вхідні дані для подальшого чисельного моделювання нестационарного теплообміну між повітряним потоком у підземному каналі та ґрунтовим масивом, що дає змогу уточнити прогноз температурного режиму ґрунтово-повітряного теплообмінника системи геотермальної вентиляції.

Ключові слова: геотермальна вентиляція, стратифікація, літологічна неоднорідність, об'ємна густина, вологість, теплопровідність, питома теплоємність.

Постановка проблеми. Енергоефективне формування мікроклімату у тваринницьких приміщеннях є одним із важливих напрямів підвищення сталості аграрного виробництва, оскільки значна частина експлуатаційних витрат пов'язана з вентиляцією, опаленням та охолодженням повітря [1]. Водночас температурний режим приміщення безпосередньо впливає на адапційні реакції та продуктивність сільськогосподарських тварин [2]. В умовах зростання вартості енергоресурсів, необхідності зменшення питомого енергоспоживання та посилення вимог до екологічної безпечності інженерних систем особливої актуальності набувають технології, що використовують природний тепловий потенціал ґрунту [3].



Одним із перспективних технічних рішень є геотермальна вентиляція на основі ґрунтово-повітряного теплообмінника, у якій припливне повітря попередньо нагрівається або охолоджується під час проходження через підземний канал [4]. Ефективність такої системи значною мірою визначається не лише конструктивними параметрами теплообмінника, довжиною повітропроводу, глибиною його закладання та швидкістю руху повітря [5], а й теплофізичними властивостями ґрунтового масиву. До таких властивостей належать об'ємна густина, вологість, коефіцієнт теплопровідності та питома теплоємність ґрунту [6].

Разом із тим ґрунтовий масив у реальних умовах не є однорідним середовищем. Його будова формується послідовністю літологічних шарів, які можуть істотно відрізнятися за гранулометричним складом, щільністю, вологістю, водоутримувальною здатністю та теплофізичними характеристиками [7]. Це зумовлює просторову неоднорідність теплоперенесення в зоні розміщення ґрунтово-повітряного теплообмінника і може впливати на точність прогнозування температурного режиму системи геотермальної вентиляції [8].

У практиці чисельного моделювання ґрунтовий масив часто розглядають як еквівалентне однорідне середовище з усередненими теплофізичними параметрами [9]. Такий підхід спрощує побудову математичної моделі та зменшує обчислювальну складність розрахунків, однак потребує належного експериментального обґрунтування. Використання лише довідкових значень теплофізичних характеристик без урахування фактичної стратифікації, вологості та об'ємної густини ґрунту може призводити до зниження достовірності результатів чисельного експерименту [10].

Особливо важливим це є для дослідних або проєктованих систем геотермальної вентиляції, ефективність яких оцінюється на основі розрахункових моделей [11]. У таких випадках необхідно мати не лише узагальнені довідкові характеристики ґрунту, а й експериментально встановлену будову ґрунтового профілю в місці розміщення теплообмінника [8]. Це дає змогу коректніше визначити інтегральні параметри ґрунтового масиву, які надалі можуть бути використані як вхідні дані для чисельного моделювання процесів теплообміну [7].

Отже, актуальною науково-прикладною задачею є експериментальне визначення стратифікації ґрунтового профілю, оцінювання зміни об'ємної густини та вологості ґрунту за глибиною, а також обґрунтування еквівалентних інтегральних теплофізичних характеристик ґрунтового масиву для чисельного моделювання роботи системи геотермальної вентиляції. Розв'язання цієї задачі дає змогу підвищити достовірність розрахунків, уточнити вихідні параметри моделі та створити більш обґрунтовану основу для оцінювання ефективності геотермальної вентиляції у тваринницьких приміщеннях.

Аналіз останніх досліджень. Дослідження ґрунтово-повітряних теплообмінників у сучасній науковій літературі розвиваються переважно у трьох напрямках: експериментальне оцінювання їх теплової ефективності, чисельне моделювання процесів теплообміну та оптимізація конструктивно-режимних параметрів системи [9, 12]. У більшості робіт ґрунтово-повітряний теплообмінник розглядається як пасивний або малозатратний елемент попереднього нагрівання й охолодження припливного повітря, ефективність якого залежить від взаємодії повітряного потоку з ґрунтовым масивом через стінку підземного каналу [12, 13].

У працях, присвячених експериментальному аналізу таких систем, основну увагу приділено визначенню температури повітря на вході та виході з теплообмінника, оцінюванню величини теплового ефекту, а також впливу сезонних умов на роботу системи [14, 15]. Показано, що ґрунтово-повітряні теплообмінники можуть забезпечувати зниження температури припливного повітря в теплий період і його попереднє підігрівання в холодний період року [14, 16]. Водночас отримані результати істотно залежать від кліматичних умов, глибини закладання повітропроводу, довжини каналу, швидкості руху повітря та тривалості роботи системи [15, 16].



Значна кількість досліджень спрямована на параметричний аналіз конструкції теплообмінника [5, 17, 18]. Зокрема, розглядається вплив діаметра й довжини повітропроводу, глибини його розміщення, матеріалу стінки, витрати повітря та режиму експлуатації на інтенсивність теплообміну [5, 17]. Такі роботи дають змогу встановити загальні закономірності функціонування ґрунтово-повітряних теплообмінників і сформулювати рекомендації щодо вибору їх геометричних та режимних параметрів [17, 18].

Окремий напрям становлять чисельні дослідження, у яких процес теплообміну між повітрям, стінкою каналу та ґрунтом описується за допомогою математичних моделей нестационарного теплоперенесення [19, 20]. У таких моделях ґрунтовий масив здебільшого задається як суцільне середовище з певними теплофізичними характеристиками: коефіцієнтом теплопровідності, питомою теплоємністю, густиною та початковим температурним полем. Саме від коректності цих параметрів залежить точність прогнозування температури повітря після проходження через підземний теплообмінник [20, 21].

Водночас у багатьох чисельних моделях теплофізичні властивості ґрунту приймаються за довідковими або узагальненими значеннями [22, 23]. Такий підхід спрощує розрахункову схему, однак не завжди враховує реальну неоднорідність ґрунтового профілю. У природних умовах ґрунтовий масив складається з послідовності шарів різного літологічного складу, які відрізняються між собою об'ємною густиною, вологістю, гранулометричним складом і здатністю акумулювати теплоту [24]. Через це використання єдиного набору довідкових параметрів може призводити до спрощеного опису процесів теплообміну в зоні розміщення підземного каналу [23, 24].

Вплив властивостей ґрунту на роботу ґрунтово-повітряних теплообмінників підтверджено в роботах, де аналізувалися тип ґрунту, рівень його ущільнення, вологість і теплофізичні характеристики. Зокрема, встановлено, що підвищення вологості та зміна ступеня ущільнення ґрунту можуть помітно впливати на теплопровідність і, відповідно, на інтенсивність теплообміну між ґрунтом і повітряним потоком [25, 26]. Це свідчить про необхідність уточнення фізичних параметрів ґрунту не лише за довідковими джерелами, а й за результатами польових або лабораторних вимірювань [27].

Незважаючи на значну кількість праць, присвячених моделюванню й оптимізації ґрунтово-повітряних теплообмінників, питання попереднього експериментального опису ґрунтового профілю в місці розміщення системи висвітлено недостатньо повно. Зазвичай дослідники детально аналізують геометрію теплообмінника, температурний режим і витрату повітря [28], тоді як стратифікація ґрунту, зміна об'ємної густини та вологості за глибиною, а також перехід від неоднорідного профілю до еквівалентних інтегральних параметрів для чисельної моделі залишаються менш розробленими [29].

Отже, аналіз останніх досліджень показує, що наукові основи функціонування ґрунтово-повітряних теплообмінників достатньо широко розглянуті в літературі, однак потребує подальшого уточнення методичний підхід до визначення вхідних теплофізичних параметрів ґрунтового масиву для чисельного моделювання. Особливо важливим є поєднання польового опису стратифікації ґрунту, експериментального визначення його об'ємної густини та вологості з подальшим розрахунком еквівалентних інтегральних характеристик, які можуть бути використані в моделі геотермальної вентиляції.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою роботи є підвищення достовірності чисельного моделювання роботи ґрунтово-повітряного теплообмінника геотермальної вентиляції шляхом експериментального визначення стратифікації ґрунтового профілю та розрахункового обґрунтування еквівалентних інтегральних теплофізичних характеристик ґрунтового масиву.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- встановити літологічну будову ґрунтового профілю за результатами пошарового буріння свердловини;
- визначити зміну об'ємної густини та вологості ґрунту за глибиною свердловини;
- розрахувати еквівалентні інтегральні теплофізичні характеристики ґрунтового масиву для подальшого використання в чисельному експерименті.

Основна частина. Для розв'язання поставлених завдань дослідження було спрямоване на поетапне встановлення реальної будови ґрунтового масиву та визначення його фізичних характеристик, необхідних для подальшого чисельного моделювання роботи ґрунтово-повітряного теплообмінника геотермальної вентиляції. Вихідним етапом було польове дослідження ґрунтового профілю в зоні розміщення дослідного зразка системи геотермальної вентиляції з подальшим відбором проб ґрунту, визначенням їх об'ємної густини й вологості та розрахунковим узагальненням отриманих даних у вигляді еквівалентних інтегральних теплофізичних параметрів ґрунтового масиву.

Буріння та відбір проб ґрунту виконували на о. Хортиця (м. Запоріжжя), на випробувальному полігоні відділу біоекотехнічних систем в тваринництві ННЦ «ІМЕСГ», де було змонтовано дослідний зразок геотермальної вентиляції. Для виконання польових робіт використовували ручний бур зі змінними штангами та допоміжне підйомне обладнання, що забезпечувало пошарове заглиблення інструмента, вилучення бурових порцій ґрунту та подальший відбір проб для лабораторного аналізу. Загальний вигляд обладнання та ділянки ручного буріння свердловини наведено на рис. 1.



а

б

**Рис. 1. Обладнання та ділянка ручного буріння свердловини:
а – робоча частина ручного бура; *б* – загальний вигляд ділянки буріння**



Ґрунтовий профіль по глибині свердловини досліджували під час ручного буріння буром діаметром 280 мм. За один робочий прохід бур, залежно від літологічного типу та консистенції ґрунту, забезпечував заглиблення на 0,07–0,15 м. Найменша глибина проходу за один цикл спостерігалася у шарах тугопластичної та твердої глини. У процесі буріння фактичний діаметр свердловини виявився більшим за діаметр бура і становив у середньому 0,30 м. Саме це значення використовували для розрахунку об'єму вилученого ґрунту.

Після кожного проходу бур виймали зі свердловини, а отриману бурову порцію ґрунту використовували для визначення літологічного типу ґрунту, оцінювання об'ємної густини та визначення вологості. Інтервал заглиблення за окремий прохід бура Δz_i визначали як різницю між двома послідовними відліками від постійної реперної точки на гирлі свердловини до дна вибою, використовуючи сталеву мірну стрічку з вантажем. Для зменшення випадкової похибки кожне вимірювання контролювали повторними відліками. Об'єм вилученого ґрунту для i -го проходу визначали за геометричними параметрами свердловини:

$$V_i = \frac{\pi D_c^2}{4} \Delta z_i, \quad (1)$$

де D_c – фактичний діаметр свердловини при бурінні, $D_c = 0,30$ м;

Δz_i – фактичний інтервал заглиблення за один цикл, $\Delta z_i = 0,07$ – $0,15$ м.

Після вилучення ґрунту визначали масу кожної бурової порції m_i . Об'ємну густину ґрунту в природному стані для кожного проходу оцінювали за співвідношенням [31]

$$\rho_{ei} = \frac{m_i}{V_i}, \quad (2)$$

де m_i – маса вилученої бурової порції ґрунту, кг;

V_i – об'єм ґрунту, вилученого за один прохід, м³.

Для визначення вологості частину кожної бурової порції відбирали в алюмінієву бюксу, герметизували та направляли до лабораторії. Вологість ґрунту визначали ваговим методом після висушування проби до сталої маси [32]. Масову вологість обчислювали за формулою

$$W_{ri} = \frac{m_{vi} - m_{ci}}{m_{ci}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

де m_{vi} – маса вологої проби, кг;

m_{ci} – маса сухої проби після висушування, кг.

Літологічний тип ґрунту для кожного проходу встановлювали за результатами польового візуально-тактильного опису бурової проби [33] з урахуванням її кольору, зернистості, пластичності, зв'язності, вологості, наявності органічних решток та мінеральних включень. Таким способом по глибині свердловини ідентифікували послідовність стратиграфічних інтервалів, представлених гумусованим верхнім шаром, суглинками, супісками та глинами різної консистенції. Межі окремих шарів визначали за зміною літологічного типу ґрунту та комплексу супровідних морфологічних ознак.

Оскільки фактичний інтервал спостереження за один прохід бура становив 0,07–0,15 м, отримані результати забезпечували достатньо детальну характеристику ґрунтового профілю по глибині свердловини. При цьому літологічну будову профілю описували у вигляді послідовності стратиграфічних інтервалів, тоді як об'ємну густину та вологість розглядали як величини, що змінюються по глибині свердловини, у тому числі в межах одного й того самого шару.

Для потреб чисельного експерименту ґрунтовий масив розглядали як еквівалентне однорідне середовище [24]. Середні значення об'ємної густини ґрунту ρ_r та вологості W_r , вико-

ристані як інтегральні характеристики ґрунтового масиву в чисельній моделі, визначали як середньозважені по всій глибині свердловини [34]:

$$\rho_r = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_{ri} \Delta z_i}{\sum_{i=1}^n \Delta z_i}, \quad W_r = \frac{\sum_{i=1}^n W_{ri} \Delta z_i}{\sum_{i=1}^n \Delta z_i}, \quad (4)$$

де n – загальна кількість проходів бура по всій глибині свердловини.

Для аналізу реальної будови ґрунтового профілю та розподілу його фізичних характеристик по глибині результати буріння, а також експериментально визначені значення об'ємної густини і вологості було подано у вигляді узагальненої стратиграфічної схеми. На рис. 2 наведено стратифікацію ґрунту по глибині свердловини, а також профілі зміни об'ємної густини $\rho_r(z)$ і вологості $W_r(z)$, побудовані за результатами буріння та лабораторного аналізу проб. Встановлено, що ґрунтовий масив є літологічно неоднорідним і представлений послідовністю чорноземного шару, суглинків, супіску та глин різної консистенції. Профіль об'ємної густини має загалом зростаючий характер із глибиною, що відповідає природному ущільненню ґрунту та переходу до щільніших глинистих шарів. Розподіл вологості є немонотонним: максимальні значення спостерігаються у верхній частині профілю, мінімальні – у супіщаному інтервалі, тоді як у нижніх глинистих шарах вологість дещо підвищується внаслідок більшої водоутримувальної здатності ґрунту. Пунктирними лініями на рисунку показано інтегральні значення ρ_r і W_r , використані в чисельному експерименті.

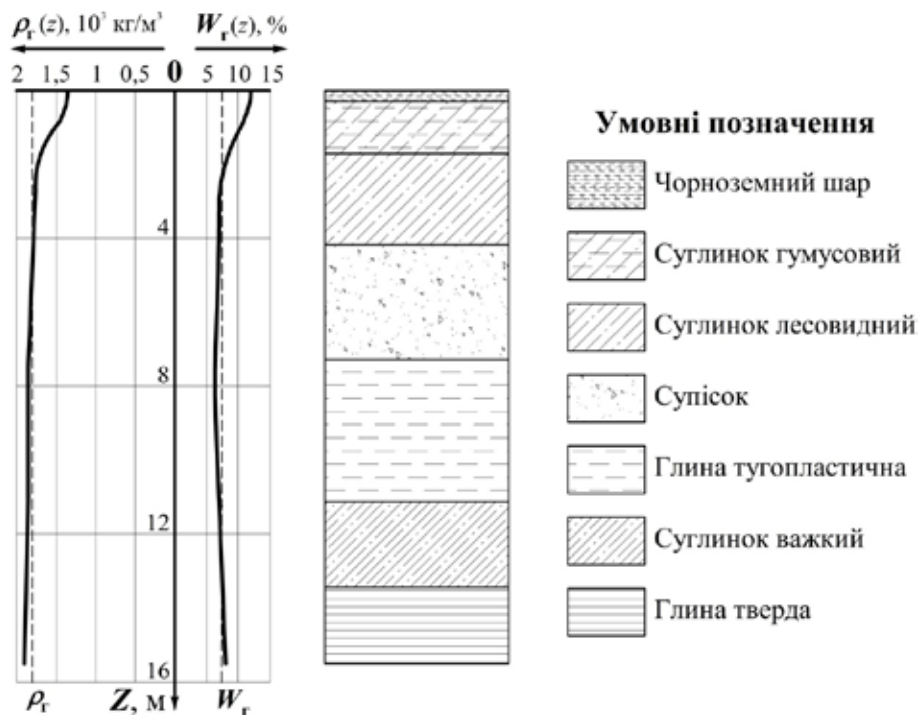


Рис. 2. Стратифікація ґрунтового профілю свердловини та зміна об'ємної густини $\rho_r(z)$ і вологості $W_r(z)$ за глибиною

Теплофізичні характеристики ґрунту для чисельного експерименту визначали опосередковано за довідковими даними для ґрунтів відповідного літологічного типу з урахуванням експериментально встановлених значень об'ємної густини ρ_{ri} та вологості W_{ri} [6, 30]. Для кожного i -го проходження бура за довідковими даними підбирали відповідні значення коефіцієнта теплопро-



відності $\lambda_{\Gamma i}$ і питомої теплоємності $c_{\Gamma i}$. Інтегральні теплофізичні характеристики ґрунтового масиву, використані в чисельному експерименті, визначали як середньозважені по всій глибині свердловини:

$$\lambda_{\Gamma} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_{\Gamma i} \Delta z_i}{\sum_{i=1}^n \Delta z_i}, \quad c_{\Gamma} = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_{\Gamma i} c_{\Gamma i} \Delta z_i}{\sum_{i=1}^n \rho_{\Gamma i} \Delta z_i}, \quad (5)$$

де $\lambda_{\Gamma i}$ – коефіцієнт теплопровідності ґрунту для i -го проходу, Вт/(м·К);

$c_{\Gamma i}$ – питома теплоємність ґрунту для i -го проходу, Дж/(кг·К).

За результатами узагальнення довідкових і експериментально встановлених даних визначено інтегральні теплофізичні характеристики ґрунтового масиву для чисельного експерименту: $\lambda_{\Gamma} = 0,926$ Вт/(м·К) та $c_{\Gamma} = 920$ Дж/(кг·К). Зазначені значення слід розглядати як еквівалентні інтегральні теплофізичні характеристики ґрунтового масиву, визначені опосередковано за довідковими даними з урахуванням експериментально встановлених літологічного складу, об'ємної густини та вологості ґрунту.

Висновки. За результатами пошарового буріння свердловини встановлено стратифікацію ґрунтового профілю в зоні розміщення ґрунтово-повітряного теплообмінника геотермальної вентиляції. Визначено, що ґрунтовий масив має неоднорідну літологічну будову та представлений послідовністю гумусованого верхнього шару, суглинків, супіску й глин різної консистенції. Це підтверджує необхідність урахування реальної будови ґрунтового профілю під час підготовки вхідних даних для чисельного моделювання.

Експериментально визначено зміну об'ємної густини та вологості ґрунту за глибиною свердловини. Встановлено, що об'ємна густина ґрунту загалом зростає з глибиною, що пов'язано з природним ущільненням ґрунтового масиву та переходом до щільніших глинистих шарів. Розподіл вологості має немонотонний характер: підвищені значення спостерігаються у верхній частині профілю та в нижніх глинистих шарах, тоді як у супіщаному інтервалі вологість зменшується.

На основі експериментально встановлених значень об'ємної густини, вологості та літологічного складу ґрунту розрахунково обґрунтовано еквівалентні інтегральні теплофізичні характеристики ґрунтового масиву для чисельного експерименту. Визначено, що інтегральний коефіцієнт теплопровідності становить $\lambda_{\Gamma} = 0,926$ Вт/(м·К), а інтегральна питома теплоємність – $c_{\Gamma} = 920$ Дж/(кг·К). Отримані значення можуть бути використані як узагальнені вхідні параметри ґрунтового масиву під час чисельного моделювання роботи ґрунтово-повітряного теплообмінника геотермальної вентиляції.

Використання експериментально обґрунтованих інтегральних параметрів ґрунтового масиву дає змогу підвищити достовірність чисельного моделювання, оскільки враховує не лише довідкові теплофізичні характеристики ґрунтів, а й фактичну стратифікацію, густину та вологість ґрунту в місці розміщення теплообмінника.

Список використаних джерел

1. Трунова І. М., Мірошник О. О., Галько С. В. Дослідження енергоефективності систем мікроклімату тваринницьких приміщень з використанням комп'ютерних технологій. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2023. Т. 13, № 2. Ст. 37. DOI: <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2023-2-37>.
2. Ковязін О. С., Чижиков І. О., Дереза О. О., Пастушенко А. С. Аналіз впливу температури на адаптацію та продуктивність сільськогосподарських тварин. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного*. 2025. Т. 25, № 1. С. 8–14. DOI: <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-1-1>.
3. Ковязін О. С., Чижиков І. О., Дереза С. В., Пастушенко А. С. Аналіз альтернативних джерел енергії для терморегуляції повітря у тваринницьких приміщеннях. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2025. Т. 15, № 1. С. 61–67. DOI: <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-25-1-6>.



4. Савченко О. О., Желих В. М., Дуднік К. А., Конончук О. М. Технічні передумови влаштування геотермальної вентиляції пасивних будинків. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва*. 2015. № 823. С. 281–285.
5. Benhammou M., Draoui B. Parametric study on thermal performance of earth-to-air heat exchanger used for cooling of buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 44. P. 348–355. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.030>.
6. Abu-Hamdeh N. H. Thermal properties of soils as affected by density and water content. *Biosystems Engineering*. 2003. Vol. 86, No. 1. P. 97–102. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1537-5110\(03\)00112-0](https://doi.org/10.1016/S1537-5110(03)00112-0).
7. Wessolek G., Bohne K., Trinks S. Validation of soil thermal conductivity models. *International Journal of Thermophysics*. 2023. Vol. 44. Art. 20. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10765-022-03119-5>.
8. Simms R. B., Haslam S. R., Craig J. R. Impact of soil heterogeneity on the functioning of horizontal ground heat exchangers. *Geothermics*. 2014. Vol. 50. P. 35–43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2013.08.007>.
9. Недбайло О. М., Божко І. К., Ткаченко М. В., Андрейчук С. В. Чисельне моделювання параметрів повітряно-грунтових теплообмінників для геотермальної вентиляції. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. 2020. № 35. С. 41–48. DOI: <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2020.35.41-48>.
10. Gan G. Simulation of dynamic interactions of the earth–air heat exchanger with soil and atmosphere for preheating of ventilation air. *Applied Energy*. 2015. Vol. 158. P. 118–132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.081>.
11. Vaz J. et al. Experimental and numerical analysis of an earth–air heat exchanger. *Energy and Buildings*. 2011. Vol. 43, No. 9. P. 2476–2482. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.003>.
12. Imanloozadeh A., Lubitz W. D. Characteristics, design, and optimization of earth-air heat exchangers: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2026. Vol. 230. Art. 116677. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116677>.
13. Serageldin A. A. et al. Earth-Air Heat Exchanger thermal performance in Egyptian conditions. *Energy Conversion and Management*. 2016. Vol. 122. P. 25–38. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.05.053>.
14. Basok B. et al. Analysis of the energy efficiency of the earth-to-air heat exchanger. *Rocznik Ochrona Środowiska*. 2022. Vol. 24. P. 202–213. DOI: <https://doi.org/10.54740/ros.2022.015>.
15. Díaz-Hernández H. P. et al. Experimental study of an earth to air heat exchanger. *Geothermics*. 2020. Vol. 84. Art. 101741. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.101741>.
16. Yaropud V. Experimental studies of the air flow heating process in a vertical soil heat exchanger. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2024. № 2(125). С. 83–90. DOI: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2024-2-9>.
17. D'Agostino D. et al. Parametric analysis on an earth-to-air heat exchanger. *Energies*. 2020. Vol. 13, No. 11. Art. 2925. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13112925>.
18. Hegazi A. A. et al. Parametric optimization of earth-air heat exchangers. *International Journal of Refrigeration*. 2021. Vol. 129. P. 278–289. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.05.009>.
19. Koviazin O. et al. Research ways to increase the energy efficiency of ground heat exchangers. *Rural Development 2019: Research and Innovation for Bioeconomy*. 2019. P. 155–161. DOI: <https://doi.org/10.15544/RD.2019.019>.
20. Minaei A., Safikhani H. A new transient analytical model for heat transfer of earth-to-air heat exchangers. *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 33. Art. 101560. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2020.101560>.
21. Ковязін О. С. Дослідження функціонування теплообмінника у ґрунтах різної температуропровідності. *Геофізичний журнал*. 2018. Т. 40, № 2. С. 164–170. DOI: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i2.2018.128938>.
22. Зур'ян О. В., Четверик Г. О. Експериментальні дослідження та математичне моделювання теплових процесів в ґрунті. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2023. № 3. С. 34–46. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-168-3-34-46>.
23. Tang F. et al. A numerical study into effects of soil compaction and heat storage on thermal performance of a horizontal ground heat exchanger. *Renewable Energy*. 2021. Vol. 172. P. 740–752. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.025>.
24. Ali M. H. et al. Estimating the impact of the thermo-physical properties of the multilayer soil on earth-air heat exchanger system performance. *International Journal of Thermofluids*. 2024. Vol. 23. Art. 100722. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100722>.



25. Elminshawy N. A. S. et al. Experimental investigation on the performance of earth-air pipe heat exchanger for different soil compaction levels. *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 124. P. 1319–1327. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.06.119>.
26. Agrawal K. K. et al. Effect of soil moisture contents on thermal performance of earth-air-pipe heat exchanger for winter heating in arid climate. *Geothermics*. 2019. Vol. 77. P. 12–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.08.004>.
27. Low J. E. et al. A comparison of laboratory and in situ methods to determine soil thermal conductivity. *Acta Geotechnica*. 2015. Vol. 10. P. 209–218. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11440-014-0333-0>.
28. Agrawal K. K. et al. A review on effect of geometrical, flow and soil properties on the performance of earth air tunnel heat exchanger. *Energy and Buildings*. 2018. Vol. 176. P. 120–138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.035>.
29. Luo J. et al. A review of ground investigations for ground source heat pump systems. *Energy and Buildings*. 2016. Vol. 117. P. 160–175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.02.038>.
30. Басок Б. І. та ін. Теплофізичні властивості природного ґрунту. *Промислова теплотехніка*. 2008. Т. 30, № 4. С. 77–85.
31. ДСТУ CEN ISO/TS 17892-2:2007. Геотехнічні дослідження та випробування. Лабораторні випробування ґрунту. Частина 2. Визначення щільності дрібнозернистого ґрунту. Київ : Держспоживстандарт України, 2009.
32. ДСТУ Б В.2.1-17:2009. Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Методи лабораторного визначення фізичних властивостей. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010.
33. ASTM D2488-17e1. Standard practice for description and identification of soils (visual-manual procedures). West Conshohocken: ASTM International, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1520/D2488-17E01>.
34. Shi Z. et al. Comparative analysis of ground thermal conductivity and thermal resistance of borehole heat exchanger. *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 91. Art. 109603. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109603>.

Дата першого надходження статті до видання: 20.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 25.05.2026

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



O. Koviazin¹, A. Pariev², O. Dereza¹, S. Dereza¹

¹*Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University*

²*Institute of Mechanics and Automation of Agriculture Production*

EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL SUBSTANTIATION OF INTEGRAL THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF A SOIL MASSIF FOR NUMERICAL MODELING OF AN EARTH-TO-AIR HEAT EXCHANGER

Summary

The article presents the results of an experimental and computational determination of the physical and thermophysical characteristics of soil used as input parameters for numerical modeling of an earth-to-air heat exchanger in a geothermal ventilation system. The relevance of the study is determined by the need to account for the actual heterogeneity of the soil profile, since lithological composition, bulk density, moisture content, and heat storage capacity of the soil significantly affect the intensity of heat transfer between the underground air duct and the surrounding soil medium. Field studies were carried out at an experimental site where a prototype geothermal ventilation system had been installed. During manual borehole drilling, layer-by-layer soil sampling was performed, and the lithological type of the material, the mass of the extracted drilling portion, bulk density, and gravimetric moisture content were determined. The boundaries of individual layers were established based on a visual-manual



description, taking into account color, grain size, plasticity, cohesion, moisture condition, and the presence of inclusions. The obtained data were summarized in the form of a stratigraphic scheme with depth profiles of bulk density and moisture content. It was found that the studied medium has a heterogeneous lithological structure and is represented by a sequence of a chernozem layer, loams, sandy loam, and clays of different consistencies. The results show that bulk density generally increases with depth, whereas the moisture distribution is nonmonotonic. For the purposes of the computational experiment, the heterogeneous profile was represented as an equivalent homogeneous medium with weighted-average parameters. Based on the experimentally determined values of bulk density, moisture content, and lithological composition, as well as reference data for the corresponding material types, the equivalent values of soil thermal conductivity and specific heat capacity were determined as $0.926 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ and $920 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, respectively. The obtained results can be used as input data for further numerical modeling of transient heat transfer between the airflow in the underground duct and the soil mass, which makes it possible to refine the prediction of the temperature regime of an earth-to-air heat exchanger in a geothermal ventilation system.

Keywords: geothermal ventilation, stratification, lithological heterogeneity, bulk density, moisture content, thermal conductivity, specific heat capacity.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-2-13>

УДК 633.34:664.0

І. А. Колесніченко¹, аспірант

ORCID: 0009-0007-9302-208X

О. В. В'юник², ст. викл.

ORCID: 0000-0002-6413-5567

¹Полтавський державний аграрний університет²Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: olga.viunyk@tsatu.edu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОСТІЙКОСТІ ТА ФОРМ ЗВ'ЯЗКУ ВОЛОГИ В НАСІННІ РИЦИНИ МЕТОДАМИ ТЕРМІЧНОГО ТА ТЕРМОГРАВІМЕТРИЧНОГО АНАЛІЗІВ

Анотація. У роботі розглянуто особливості термостійкості насіння рицини та форми зв'язку вологи в його структурі з використанням методів термічного і термогравіметричного аналізів. Показано, що під час теплової обробки насіння рицини відбуваються складні фізичні та фізико-хімічні процеси, пов'язані з видаленням вільної, капілярно зв'язаної та адсорбційно утримуваної вологи, а також зі зміною стану органічних компонентів матеріалу. Обґрунтовано, що дослідження втрати маси залежно від температури та швидкості нагрівання дає змогу оцінити термічну стійкість насіння, виділити характерні температурні інтервали дегідратації та встановити енергетично різні форми зв'язку вологи. Особливу увагу приділено значенню цих характеристик для обґрунтування режимів сушіння, теплової підготовки і подальшої переробки насіння рицини. Отримані положення можуть бути використані під час розроблення технологій сушіння, математичного моделювання тепломасообміну та оцінки допустимих температурних меж обробки олійної сировини.

Ключові слова: насіння рицини, термостійкість, волога, форми зв'язку вологи, термічний аналіз, термогравіметричний аналіз, сушіння, тепла обробка, дегідратація, олійна сировина.

Постановка проблеми. Насіння рицини є цінною технічною олійною сировиною, якість і технологічна придатність якої значною мірою залежать від умов теплової підготовки перед сушінням, пресуванням або екстрагуванням [1–3]. У процесі нагрівання в матеріалі відбувається не лише видалення вологи, а й зміна структурного стану окремих компонентів, що може впливати на вихід олії, її якість, енерговитрати процесу та стабільність зберігання насіння [1–3].

Для науково обґрунтованого вибору режимів теплової обробки недостатньо знати лише загальну вологість сировини. Важливо встановити, у яких формах волога перебуває в насінні рицини, наскільки міцно вона зв'язана з твердою фазою, у яких температурних інтервалах відбувається її видалення та за яких умов починаються небажані термічні зміни органічної речовини. Саме тому актуальним є дослідження термостійкості та форм зв'язку вологи в насінні рицини методами термічного і термогравіметричного аналізів.

Проблема полягає в тому, що в багатьох роботах теплову підготовку насіння оцінюють переважно за кінцевою вологістю або загальними сушильними характеристиками, без достатнього врахування природи зв'язку вологи з матеріалом. Для насіння рицини, яке має складну капілярно-пористу структуру, щільну оболонку та високий вміст олії, такий підхід є недостатнім. Тому виникає потреба у поглибленому дослідженні термічної поведінки цього матеріалу з використанням сучасних методів аналізу, що дозволяють відстежувати зміну маси зразка та швидкість її втрати в процесі нагрівання.

Аналіз останніх досліджень. У сучасних дослідженнях насіння рицини розглядають як перспективну олійну культуру для технічного використання і значну увагу приділяють питанням його сушіння, волого-теплової обробки та підготовки до вилучення олії [1, 2]. Встановлено, що



технологічні властивості насіння, а також ефективність його переробки залежать від вологості, щільності, пористості, геометричних параметрів і умов нагрівання [2, 4].

Окремий напрям наукових робіт стосується дослідження фізичних властивостей насіння рицини залежно від вологості. У таких працях показано, що зі зміною вологовмісту змінюються розміри насіння, насипна та істинна щільність, пористість шару, а також умови тепло- і масопереносу [4]. Ці результати є важливими для технології сушіння, однак вони не дають повної інформації про енергетичний стан вологи та характер її зв'язку з компонентами насіння.

У роботах, присвячених сушінню насіння рицини, встановлено, що підвищення температури сушильного агента інтенсифікує видалення вологи, але водночас може впливати на якість сировини і спричиняти небажані структурні зміни [5]. Тому поряд із кінетикою сушіння важливого значення набуває оцінка термостійкості насіння, тобто його здатності зберігати основні технологічні властивості в певному інтервалі температур.

Термічний аналіз і термогравіметрія широко застосовуються для дослідження рослинної сировини, оскільки дозволяють визначати характерні температурні інтервали видалення вологи, оцінювати інтенсивність дегідратації, встановлювати стадії пароутворення та диференціювати окремі форми зв'язку вологи [6–8]. Проте саме щодо насіння рицини у відкритих джерелах недостатньо узагальнених даних, де форми зв'язку вологи аналізувалися б системно з позицій термогравіметричного підходу [2, 6].

Формулювання мети статті. Метою роботи є встановлення особливостей термічної поведінки насіння рицини, визначення характерних температурних інтервалів видалення вологи та оцінка форм її зв'язку з матеріалом за результатами термічного й термогравіметричного аналізів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- 1) проаналізувати фізичні та технологічні особливості насіння рицини як об'єкта теплової обробки;
- 2) охарактеризувати основні форми зв'язку вологи в капілярно-пористих біологічних матеріалах;
- 3) обґрунтувати доцільність використання методів термічного та термогравіметричного аналізів для дослідження насіння рицини;
- 4) встановити температурні інтервали видалення вільної, капілярно зв'язаної та міцнозв'язаної вологи;
- 5) оцінити термостійкість насіння рицини в процесі нагрівання;
- 6) визначити практичне значення отриманих результатів для вибору режимів сушіння і теплової підготовки насіння до переробки.

Основна частина. Насіння рицини як об'єкт термічного та термогравіметричного дослідження. Насіння рицини є складною багатокомпонентною біологічною системою, у якій поєднуються тверда органічна основа, жирова фаза, волога різних форм зв'язку, а також внутрішній поровий простір. Саме ця багатокомпонентність зумовлює специфіку його поведінки під час нагрівання [1, 2]. На відміну від простих гомогенних тіл, у насінні рицини підвищення температури супроводжується не лише зростанням теплового стану, а й низкою супутніх процесів: видаленням поверхневої та капілярної вологи, десорбцією міцнозв'язаної вологи, структурними змінами біополімерів, а за вищих температур – термічним руйнуванням органічних компонентів. Це робить насіння рицини зручним і водночас складним об'єктом для дослідження методами термічного аналізу.

З погляду технології сушіння особливий інтерес становлять саме ті температурні інтервали, в яких відбувається видалення вологи без істотного пошкодження олійної сировини. Для рицини це особливо важливо через високий вміст олії та наявність щільної оболонки, які впли-



вають на внутрішню міграцію вологи та на швидкість вирівнювання температурного поля. Попередні дослідження фізичних властивостей насіння рицини показують, що зі зміною вологості змінюються розміри насінини, насипна та істинна щільність, а також пористість шару, тобто ті характеристики, які безпосередньо впливають на тепломасообмін під час нагрівання.

Для біологічних матеріалів, подібних до насіння рицини, важливо враховувати, що волога в них не є однорідною за енергетичним станом [7–10]. Одна її частина може бути видалена вже на початкових стадіях нагрівання, тоді як інша потребує вищої температури через сильніший зв'язок з внутрішньою структурою матеріалу [7, 8]. Саме тому визначення загальної вологості саме по собі ще не дає повного уявлення про поведінку насіння в процесі сушіння. Для обґрунтування режимів теплової обробки необхідно встановити форми зв'язку вологи та відповідні температурні інтервали її видалення. Таке завдання найдоцільніше розв'язувати методами TG, DTG і, за потреби, DTA/DSC.

Теоретичні уявлення про форми зв'язку вологи в насінні рицини. У капілярно-пористих біологічних матеріалах, до яких належить і насіння рицини, прийнято виділяти кілька основних форм перебування вологи: вільну, капілярно зв'язану, осмотично або структурно утримувану та адсорбційно зв'язану. Вільна волога найменш міцно утримується матеріалом і відносно легко видаляється на початкових етапах сушіння. Капілярно зв'язана волога розташована у порах і мікрокапілярах, тому її видалення визначається не лише температурою, а й поровою структурою, поверхневим натягом і градієнтом парціального тиску. Найбільш енергетично стійкою є адсорбційно зв'язана або міцнозв'язана волога, яка взаємодіє з полярними центрами біополімерів і видаляється лише при більш інтенсивному нагріванні.

Для насіння рицини питання форм зв'язку вологи має додаткову специфіку через поєднання гідрофільних компонентів сухої речовини з гідрофобною олійною фазою. Олія не утримує воду так само, як полісахаридна або білкова матриця, проте впливає на внутрішню міграцію вологи, екранує частину капілярного простору та змінює теплові властивості насінини. Саме тому термогравіметрична крива насіння рицини може мати не одну, а кілька ділянок втрати маси, що відображають видалення різних форм вологи та подальші термодеструктивні процеси органічної речовини. Це положення узгоджується з сучасними уявленнями про багатостадійність дегідратації та термоперетворення природної біомаси.

Кількісно вологовміст матеріалу визначають через співвідношення маси вологи до маси вологого або сухого матеріалу. Найчастіше використовують такі вирази:

$$W_{e.o} = \frac{m_0 - m_c}{m_0} 100\%, \quad (1)$$

$$W_{c.o} = \frac{m_0 - m_c}{m_c} 100\%, \quad (2)$$

де m_0 – початкова маса зразка, кг;

m_c – маса абсолютно сухої речовини, кг.

Під час термогравіметричного аналізу вологовтрату в момент часу або за певної температури можна описати як:

$$\Delta m(T) = m_0 - m(T), \quad (3)$$

де $m(T)$ – маса зразка за температури T .

Для зручності результати часто подають у вигляді відносної маси:

$$\eta(T) = \frac{m(T)}{m_0} 100\%. \quad (4)$$



Саме функції $m(T)$, $\Delta m(T)$ або $\eta(T)$ є базою для подальшої інтерпретації форм зв'язку вологи в матеріалі.

Сутність термічного та термогравіметричного аналізів. Термічний аналіз охоплює сукупність методів, за допомогою яких вивчають зміну властивостей речовини при програмованому нагріванні або охолодженні. Для дослідження насіння рицини найбільший інтерес становлять термогравіметричний аналіз (TG), диференціальна термогравіметрія (DTG) та диференціальний термічний аналіз або диференціальна сканувальна калориметрія (DTA/DSC). Метод TG дозволяє реєструвати зміну маси зразка залежно від температури або часу, DTG – визначати швидкість втрати маси, а DSC/DTA – фіксувати теплові ефекти, що супроводжують дегідратацію, плавлення, структурні переходи або термічний розклад.

Загальний вигляд швидкості втрати маси описують похідною:

$$\frac{dm}{dT}, \quad (5)$$

а в практиці DTG часто аналізують величину:

$$DTG(T) = -\frac{1}{m_0} \frac{dm}{dT} 100\%, \quad (6)$$

яка характеризує інтенсивність дегідратації або деструкції за одиницю температурного інтервалу.

Інтенсивність процесу видалення вологи можна також подати через час:

$$v = \frac{dm}{d\tau}, \quad (7)$$

де τ – час нагрівання.

Застосування цих методів до насіння рицини дає можливість встановити:

- початок випаровування вільної вологи;
- температурний інтервал основного зневоднення;
- ділянки, де втрата маси пов'язана вже не з водою, а з термічним руйнуванням органічної речовини;
- межу термостійкості матеріалу, після якої сушіння переходить у небажану зону термічної деструкції.

Для матеріалів рицинового походження основна зона термічного розкладання органічної частини в інертному середовищі описувалась приблизно в області 150–400°C, що важливо враховувати як верхню межу, до якої технологічне сушіння не повинно навіть наближатись [5].

Інтерпретація TG- і DTG-кривих насіння рицини. Під час нагрівання насіння рицини типова термогравіметрична крива має ступінчастий характер. На першій стадії, як правило, відбувається видалення поверхневої та слабкозв'язаної вологи. Для біологічних матеріалів ця ділянка найчастіше відповідає помірному температурному інтервалу, де втрата маси ще не супроводжується суттєвим руйнуванням органічної матриці. На другій стадії спостерігається видалення капілярно утримуваної та частини слабкоадсорбованої вологи, причому пік DTG на цій ділянці вказує на температуру максимальної швидкості зневоднення. Подальше підвищення температури може призводити до переходу в область, де фіксуються не лише процеси десорбції міцнозв'язаної вологи, а й початкові явища термічної деструкції окремих органічних компонентів.

З погляду технології сушіння особливо важливо відокремити ділянку дегідратації від ділянки деструкції. Якщо температура сушіння обрана надто високою, процес перестав бути власне сушінням і починає супроводжуватися небажаними змінами якості сировини. Для

рицини це може означати погіршення умов подальшого вилучення олії, локальні зміни структури ядра, збільшення термічного навантаження на жирову фазу та зниження технологічної стабільності насіння. Тому межу термостійкості доцільно пов'язувати з температурою, вище якої на TG/DTG-кривих починається стійка втрата маси, уже не зумовлена лише водою. Для рицинової біомаси основні процеси розкладу фіксувалися значно вище типових сушильних температур, але це не виключає необхідності контролювати режим нагрівання в практичних умовах.

Для кількісної оцінки ступеня перетворення часто використовують величину конверсії:

$$\alpha_T = \frac{m_0 - m(T)}{m_0 - m_f}, \quad (8)$$

де m_f – кінцева маса залишку після завершення аналізу.

Для ділянки саме дегідратації можна записати окремо:

$$\alpha_w = \frac{m_0 - m(T)}{m_0 - m_d}, \quad (9)$$

де m_d – маса зразка після видалення вологи, але до початку суттєвої термічної деструкції сухої речовини.

Такі показники зручні для порівняння різних зразків насіння рицини, які відрізняються початковою вологістю, масою або умовами попередньої підготовки.

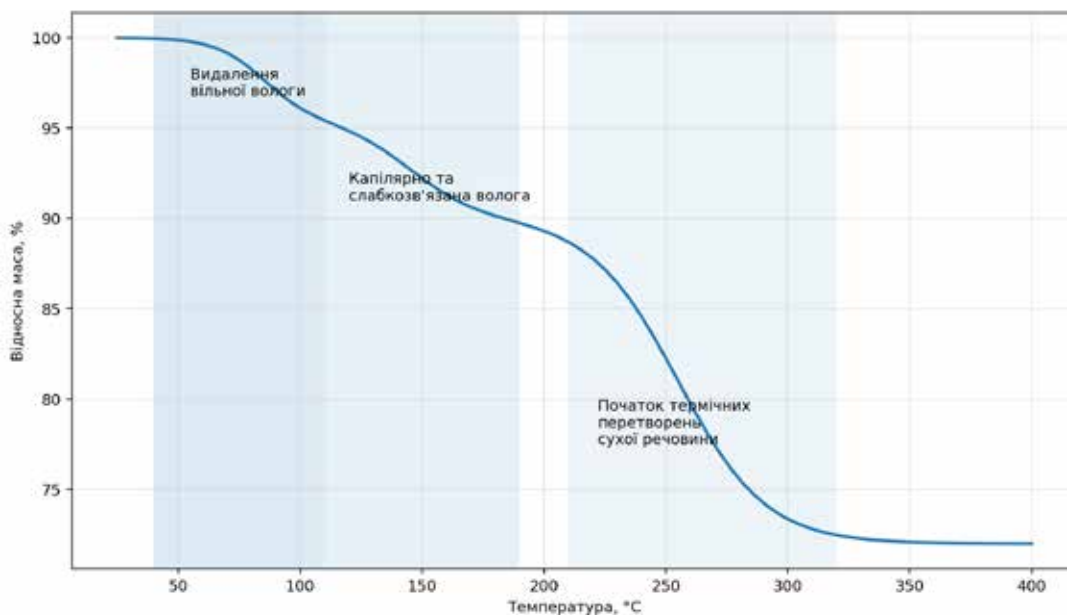


Рис. 1. Типова термогравіметрична крива (TG) насіння рицини з виділенням ділянок видалення вільної, капілярно зв'язаної та міцнозв'язаної вологи

Оцінка термостійкості насіння рицини. Термостійкість матеріалу доцільно трактувати як здатність зберігати свої основні структурні та технологічні властивості в заданому інтервалі температур без істотного необоротного руйнування. Для насіння рицини це поняття має подвійне значення. З одного боку, необхідно забезпечити достатнє теплове навантаження для ефективного видалення вологи. З іншого – не допустити переходу в температурну область, де починаються незворотні зміни органічної матриці та погіршуються технологічні характеристики сировини.

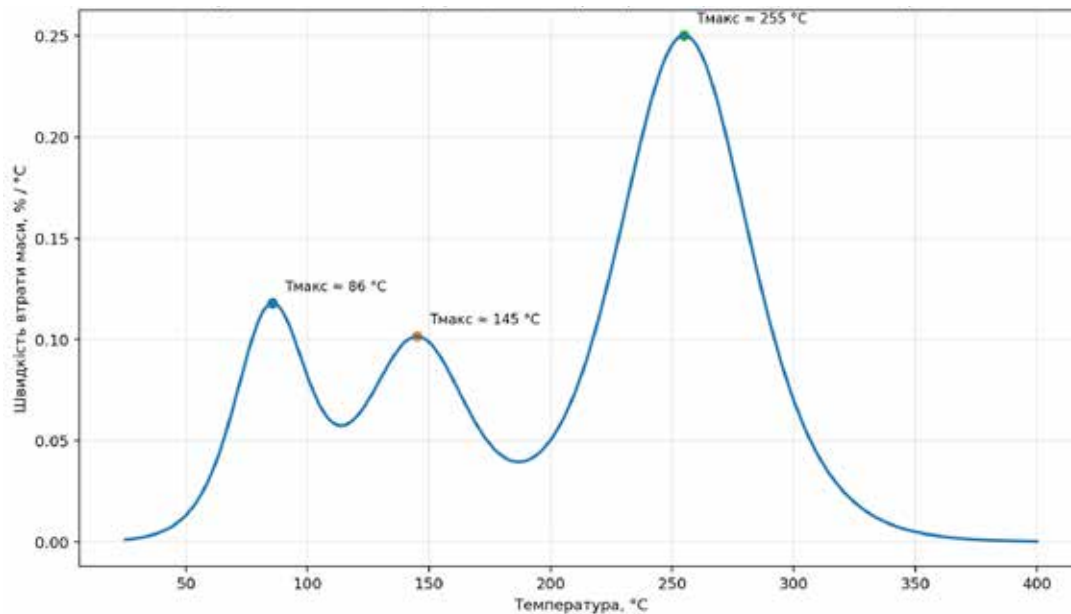


Рис. 2. Диференціальна термогравіметрична крива (DTG) насіння рицини; пік відповідає температурі максимальної швидкості видалення вологи

Практично термостійкість можна оцінювати за кількома критеріями. Першим критерієм є температура початку помітної втрати маси: T_{onset} , тобто точка, в якій TG-крива починає стабільно відхилятися від горизонтальної ділянки. Другим критерієм є температура максимального піка на DTG-кривій: T_{Max} , що характеризує найбільшу швидкість протікання конкретної стадії процесу. Для оцінки безпечної зони сушіння доцільно аналізувати саме область нижче температури, де фіксуються ознаки деструкції сухої речовини.

У загальному вигляді залежність швидкості термоперетворення можна записати через кінетичне рівняння неізотермічного процесу:

$$\frac{d\alpha}{d\tau} = k(T) f(\alpha) \quad (10)$$

де $f(\alpha)$ – функція механізму процесу;

$k(T)$ – температурна константа швидкості.

Температурну залежність константи швидкості зазвичай подають рівнянням Арреніуса:

$$k(T) = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (11)$$

де A – передекспоненційний множник;

E – енергія активації, Дж/моль;

R – універсальна газова стала;

T – абсолютна температура, К.

Чим сильніше зв'язана волога, тим вищої енергії потребує її видалення, а отже, тим більша ймовірність переходу до області, де вже починаються небажані зміни сухої речовини. Саме тому термогравіметричний аналіз є зручним інструментом для визначення межі між корисним тепловим впливом і шкідливим термічним перевантаженням.

Формалізація форм зв'язку вологи за результатами термогравіметрії. Для технологічного опису процесу доцільно пов'язувати окремі ділянки TG- та DTG-кривих з формами перебування вологи в насінні. Якщо позначити масові втрати на різних стадіях як Δm_1 , Δm_2 , Δm_3 , то сумарна втрата маси, пов'язана з видаленням вологи, може бути представлена як:



$$\Delta m_w = \Delta m_1 + \Delta m_2 + \Delta m_3 \quad (12)$$

де Δm_1 – втрата маси за рахунок вільної вологи;

Δm_2 – втрата маси за рахунок капілярно зв'язаної вологи;

Δm_3 – втрата маси за рахунок адсорбційно або структурно зв'язаної вологи.

Тоді частка окремої форми вологи в загальній волозі може бути визначена як:

$$\varphi_i = \frac{\Delta m_i}{\Delta m_w} 100\%, \quad i = 1, 2, 3. \quad (13)$$

Такий підхід дозволяє не лише якісно, а й кількісно порівнювати різні партії насіння рицини за характером зв'язку вологи. Наприклад, якщо зразок після попереднього підсушування має меншу частку Δm_1 , але відносно велику Δm_3 , це означає, що основна частина вологи, що легко видалається, вже усунута, а подальше сушіння вимагатиме більшого енергетичного впливу.

Висновки. У роботі встановлено, що насіння рицини є складним капілярно-пористим олійним матеріалом, для якого теплова обробка супроводжується не лише видаленням вологи, а й зміною стану окремих структурних компонентів. Це зумовлює необхідність оцінювання не тільки загальної вологості сировини, а й форм зв'язку вологи, що визначають енергетичні витрати на її видалення та допустимі межі нагрівання.

Показано, що методи термічного та термогравіметричного аналізів є інформативними для дослідження насіння рицини, оскільки дають змогу простежити зміну маси зразка під час нагрівання, визначити температурні інтервали дегідратації та розмежувати стадії видалення вільної, капілярно зв'язаної і міцнозв'язаної вологи. Використання TG- і DTG-кривих дозволяє оцінити інтенсивність втрати маси, встановити характерні температури початку процесу та максимуму швидкості зневоднення, а також своєчасно виявити перехід до області термічної деструкції.

Узагальнення літературних даних показало, що фізичні властивості насіння рицини істотно залежать від вологості: зі зміною вологовмісту змінюються геометричні параметри насіння, насипна та істинна щільність, пористість шару й умови тепломасообміну. Це підтверджує, що при сушінні рицини волога перебуває у неоднорідному енергетичному стані, а тому її видалення відбувається поетапно.

Встановлено, що термостійкість насіння рицини доцільно оцінювати як здатність зберігати технологічні властивості в певному температурному інтервалі без переходу до необоротних термічних змін органічної речовини. Для практики сушіння це означає необхідність вибору таких режимів нагрівання, які забезпечують ефективне видалення вологи, але не наближають матеріал до температурної області інтенсивного пароутворення.

Отримані положення мають практичне значення для обґрунтування раціональних режимів сушіння та попередньої теплової підготовки насіння рицини перед вилученням олії. Результати можуть бути використані для вдосконалення технології підготовки сировини, зниження енерговитрат, а також для подальшого математичного моделювання процесів тепломасообміну в насінні рицини.

Список використаних джерел

1. Patel V. R., Dumancas G. G., Viswanath L. C. K., Maples R., Subong B. J. J. Castor oil: properties, uses, and optimization of processing parameters in commercial production. *Lipid Insights*. 2016. Vol. 9. P. 1–12. DOI: 10.4137/LPI.S40233.
2. Sorokova N., Bandura V., Yaroshenko L. et al. Mathematical modeling of heat and mass transfer during moisture–heat treatment of castor beans to improve the quality of vegetable oil. *Agriculture*. 2022. Vol. 12, No. 9. Article 1356. DOI: 10.3390/agriculture12091356.
3. Дідур, В., Дідур, В., Чебанов, А., Асєєв, А. Оптимізація параметрів волого-теплової обробки м'ятки при виділенні олії із насіння рицини. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь : ТДАТУ, 2018. Вип. 8, том 2. URL: <https://oj.tsatu.edu.ua/index.php/visnik/article/view/15>



4. Gharibzahedi S. M. T., Mousavi S. M., Ghahderijani M. A survey on moisture-dependent physical properties of castor seed (*Ricinus communis* L.). *Australian Journal of Crop Science*. 2011. Vol. 5, No. 1. P. 1–7.
5. Ojediran J. O., Olaniran A. F., Adesina B. S. et al. Thin-layer drying characteristics of castor (*Ricinus communis*) seeds. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2011. Vol. 35, No. 5. P. 647–655. DOI: 10.1111/j.1745-4549.2011.00514.x.
6. Kaur R., Gera P., Jha M. K., Bhaskar T. Pyrolysis kinetics and thermodynamic parameters of castor (*Ricinus communis*) residue using thermogravimetric analysis. *Bioresource Technology*. 2018. Vol. 250. P. 422–428. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.11.077.
7. Chen C., Li D., Song J. et al. TG-DSC method applied to drying characteristics and heat requirement of cotton stalk during drying. *Bioresource Technology*. 2013. Vol. 128. P. 138–146.
8. Wang H., Li Y., Li A. et al. Classification and physical characteristics of bound water in loess based on thermal analysis. *Cold Regions Science and Technology*. 2020. Vol. 174. Article 103059.
9. Дідур В.В., Білокінь Я.В., В'юник О.В., Дашивець Г.І. Теплофізична модель процесу прес-екструзії олійних культур. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. Технічні науки : електронне наукове фахове видання. / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. Запоріжжя : Видавничий дім «Гельветика», 2025. Вип. 15, т. 2. С. 32–36. DOI: <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-4>*
10. Mbah GO, Amulu NF, Onyiah MI. Effect of process parameters on the yield of oil from castor seed. *Am J Eng Res*. 2014;3(5):179–186.

Дата першого надходження статті до видання: 14.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 10.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 25.05.2026

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



I. Kolesnichenko¹, O. Viunyk²

¹*Poltava State Agrarian University*

²*Dmytro Motornyi Tavria state agrotechnological university*

RESEARCH ON THERMOSTABILITY AND MOISTURE BONDING FORMS IN CASTOR SEEDS USING THERMAL AND THERMOGRAVIMETRIC ANALYSIS METHODS

Summary

Castor seeds are a valuable technical oil raw material, the quality and technological suitability of which largely depend on the conditions of heat treatment before drying, pressing or extraction. During the heating process, not only moisture is removed from the material, but also the structural state of individual components changes, which can affect the oil yield, its quality, energy consumption of the process and the stability of seed storage. It has been established that the technological properties of seeds, as well as the efficiency of their processing, depend on humidity, density, porosity, geometric parameters and heating conditions. The paper investigates the thermal stability of castor seeds and the forms of moisture binding in their structure using thermal and thermogravimetric analysis methods. It is shown that during heating, castor seeds undergo complex physical and physicochemical transformations associated with the removal of free, capillary-bound and strongly bound moisture, as well as with the onset of thermal changes in the organic matrix. The use of TG and DTG curves makes it possible to determine the characteristic temperature ranges of dehydration, to estimate the rate of mass loss and to identify the transition from drying to undesirable thermal degradation. The study also confirms that the physical properties of castor seeds depend on moisture content, which affects heat and mass transfer during thermal treatment. The obtained results can be used to substantiate rational drying regimes, improve pre-treatment conditions before oil extraction and develop mathematical models of heat and mass transfer in castor seeds.

Keywords: castor seeds, heat resistance, moisture, forms of moisture bonding, thermal analysis, thermogravimetric analysis, drying, heat treatment, dehydration, oilseeds.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-2-14>

УДК 532.135:532.5:519.6

С. В. Ляшенко¹, канд. техн. наук, доц.

ORCID: 0000-0002-3227-3738

М. О. Барда², магістрант

ORCID: 0009-0004-5495-8561

¹Полтавський державний аграрний університет²Уманський національний університет

e-mail: didur.vv@gmail.com

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ В'ЯЗКОЇ РІДИНИ

Анотація. У статті розглянуто особливості математичного моделювання руху в'язкої рідини в каналах екструдера складної геометрії. Дослідження спрямоване на встановлення закономірностей зміни швидкості та тиску в циліндричних і кільцевих формувальних каналах матриці. Наведено алгоритм підготовки геометричної моделі, задання граничних умов, побудови розрахункової сітки та візуалізації результатів у програмному середовищі тривимірного моделювання. Встановлено, що характер розподілу тиску й швидкості суттєво залежить від форми каналу матриці: у циліндричному каналі спостерігається інтенсивніше гальмування потоку через додаткові опори, тоді як у кільцевому каналі рух в'язкої рідини є більш вирівняним.

Ключові слова: екструдер, руху в'язкої рідини, формувальний канал, матриця, розподіл тиску, математичне моделювання.

Постановка проблеми. Сучасні технології переробки рослинної сировини, кормових сумішей і в'язких рідин дедалі частіше передбачають використання екструдерів як обладнання, що забезпечує інтенсивну термомеханічну обробку. Якість готового продукту та стабільність роботи екструдера значною мірою визначаються узгодженістю параметрів шнекового органа та формувального вузла. Особливого значення набуває геометрія матриці, оскільки саме вона формує гідродинамічний опір потоку, впливає на розподіл тиску, швидкість руху в'язкої рідини і рівномірність виходу продукту.

Аналітичний опис руху в'язкої рідини в каналах складної форми є суттєво ускладненим через просторовий характер течії, наявність зон обертально-поступального руху, зміну реологічних характеристик матеріалу та складну геометрію проточної частини. Тому використання сучасних засобів комп'ютерного моделювання є доцільним і практично необхідним для аналізу таких процесів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження в галузі моделювання екструзійних процесів показують, що математичний опис течії в'язкої рідини розвивається у трьох основних напрямках: аналітичні моделі шнекового транспортування, чисельне моделювання в тривимірній постановці та комбіновані інженерні підходи для прогнозування параметрів формування продукту. У сучасному огляді методів моделювання одношнекової екструзії підкреслюється, що чисельні методи стали ключовими для аналізу течії в каналах складної форми, де класичні аналітичні підходи мають обмежене застосування [1–4]. Окремі праці присвячені уточненню математичних моделей руху в'язкої рідини в одношнекових екструдерах. Зокрема, нові дослідження екструзії акцентують увагу на поєднанні реологічних моделей із просторовим аналізом течії, що дозволяє точніше враховувати зміну швидкості, температури та тиску вздовж каналу [5–9].

У прикладних роботах з чисельного моделювання течії в'язкої рідини в екструдері активно застосовують методи скінченних елементів і скінченних об'ємів. Такі підходи дозволяють описувати тривимірний рух в'язкої або неньютонівської рідини, а також прогнозувати поля швид-

кості та тиску в дозувальній зоні й у формувальних каналах. Зокрема, у дослідженні течії термопластичного еластомеру в одношнековому екструдері показано ефективність тривимірної чисельної моделі для визначення витрати, тиску та локальних особливостей потоку [10–14].

Отже, аналіз сучасних джерел підтверджує доцільність використання чисельного моделювання для оцінювання гідродинамічних процесів у формувальних вузлах екструдерів. Особливо актуальним є дослідження впливу геометрії матриці на структуру потоку, що й визначає наукову та практичну цінність виконаної роботи [15–19].

Формулювання мети статті. Метою статті є розробка математичної моделі течії в'язкої рідини в кільцевих і циліндричних каналах екструдера, а також визначення закономірностей зміни тиску та швидкості в залежності від геометрії формувального вузла.

Для досягнення поставленої мети передбачено: обґрунтувати вибір математичної моделі руху в'язкої рідини; задати фізичні параметри середовища та граничні умови; побудувати розрахункову сітку й виконати чисельне моделювання; проаналізувати поля швидкості й тиску в каналах різної форми; перевірити адекватність моделі шляхом зіставлення з експериментальними даними.

Основна частина. Розвиток математичних пакетів і інформаційних технологій значно розширив можливості дослідження складних технологічних процесів, які важко або неможливо повноцінно описати лише аналітичними методами. Для моделювання течії в'язкої рідини в каналах складної форми використано систему тривимірного чисельного аналізу Flow Vision, що дозволяє відтворювати просторові картини розподілу швидкості, тиску та інших фізичних параметрів.

Під час термомеханічної обробки сировини стабільність роботи обладнання залежить від співвідношення між тиском, який створює шнек, і гідродинамічним опором матриці. Геометрія формувального каналу визначає умови течії розплаву та впливає на кінцеву якість екструдату. Для чисельного дослідження були обрані дві конструкції формувального вузла: циліндрична та кільцева. Їхні геометричні характеристики наведено на рис. 1.

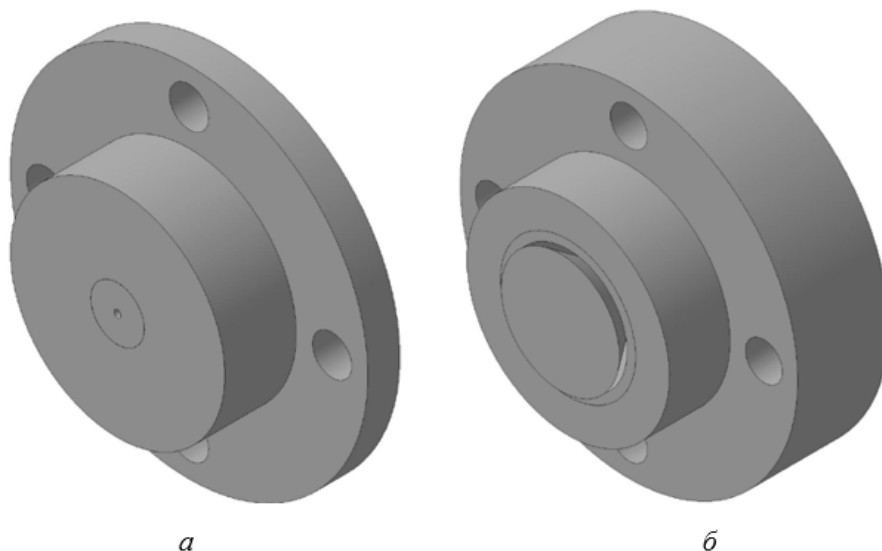


Рис. 1. Конструкція формувального вузла:
а – циліндричної форми; **б** – кільцевої форми

Геометричні параметри досліджуваних матриць:

– довжина матриці: 0,043 м для циліндричної та 0,055 м для кільцевої;

- довжина формувального каналу: 0,029 м і 0,045 м відповідно;
- площа формувального каналу: $1,94 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ та $2,53 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$;
- кут конуса шнека: 50° ;
- кут конуса обтікача для кільцевої матриці: 35° .

Вибір математичної моделі. Для опису течії розплаву в каналі матриці використано модель ламінарної рідини, що є прийнятною для малих швидкостей і чисел Рейнольдса менше 2300. У межах цієї постановки розв'язуються рівняння Нав'є–Стокса та рівняння нерозривності.

Рівняння Нав'є–Стокса для компонент швидкості мають вигляд:

$$\frac{\partial v_x}{\partial \tau} + \frac{\partial (v_x)^2}{\partial x} + \frac{\partial (v_x v_y)}{\partial y} + \frac{\partial (v_x v_z)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{Re} \nabla^2 v_x \quad (1)$$

$$\frac{\partial v_y}{\partial \tau} + \frac{\partial (v_x v_y)}{\partial x} + \frac{\partial (v_y)^2}{\partial y} + \frac{\partial (v_y v_z)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{1}{Re} \nabla^2 v_y \quad (2)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial \tau} + \frac{\partial (v_x v_z)}{\partial x} + \frac{\partial (v_y v_z)}{\partial y} + \frac{\partial (v_z)^2}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{Re} \nabla^2 v_z \quad (3)$$

Рівняння нерозривності:

$$\nabla \cdot V = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

Для розрахунків прийнято такі початкові параметри розплаву: тиск $P = 101000$ Па, температура $T = 273$ К, початкова швидкість на вході $v = 0,22$ м/с, густина $\rho = 1290$ кг/м³, динамічна в'язкість $\mu = 9000$ Па·с.

Граничні умови. На межах розрахункової області було задано такі умови:

1. На стінках каналу – умова прилипання: $v_w = 0$.
2. На вході в канал – нормальна швидкість: $v_n = v_{nw}$.
3. Для обертового шнека – тангенціальна закрутка з кутовою швидкістю: $\omega = 37,68$ рад/с.
4. На виході продукту – нульовий тиск: $p_w = 0$.

Схему задання граничних умов для циліндричного та кільцевого формувального вузла доцільно подати на рис. 2.

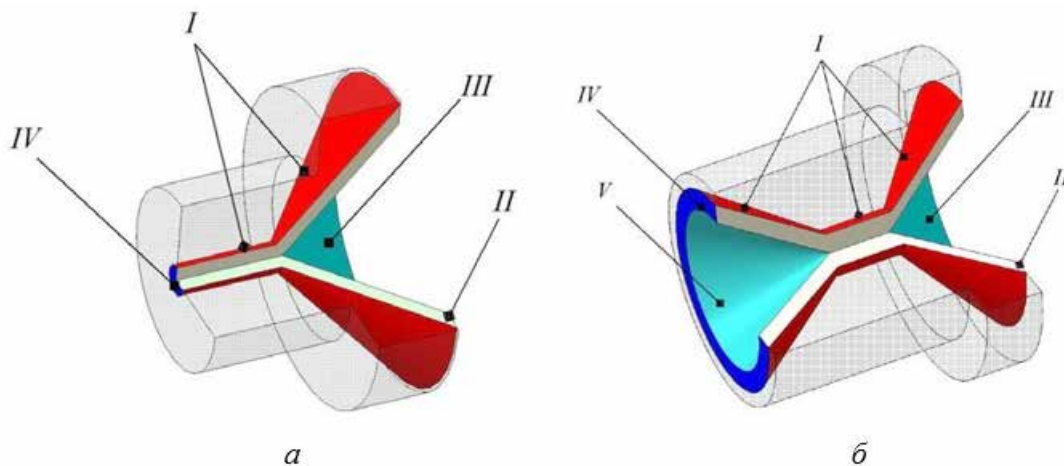


Рис. 2. Граничні умови формувального вузла:
a – циліндричної форми; ***б*** – кільцевої форми

Чисельний метод розв'язання. У програмі Flow Vision використано метод скінченних об'ємів для розв'язання рівнянь конвективно-дифузійного перенесення:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla(V_f) = \nabla(D\nabla f) + Q \quad (5)$$

де f – розрахункова змінна;

V – швидкість;

D – коефіцієнт дифузії;

Q – джерельний член.

Інтегрування цього рівняння за об'ємом комірки та інтервалом часу дає дискретизовану форму:

$$V_i(f_i^{n+1} - f_i^n) + \sum_j F_{ij}S_{ij} + \sum_j G_{ij}g_{ij} + Q_i = 0 \quad (6)$$

Для підвищення точності при складній геометрії каналу застосовано адаптацію сітки за граничними умовами. Прямокутна декартова сітка з локальним подрібненням забезпечила деталізацію потоку в зоні зазору між шнеком і стінкою каналу.

Схеми розташування середніх величин у комірках і апроксимації конвективного перенесення подано на рис. 3.

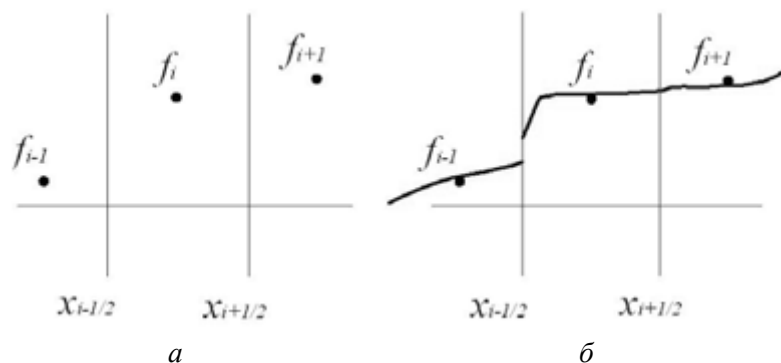


Рис. 3. Схеми апроксимації рівняння конвективного перенесення та розташування середніх величин у комірках

Результати моделювання. За результатами розрахунків побудовано графіки зміни тиску та швидкості розплаву по довжині формувального каналу для двох типів матриць. У каналах циліндричної та кільцевої форми виділено дві зони: I – зона гвинтового руху розплаву; II – зона поступального руху.

Для циліндричної матриці в першій зоні спостерігається плавне зниження тиску на 10–15 % від початкового значення та одночасне зменшення модуля швидкості. Це пояснюється зменшенням впливу обертового конуса шнека, а також прилипанням пристінкових шарів розплаву до стінок каналу. У другій зоні тиск продовжує спадати, а швидкість після короткої стабілізації знову зменшується.

Для кільцевої матриці в першій зоні зниження тиску є незначним, а модуль швидкості зменшується приблизно на 25 %. У другій зоні відбувається істотніше зниження тиску, проте швидкість зростає через перехід від обертально-поступального руху до більш вирівняного поступального переміщення, без додаткових локальних опорів (рис. 4, 5).

Перевірка адекватності моделі. На основі результатів моделювання були сконструйовані формувальні головки екструдера та проведено серію експериментів. Порівняння розрахункових і експериментальних даних показало, що відхилення швидкості в каналах складної форми становить 10–13 % залежно від типу матриці, а відхилення тиску – 18–25 %. Такі

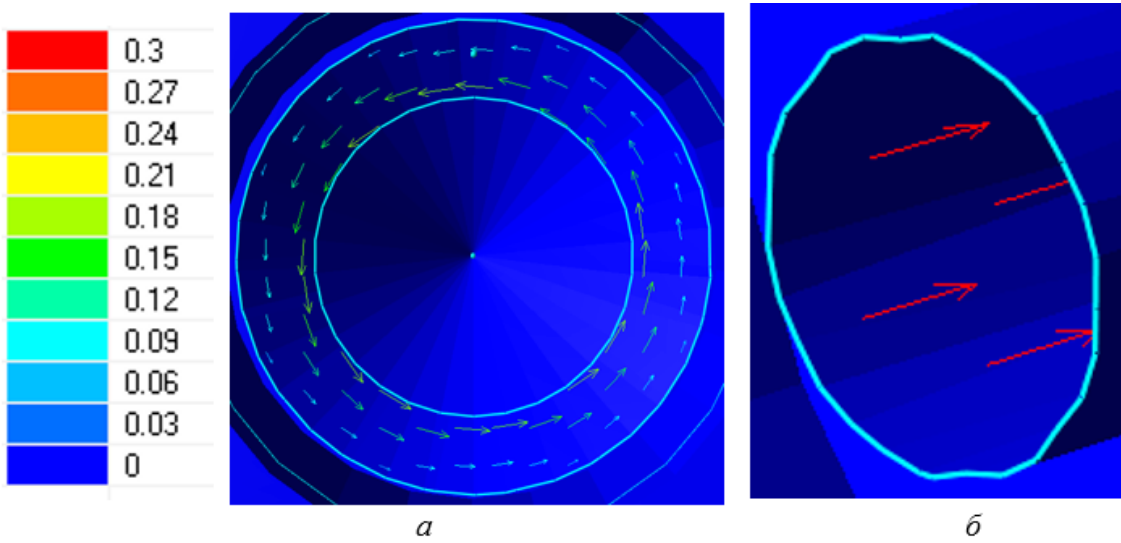


Рис. 4. Переріз матриці на відстані від входу:
 a – 9 мм (I зона); b – 20 мм (II зона)

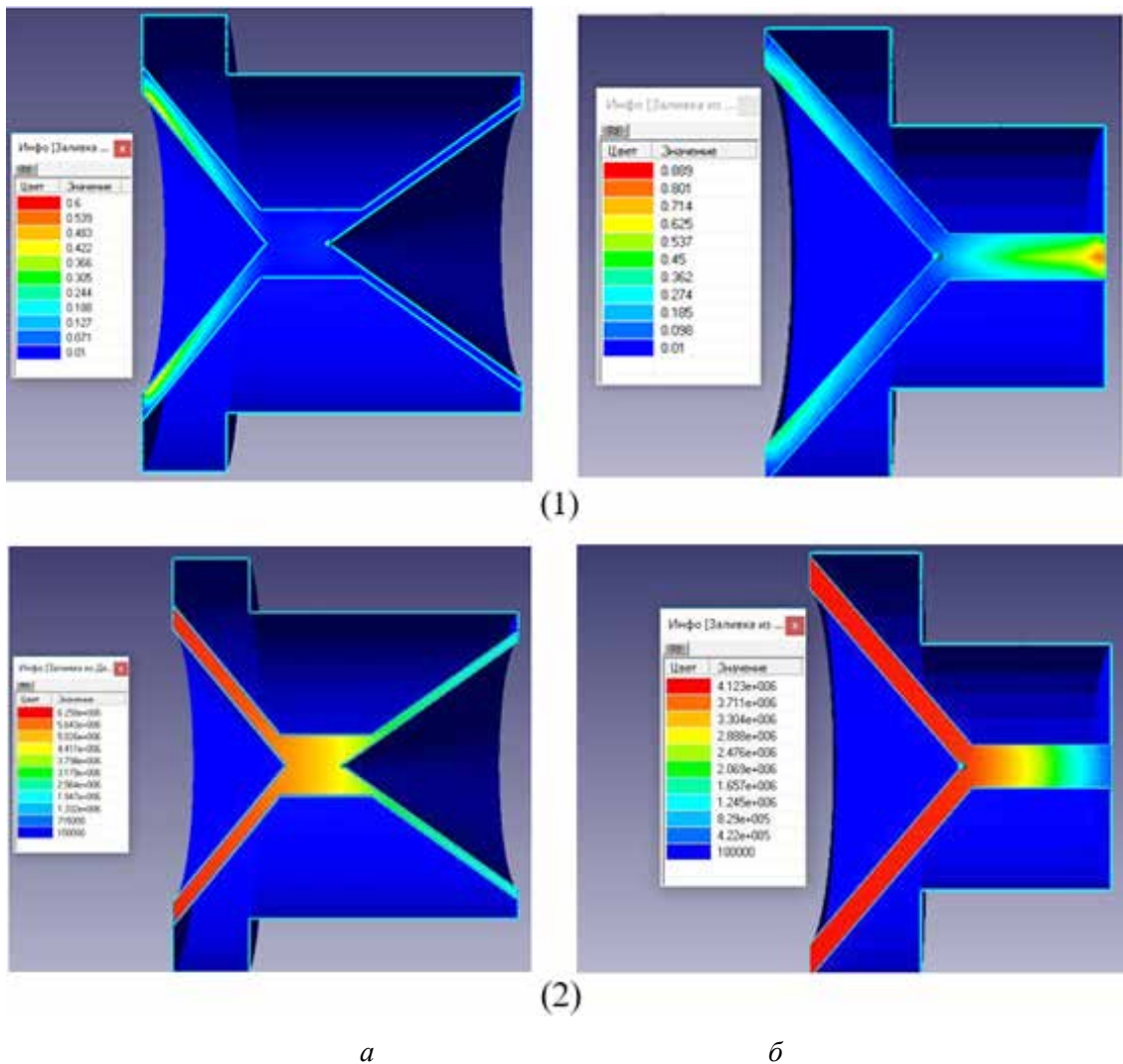


Рис. 5. Візуалізація зміни швидкості (1) і тиску (2) по довжині каналу матриці:
 a – циліндричної форми; b – кільцевої форми



результати можна вважати прийнятними для досліджуваного технологічного процесу та використаної моделі.

Висновки. У статті виконано математичне моделювання течії розплаву біополімеру в формувальних каналах екструдера циліндричної та кільцевої форми. Встановлено, що геометрія каналу істотно впливає на розподіл тиску та швидкості розплаву, а отже – на умови формування екструдату. Застосування рівнянь Нав'є–Стокса, рівняння нерозривності та методу скінченних об'ємів дозволило одержати наочну картину зміни фізичних параметрів у робочій зоні матриці. Виявлено, що кільцева форма формувального каналу забезпечує більш рівномірний рух розплаву, тоді як у циліндричному каналі сильніше проявляються локальні гідродинамічні опори. Порівняння результатів моделювання з експериментальними даними підтвердило задовільну адекватність побудованої моделі. Це дає підстави рекомендувати її для інженерного аналізу, проектування та вдосконалення формувальних вузлів екструдерів у технологіях переробки біополімерних і кормових сумішей.

Список використаних джерел

1. Tadmor Z., Gogos C. G. Principles of Polymer Processing. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006.
2. Rauwendaal C. Polymer Extrusion. 5th ed. Munich : Hanser Publishers, 2014.
3. Marschik C., Roland W., Miethlinger J. Melt Conveying in Single-Screw Extruders: Modeling and Experiments. *Polymers*. 2022. Vol. 14, No. 5. Article 875. DOI: 10.3390/polym14050875.
4. Ghoreishy M.H.R. Finite element analysis of a thermoplastic elastomer melt flow in a single screw extruder. *Materials Processing Technology*. 2005.
5. Кнауп F., Wortberg J. Improvement in an Analytical Approach for Modeling the Melting Behavior in Single-Screw Extrusion. *Polymers*. 2024. Vol. 16, No. 22. Article 3130. DOI: 10.3390/polym16223130.
6. Radwan M. et al. Understanding the Dynamics of Polymer Extrusion through Three-Dimensional Numerical Flow Simulation. *Heliyon*, 2024.
7. Журавель Д.П., Дідур В.В. Обґрунтування технологічної схеми детоксикації рицинової макухи для потреб кормовиробництва. *Збірник тез доповідей XIII-ї Науково-технічної конференції «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві»*, смт. Глеваха Київської області. м. Київ, Україна, (01–17 жовтня 2025 року) : матеріали конференції. Глеваха–Київ, 2025. С. 76–80.
8. Журавель Д.П., Дідур В.В. Обґрунтування технологічного процесу збирання рицини. *Збірник тез доповідей XXVI Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки»* (17–18 жовтня 2025 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2025. 717 с. С. 147–150.
9. Дідур В.В., Журавель Д. П., Повар І.Ю, Петриченко Є.А. Теоретичні основи розрахунку конструкційно-технологічних параметрів конічної центрифуги для очищення рослинних олій. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання / ТДАТУ*; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. Запоріжжя : ТДАТУ, 2025. Вип. 25, т. 3. С. 118–124. DOI: <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-3-16>.
10. Журавель Д.П. Технології переробки насіння рицини дворазовим пресуванням. *Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі»*. Запоріжжя, 2022. С. 32–34.
11. Дідур В.В., Журавель Д. П., Повар І.Ю, Петриченко Є.А. Наукові основи очищення рослинних олій у конічних центрифугах. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання / ТДАТУ*; гол. ред. д.т.н., проф. В.М. Кюрчев. Запоріжжя : ТДАТУ, 2025. Вип. 25, т. 3. С. 125–130. DOI: <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-3-17>.
12. Журавель Д.П., Дідур В.В., Шевчук М.В. Обґрунтування триботехнічних властивостей біологічних олив для гідросистем сільськогосподарської техніки. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання / ТДАТУ*; гол. ред. д.т.н., проф. В.М. Кюрчев. Запоріжжя : ТДАТУ, 2025. Вип. 15, т. 2. С. 45–53. DOI: <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-6>.
13. 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>.



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

15. Дідур В.В., Журавель Д.П. Аналіз технологічного процесу механізованого збирання рицини в умовах Південного Лісостепу України. *Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції. «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі»* (01–25 листопада 2025 року). Запоріжжя, 2025. С. 56–61.

16. Журавель Д.П., Дідур В.В. Механіко-технологічні основи глибокої переробки насіння рицини на енергетичну біосировину: монографія. Запоріжжя : ТДАТУ, 2025. 275 с., іл.

17. Дідур В.В., Журавель Д.П. Аналіз технологій отримання олії з олійних культур. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання*. Мелітополь : ТДАТУ, 2022. Вип. 12, том 3. 10 с. DOI: 10.31388/2220-8674-2022-3-18.

18. Журавель Д.П. Обґрунтування методу очищення біологічних олій в електричному полі. *Збірник тез доповідей XIII-ї Науково-технічної конференції «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві»*, смт Глеваха Київської області – м. Київ, Україна, (01–18 жовтня 2024 року) : матеріали конференції. Глеваха–Київ, 2024. С. 68–72.

19. Журавель Д.П., Дідур В.В. Моделювання процесу очищення рицинової олії в електричному полі. *Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі»* (01–25 листопада 2024 року). Запоріжжя, 2024. С. 98–104.

Дата першого надходження статті до видання: 08.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 25.05.2026

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



S. Lyashenko¹, M. Barda²

¹*Poltava State Agrarian University*

²*Uman National University*

THEORETICAL BASIS OF MODELING VISCOUS LIQUID MOTION

Summary

The article summarizes the theoretical foundations of modeling the motion of a viscous fluid in channels of complex geometry. It is substantiated that mathematical modeling is an effective tool for studying flow processes that are difficult to describe by analytical methods only. The paper considers the main stages of model construction, including the choice of physical assumptions, the formulation of governing equations, and the specification of boundary and initial conditions. Special attention is paid to the Navier–Stokes equations, the continuity equation, and the convection–diffusion equation as the basic relationships for describing viscous flow. It is shown that for channels of complex shape, the finite volume method is one of the most effective numerical approaches, as it makes it possible to obtain pressure and velocity distributions within the computational domain. The presented theoretical provisions can be used in the analysis, design, and improvement of technological equipment in which viscous fluid motion plays an important role. Modeling viscous fluid motion is an important area of modern hydrodynamics, which allows us to describe and predict the behavior of fluids in natural and technical systems. The theoretical foundations of this process are based on the laws of conservation of mass, momentum, and energy, which are mathematically formalized in the form of equations of motion, in particular the Navier–Stokes equations. Taking into account the viscosity of the fluid makes it possible to describe the internal friction between the flow layers, which significantly affects the nature of the motion, including laminar and turbulent regimes. The paper considers key approaches to building mathematical models, methods for simplifying equations, boundary and initial conditions, as well as numerical methods for solving them. Special attention is paid to the analysis of parameters that determine the flow regime, in particular the Reynolds number, and their influence on the flow structure. The obtained theoretical provisions are the basis for creating effective models used in engineering, ecology, and industry to solve practical problems related to fluid transportation, heat transfer, and optimization of technological processes.

Keywords: extruder, viscous fluid motion, molding channel, die, pressure distribution, mathematical modeling.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-2-15>

УДК 621.225.001.4

А. І. Панченко¹, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-1230-1463

А. А. Волошина¹, д-р. техн. наук

ORCID: 0000-0003-4052-2674

О. С. Ковязін¹, канд. техн. наук

ORCID:0000-0002-3027-872X

І. А. Панченко¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-2150-4278

А. А. Волошин², викл. спецдисциплін

ORCID: 0009-0004-3850-7613

¹Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного²Відокремлений структурний підрозділ «Мелітопольський фаховий коледж ТДАТУ»

e-mail: voloshinaa2012@gmail.com

ПРОГНОЗУВАННЯ ЗМІНИ ВИХІДНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАНЕТАРНОГО ГІДРОМОТОРА В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Анотація. У роботі досліджено зміну вихідних характеристик планетарного гідромотора в процесі експлуатації з урахуванням його технічного стану. Встановлено, що ключовим фактором деградації параметрів є збільшення діаметрального зазору між роторами, яке впливає на частоту обертання, витрату робочої рідини та енергетичні показники. На основі повного факторного експерименту обґрунтовано вибір визначальних факторів (навантаження, витрата, зазор) та отримано математичні моделі у вигляді рівнянь регресії, що адекватно описують робочі процеси з довірчою ймовірністю 0,95. Встановлено, що коефіцієнт корисної дії є малочутливим до зміни технічного стану, тоді як частота обертання є найбільш інформативним діагностичним параметром. Отримані залежності дозволяють визначати технічний стан гідромотора за експлуатаційними параметрами без розбирання. Результати дослідження можуть бути використані для підвищення надійності гідроприводів та вдосконалення методів діагностики самохідної техніки.

Ключові слова: крутний момент, витрата робочої рідини, діаметральний зазор, частота обертання, повнофакторний експеримент.

Постановка проблеми. Ефективність функціонування сучасної самохідної техніки безпосередньо визначається надійністю та стабільністю роботи її мехатронних систем, зокрема гідравлічних приводів активних робочих органів та їх елементів [1, 2]. Особливе місце серед елементів гідроприводів займають планетарні (орбітальні) гідромотори, які забезпечують високі питомі енергетичні показники та компактність конструкції [3, 4]. Водночас у процесі експлуатації їх вихідні характеристики зазнають суттєвих змін, обумовлених як режимними параметрами роботи (навантаження, витрата робочої рідини), так і деградацією конструктивних елементів.

Ключовим фактором, що визначає технічний стан планетарного гідромотора, є збільшення діаметрального зазору в циклоїдальному зачепленні роторів, спричинене зносом [4, 5]. Зростання цього зазору призводить до зміни внутрішніх витоків, порушення герметичності робочих камер та, як наслідок, до погіршення енергетичних і кінематичних параметрів гідромотора. Однак існуючі підходи до оцінювання технічного стану гідромашин переважно базуються на непрямих показниках (ККД, тиск, витрата), які не завжди чутливо реагують на початкові стадії зносу.

Аналіз сучасних досліджень свідчить [6], що значна увага приділяється питанням проектування, моделювання та підвищення ефективності героторних насосів, тоді як задачі прогнозування зміни вихідних характеристик саме планетарних гідромоторів у процесі їх експлуатації залишаються недостатньо дослідженими. Особливо це стосується встановлення кількісних залежностей між технічним станом (зазором), режимами роботи та функціональними параметрами, які можуть бути використані для діагностики та прогнозування працездатності.



Таким чином, виникає науково-прикладна проблема, що полягає у відсутності адекватних математичних моделей та експериментально підтверджених залежностей, які дозволяють достовірно оцінювати та прогнозувати зміну вихідних характеристик планетарного гідромотора з урахуванням його технічного стану та умов експлуатації. Розв'язання цієї проблеми є важливим для підвищення надійності гідроприводів, зниження експлуатаційних витрат, а також створення ефективних систем діагностики та технічного обслуговування самохідної техніки.

Аналіз останніх досліджень. Сучасні дослідження у сфері гідравлічних машин характеризуються значною увагою до підвищення їх енергоефективності, надійності та довговічності. Зокрема, у роботах [7–9] досліджуються динамічні процеси в насосно-турбінних агрегатах, включаючи вплив резонансних явищ на надійність конструкцій [8]. Використання чисельних методів і теорії коливань дозволяє отримати достовірні результати для реверсивних насосів-турбін [9]. Водночас ці підходи мають обмежену релевантність для об'ємних гідромашин [10, 11], де домінують інші фізичні процеси (витоки, локальні гідродинамічні ефекти, контактні взаємодії), що знижує можливість їх прямої екстраполяції на планетарні гідромотори.

У дослідженні [12] розглянуто вплив експлуатаційних факторів (газовміст робочої рідини, навантаження) на характеристики аксіально-поршневих гідромоторів. Незважаючи на підтверджену адекватність математичних моделей, їх обмеження полягає у відсутності урахування зносу робочих елементів, що є ключовим чинником зміни параметрів у довгостроковій перспективі. Аналогічно, підхід [13], який базується на інтегральному критерії оцінювання технічного рівня, є ефективним на етапі проектування, але не забезпечує діагностичної чутливості до змін технічного стану в експлуатації.

Найбільш розвиненим напрямом є дослідження героторних машин [14]. Розроблено геометрію профілю ротора, що дозволяє забезпечити зачеплення однієї пари зубів у кожний момент часу, та уникнути зносу [14], обґрунтовано оптимальні параметри для повного визначення геометрії профілю роторів [15], визначено вплив конструктивних особливостей системи роторів [16] та похибки форми виготовлення зубчастого профілю роторів [17] на стабільність вихідних характеристик планетарного гідромотора. Наведено аналіз сил і моментів, що виникають між роторами героторного насоса [18], для чого розроблені фізична та аналітична моделі [19]. Запропоновано теорію зубчастого зачеплення для розробки математичної моделі внутрішніх роторів з різницею в один зуб [20], що дозволяє забезпечити високий ККД [21]. Розроблено модель, що описує зміни геометрії зубчастих профілів роторів [22], а також модель, що враховує динамічну зміну об'єму робочої рідини в робочих камерах [23] та зміну навантажень у зубчастому зачепленні [24]. Запропоновано програмне забезпечення для проектування гіпоциклоїдальних поверхонь роторів з урахуванням гідродинаміки руху рідини у робочих камерах [25] та програма для моделювання процесу взаємодії роторів, що забезпечують працездатність планетарного гідромотора [26]. Досліджено вплив конструктивних особливостей героторного насоса на його вихідні характеристики [27]. Проте, попри значну глибину цих досліджень, їх фундаментальне обмеження полягає у фокусі на стаціонарних або квазістаціонарних режимах та ігноруванні еволюції параметрів у процесі зносу. Більше того, більшість моделей є детермінованими та не інтегрують експлуатаційні варіації параметрів, що істотно обмежує їх прикладну цінність для задач діагностики.

Проведені дослідження робочих процесів, що відбуваються у розподільних системах з урахуванням їх конструктивних особливостей [28] розширюють розуміння їх протікання, зокрема щодо пульсацій тиску [29], витоків і контактних явищ. Запропоновано способи зниження пульсації робочої рідини [30], а також досліджено вплив зміни пропускної здатності систем розподілу робочої рідини на зміну вихідних параметрів гідромашин планетарного типу. Обґрунто-



вано раціональні зазори між розподільними вікнами, розроблено структурно-функціональну схему математичної моделі, що дозволяє моделювати раціональне зусилля в контактній зоні системи розподілу робочої рідини [31]. Обґрунтовано раціональні конструктивні параметри рухомого та нерухомого розподільників [32], що дозволяють знизити витoki в контактній зоні системи розподілу рідини і, як наслідок, підвищити продуктивність гідромашин планетарного типу. Запропоновані конструктивні рішення дозволяють підвищити ефективність машин, однак залишаються в межах проєктного підходу і не враховують зміну параметрів у процесі експлуатації.

Розглянуто питання моделювання внутрішніх витоків [33] з урахуванням зазорів між шестернями. Досліджено вплив зазору між зубами та деформації зубів шестеренного насоса на зміну тиску [34], що дозволило прогнозувати працездатність шестеренного насоса. Відомо [35], що працездатність шестеренних гідромашин більшою мірою визначається точністю виготовлення зубчастого профілю роторів, для чого були розроблені засоби автоматизованого контролю роторів. Проведено динамічний аналіз для прогнозування фактичної роботи героторного насоса [36]. Розроблено математичну модель у вигляді рівнянь регресії для прогнозування найбільших значень витрати та об'ємного ККД з урахуванням підбору оптимальних параметрів героторного насоса [37]. Отримані моделі дозволяють прогнозувати ефективність насосів, але їх перенесення на гідромотори є некоректним через відмінності в енергетичних перетвореннях і режимах роботи. Крім того, ці дослідження не враховують взаємодію експлуатаційних факторів і технічного стану.

Роботи [38, 39] є одними з небагатьох, де експериментально підтверджено вплив діаметрального зазору на вихідні характеристики планетарного гідромотора. Встановлено, що збільшення зазору призводить до зниження частоти обертання та стабільності роботи. Проте ці дослідження мають фрагментарний характер і не формують узагальненої математичної моделі, придатної для прогнозування технічного стану в широкому діапазоні експлуатаційних режимів.

Таким чином, проведений аналіз літературних джерел вказує на відсутність інтегрованих моделей, що одночасно враховують експлуатаційні фактори (навантаження, витрата, тиск) та погіршення вихідних характеристик; домінування досліджень, орієнтованих на проєктування, при недостатній увазі до режимів експлуатації; відсутність універсального діагностичного параметра, чутливого до зміни технічного стану планетарних гідромоторів; обмежену кількість експериментально підтверджених моделей для прогнозування вихідних характеристик; відсутність підходів, що поєднують факторний експеримент і математичне моделювання для прогнозування вихідних характеристик планетарних гідромашин.

Тому вирішення питань, пов'язаних з визначенням (прогнозуванням) вихідних характеристик планетарного гідромотора в процесі експлуатації при зміні його технічного стану, навантаження на валу гідромотора та кількості робочої рідини, що подається насосною станцією, є актуальним завданням.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Технічний стан планетарного гідромотора у процесі експлуатації визначається зміною величини діаметрального зазору між роторами [4, 5]. Тому для визначення (прогнозування) зміни вихідних характеристик планетарного гідромотора в умовах експлуатації необхідно вирішити такі завдання:

- обґрунтувати основні фактори, що визначають зміни вихідних характеристик планетарного гідромотора в умовах експлуатації та визначити їх рівні варіювання;
- провести планування експериментальних досліджень для отримання рівнянь регресії, що описують зміни вихідних характеристик планетарного гідромотора в заданому діапазоні зміни навантаження, витрати робочої рідини та діаметрального зазору;



– дослідити вплив навантаження, витрати робочої рідини та діаметрального зазору на зміну вихідних характеристик планетарного гідромотора.

Основна частина. Аналіз кінематики переміщення роторів планетарного гідромотора показав [4, 5], що основним параметром, що визначає технічний стан планетарного гідромотора, є діаметральний зазор між його роторами. Встановлено, що при визначенні технічного стану планетарного гідромотора, що має ротора з циклоїдальним зачепленням, «найчутливішим» параметром (з числа функціональних) є частота обертання його вихідного валу [4, 5]. Тому для того, щоб визначити (прогнозувати) технічний стан планетарного гідромотора в експлуатаційних умовах необхідно знати залежність зміни його вихідних характеристик в умовах експлуатації.

При дослідженні зміни вихідних характеристик планетарного гідромотора у процесі експлуатації залежно від його технічного стану, зміни навантаження та кількості робочої рідини використано математичне планування повного факторного експерименту [40].

При проведенню дослідженні як функції відгуків y_i (вихідні параметри) вибиралися наступні параметри:

- частота обертання n валу гідромотора (y_1);
- перепад тисків Δp робочої рідини (y_2);
- об'ємний ККД $\eta_{об}$ гідромотор (y_3);
- механічний ККД η_m гідромотора (y_4);
- загальний ККД η гідромотора (y_5).

Основними факторами, що змінюються x_i (вхідні параметри), що визначають технічний стан планетарного гідромотора, є:

- крутний момент $M_{кр}$ на валу гідромотора (x_1);
- дійсна витрата Q робочої рідини (x_2);
- діаметральний зазор G циклоїдального зачеплення (x_3).

Контрольованими незмінними факторами z_i , що визначають технічний стан планетарного гідромотора прийняті:

- температура T робочої рідини (z_1);
- кінематична в'язкість ν робочої рідини (z_2);
- тонкість фільтрації Φ робочої рідини (z_3).

Вибрані фактори та рівні варіювання зведені в табл. 1.

Таблиця 1

Інтервали та рівні варіювання факторів

Найменування фактору	Позначення	Код. знач. фактору	Од. вимір.	Інтерв. варіювання	Рівні факторів		
					нижн.	осн.	верхн.
Крутний момент	$M_{кр}$	x_1	Н·м	580	280	860	1440
Витрата робочої рідини	Q	x_2	л/хв	20	70	90	110
Діаметральний зазор	G	x_3	мм	0,09	0,02	0,11	0,20
Температура	T	z_1	°С	–	50±4		–
Кінематична в'язкість	ν	z_2	м ² /с	–	65·10 ⁻⁶		–
Тонкість фільтрації	Φ	z_3	мкм	–	не більше 63		–

Результати експериментальних досліджень впливу навантаження, витрати робочої рідини та діаметрального зазору на технічний стан планетарного гідромотора при реалізації факторного експерименту наведено у таблицях 2...4.



Таблиця 2

Вихідні дані визначення коефіцієнтів регресії

№ дослідю	Середнє значення функції відгуку				
	n, y_1	$\Delta p, y_2$	$\eta_{об}, y_3$	$\eta_{м}, y_4$	η, y_5
1	100,4	2,4	0,985	0,845	0,832
2	30,5	10,8	0,870	0,938	0,807
3	17,5	3,1	0,890	0,655	0,648
4	161	10,7	0,943	0,932	0,862
5	96	2,3	0,975	0,870	0,848
6	32	10,7	0,877	0,935	0,819
7	164	2,9	0,938	0,690	0,648
8	150	10,4	0,883	0,962	0,849

Із серії дослідів (табл. 4) дисперсія відтворюваності дорівнює:

$$S^2_{(y1)} = 3,956; S^2_{(y2)} = 2,678 \cdot 10^{-2}; S^2_{(y3-5)} = 3,1671 \cdot 10^{-4}.$$

Найменше значення значущого коефіцієнта регресії дорівнює (значення критерію Стьюдента $t = 2,26$ при числі ступенів свободи $f = 9$ [28]):

$$|b_{i(y1)}| = 1,58925; |b_{i(y2)}| = 0,1308; |b_{i(y3-5)}| = 1,421985 \cdot 10^{-2}.$$

Таблиця 3

Коефіцієнти рівнянь регресії

Коефіцієнти регресії	Функції відгуку				
	n, y_1	$\Delta p, y_2$	$\eta_{об}, y_3$	$\eta_{м}, y_4$	η, y_5
b_0	113,625	67	0,92025	0,84575	0,784
b_1	-20,25	40,25	-0,027	0,0875	0,04
b_2	48,875	1,5	-0,0065	-0,05125	-0,0425
b_3	-3,125	-1,25	-0,00175	0,0185	0,007
b_{12}	13,25	-1,75	0,02625	0,04125	0,0535
b_{13}	0,75	-0,5	-0,0115	0,0035	0,003
b_{23}	-2,375	-0,75	-0,001	0,013	0
b_{123}	0,75	-0,5	-0,01575	0,0105	0,004

Таблиця 4

Вихідні дані до визначення дисперсії відтворюваності

$n, об/хв$	$\Delta p, МПа$	η
153	15,3	0,938
154	15,5	0,925
151	15,3	0,972
154	15,7	0,945
154	15,6	0,945
155	15,5	0,964
156	15,7	0,977
157	15,5	0,97
157	15,3	0,97
157	15,3	0,97

Використання факторного експерименту при дослідженні впливу навантаження, витрати робочої рідини та діаметрального зазору на технічний стан планетарного гідромотора дозволяє суттєво скоротити кількість дослідів та отримати (з заданою ймовірністю) математичну



модель, що визначає технічний стан (діаметральний зазор) гідромотора при різних значеннях функціональних параметрів $G = f(Q, \Delta p, n)$.

Використання повного факторного експерименту щодо впливу навантаження $M_{кр}$, витрати робочої рідини Q і діаметрального зазору G зміну вихідних характеристик планетарного гідромотора дозволяє істотно скоротити кількість дослідів [3]. При цьому отримана математичну модель, виражена рівняннями регресії, дозволяє з ймовірністю 0,95 визначити вплив навантаження M , витрати робочої рідини Q і діаметрального зазору G на зміну вихідних характеристик планетарного гідромотора:

$$y_1(n) = 113,625 - 20,25 \cdot x_1 + 48,875 \cdot x_2 - 3,125 \cdot x_3 + 13,25 \cdot x_1 \cdot x_2 - 2,375 \cdot x_2 \cdot x_3; \quad (1)$$

$$y_2(\Delta p) = 67 + 40,25 \cdot x_1 + 1,5 \cdot x_2 - 1,75 \cdot x_1 \cdot x_2; \quad (2)$$

$$y_3(\eta_{об}) = 0,92025 - 0,027 \cdot x_1 + 0,02625 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,01575 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3; \quad (3)$$

$$y_4(\eta_m) = 0,84575 + 0,0875 \cdot x_1 - 0,052125 \cdot x_2 + 0,0185 \cdot x_3 + 0,04125 \cdot x_1 \cdot x_2; \quad (4)$$

$$y_5(\eta) = 0,784 + 0,04 \cdot x_1 - 0,0425 \cdot x_2 + 0,0535 \cdot x_1 \cdot x_2. \quad (5)$$

Для всіх розрахункових та теоретичних значень критеріїв Фішера виконується умова $F_p < F_T$. Таким чином, отримані рівняння регресії (1...5) адекватно описують досліджуваний процес.

Аналіз рівнянь (2, 4, 5) підтверджує, що зміна діаметрального зазору G в діапазоні $G = 0,02...0,16 \text{ mm}$ не впливає на зміну перепаду тисків Δp , гідромеханічного η_{mech} і загального η ККД планетарного гідромотора.

Аналіз рівняння (1) зміни частоти обертання в залежності від діаметрального зазору свідчить про те, що при відомих значеннях навантаження, витрати робочої рідини та частоти обертання можна визначити значення діаметрального зазору (а отже, і технічний стан гідромотора в цілому).

Для цього з рівняння (2), попередньо розкодувавши його, визначимо зміну крутного моменту $M_{кр} = f(\Delta p)$:

$$M_{кр} = \frac{40 \cdot \Delta p - 2410 - 3 \cdot Q}{48,125 - 0,0875 \cdot Q} + 60, \quad (6)$$

де Δp – перепад тиску робочої рідини, $8 \leq \Delta p \leq 16 \text{ МПа}$;

Q – витрата робочої рідини, $70 \leq Q \leq 110 \text{ л/хв}$.

Розкодувавши рівняння (5.10) і підставивши в нього рівняння (5.15), визначимо зміну діаметрального зазору $G = f(\Delta p, Q, n)$:

$$G = \frac{21,267372 + 3,36875 \cdot n - 5,59125 \cdot \Delta p + K \cdot Q}{363,94508 \cdot (6,37656 - 0,0103906 \cdot Q) \cdot Q} + 0,09, \quad (7)$$

де n – частота обертання валу гідромотора, $30 \leq n \leq 175 \text{ об/хв}$;

$K = 6,5087947 + 0,006125 \cdot n + 0,046375 \cdot \Delta p - 0,018446 \cdot Q$.

Отримані вирази (6) і (7), при відомих значеннях частоти обертання валу гідромотора, перепаду тиску та витрати робочої рідини, дозволяють визначити технічний стан планетарного гідромотора в умовах експлуатації в заданому діапазоні варіювання перерахованих параметрів.



Таким чином, можна зробити висновок, що отримані математичні моделі (1...5) адекватно описують досліджуваний процес зміни технічного стану планетарного гідромотора в залежності від навантаження, витрати робочої рідини і діаметрального зазору, а також підтверджують нераціональність ККД як параметра, що характеризує технічний стан планетарного гідромотора, а у той же час обґрунтовують діаметральний зазор, як єдиний достовірний діагностичний параметр.

Для визначення (прогнозування) зміни вихідних характеристик планетарного гідромотора у процесі експлуатації залежно від його технічного стану, зміни навантаження та кількості робочої рідини було проведено експериментальні дослідження. Дослідження проводилися згідно з ДСТУ ISO 4409:2013: Об'ємні гідроприводи. Насоси об'ємні, гідромотори та гідро-передачі. Методи випробування та подання основних сталих робочих характеристик. Метою даних досліджень було експериментальне визначення взаємозв'язків між навантаженням $M_{кр}$, витратою робочої рідини Q та діаметральним зазором G між роторами планетарного гідромотора, описаних отриманими рівняннями регресії (1–7). Дослідження проводилися на прикладі планетарного гідромотора PRG-22 з робочим об'ємом $V = 630 \text{ см}^3$, у заданому (умовами експлуатації) діапазоні варіювання навантаження $M_{кр}$, витрати робочої рідини Q та діаметрального зазору G між його роторами.

При проведенні експериментальних досліджень варіювання навантаження проводилося шляхом зміни значень крутного моменту $M_{кр}$ який мав дев'ять дискретних значень $M_{кр} = 140, 280, 420, 560, 700, 840, 980, 1120, 1440 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Зміна витрати робочої рідини Q здійснювалася шляхом дроселювання подачі насоса (з паралельним включенням дроселя) і мали три дискретні значення $Q = 110, 90$ і 70 л/хв . Діаметральний зазор G , як параметр, що визначає технічний стан гідромотора, обмежувався чотирма значеннями $G = 0,02, 0,09, 0,16$ і $0,23 \text{ мм}$ та забезпечувався шляхом заміни внутрішнього ротора.

Аналіз результатів проведених досліджень (рис. 1) підтверджує висновки, отримані в розділах 2 і 3 та показує, що за наявності діаметрального зазору, внутрішній ротор «спливаючи» забезпечує самогерметизацію нагнітальної та зливальної зон.

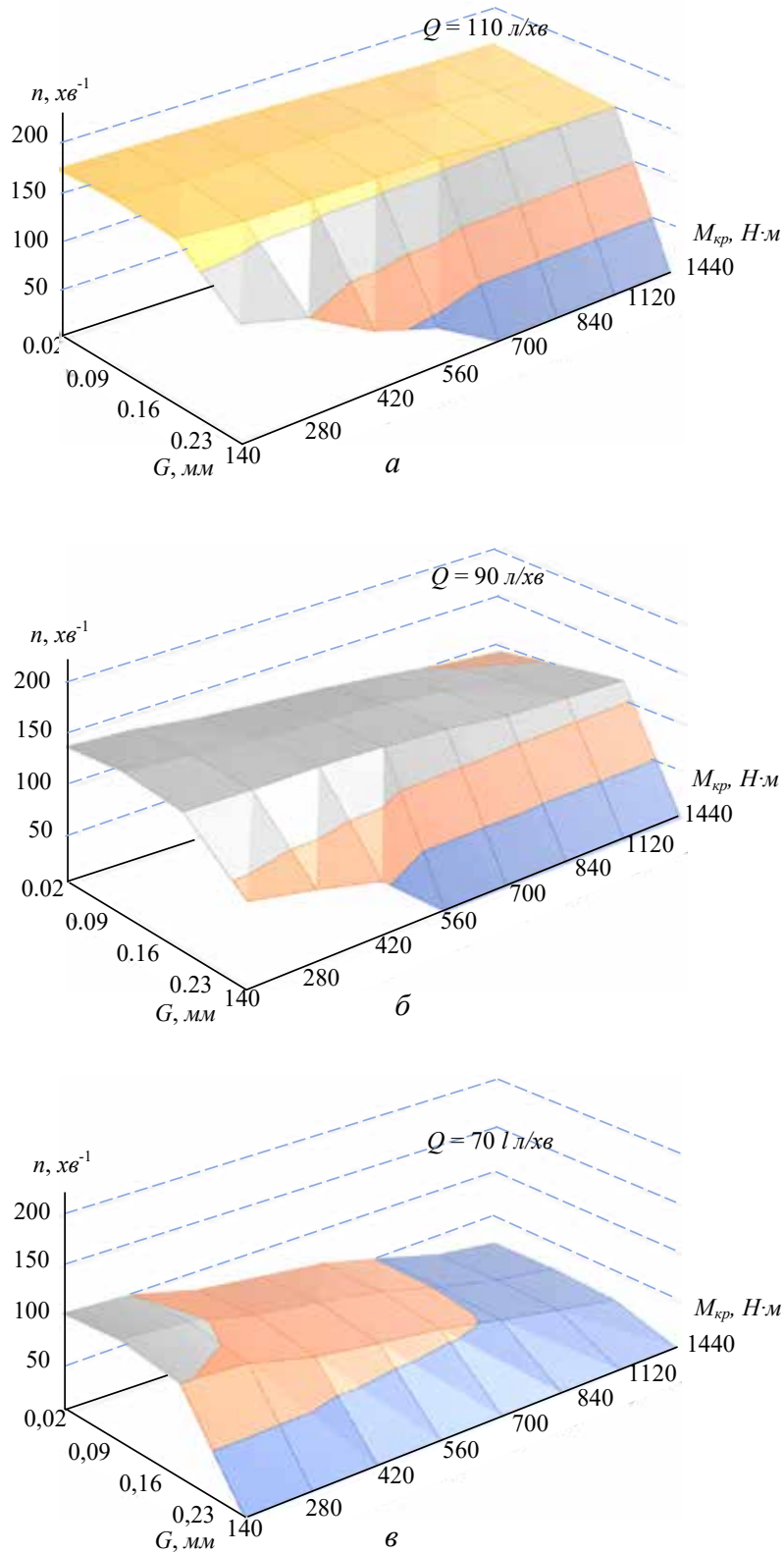
Технічний стан досліджуваного планетарного гідромотора з робочим об'ємом $V = 630 \text{ см}^3$ визначається величиною діаметрального зазору, а його працездатність обмежена значеннями $G = 0.02...0.16 \text{ мм}$ (рис. 1). У всьому діапазоні зміни крутного моменту $140 \leq M_{кр} \leq 1440 \text{ Н}\cdot\text{м}$, витрати робочої рідини $70 \leq Q \leq 110 \text{ л/хв}$ та діаметрального зазору $0,02 \leq G \leq 0,16 \text{ мм}$, робочий стан планетарного гідромотора представлено як відповідна «площадка».

При значеннях діаметрального зазору $G = 0.23 \text{ мм}$ та витраті Q робочої рідини 110 і 90 л/хв, зі збільшенням навантаження $M_{кр}$ від 560 до 700 Н·м, відповідно, відбувається різке падіння частоти обертання n валу гідромотора. Подальше збільшення навантаження призводить до повної зупинки (втрати працездатності) гідромотора (рис. 1, а, б). При витраті робочої рідини $Q = 70 \text{ л/хв}$ гідромотор повністю втратив працездатність (рис. 1, в).

Проведеними дослідженнями встановлено, що в процесі експлуатації (при зносі) механічний ККД і крутний момент планетарного гідромотора залишаються практично незмінними у всьому діапазоні зміни діаметрального зазору між роторами. Отже, і перепад тиску Δp робочої рідини, в діапазоні зміни крутного моменту буде незмінним, а в умовах експлуатації буде змінюватися, тільки зі зміною навантаження.

Таким чином, можна заключити, що знаючи закономірність зміни вихідних характеристик планетарного гідромотора при його експлуатації (зносі) залежно від зміни навантаження та витрати робочої рідини можна визначити його технічний стан.

Отримані в роботі результати дозволяють комплексно оцінити вплив експлуатаційних факторів (навантаження, витрати робочої рідини) та технічного стану (діаметрального зазору)



частота обертання: ■ – 0–50; ■ – 50–100; ■ – 100–150; ■ – 150–200

Рис. 1. Зміна частоти обертання валу гідромотора в залежності від навантаження, витрати робочої рідини та діаметрального зазору



на вихідні характеристики планетарного гідромотора. Побудовані регресійні моделі адекватно описують досліджувані процеси, що підтверджується виконанням критерію Фішера з довірчою ймовірністю 0,95. Це свідчить про статистичну надійність отриманих залежностей і можливість їх використання для інженерних розрахунків та діагностики.

Одним із ключових результатів є встановлення визначальної ролі діаметрального зазору як параметра, що характеризує технічний стан гідромотора. Встановлено, що збільшення діаметрального зазору призводить до інтенсифікації внутрішніх витоків робочої рідини між камерами високого та низького тиску, що зменшує ефективний об'ємний потік і, як наслідок, знижує частоту обертання валу гідромотора. Водночас ефект «спливання» ротора частково компенсує витoki в початковому діапазоні зносу ($G = 0,02 \dots 0,16$ мм), забезпечуючи самогерметизацію робочих камер. Саме цим пояснюється відносна стабільність коефіцієнтів корисної дії у зазначеному діапазоні.

Особливу увагу привертає встановлений факт низької чутливості коефіцієнта корисної дії до зміни технічного стану. Незважаючи на зростання зазору, значення ККД залишаються відносно стабільними в широкому діапазоні. Це суперечить традиційному уявленню про ККД як універсальний показник технічного стану і підтверджує його обмежену придатність для діагностики.

Аналіз залежностей показав, що частота обертання валу є найбільш інформативним параметром, оскільки вона відображає вплив усіх трьох факторів: навантаження, витрати та зазору. Зменшення витрати робочої рідини або збільшення навантаження призводить до зниження частоти обертання, однак саме зростання зазору визначає нелінійний характер цього процесу. При досягненні критичного значення $G \approx 0,23$ мм відбувається різке погіршення характеристик, що проявляється у втраті працездатності гідромотора. Така поведінка свідчить про наявність порогового ефекту, пов'язаного з порушенням умов самогерметизації роторів.

Порівняння отриманих результатів із дослідженнями у сфері героторних машин [6] показує, що, незважаючи на високий рівень опрацювання геометрії та кінематики, ці роботи не враховують зміну параметрів у процесі експлуатації. У даному дослідженні цей недолік усунуто шляхом інтеграції факторного експерименту та математичного моделювання, що дозволило отримати залежності, придатні для практичного використання.

Отримані результати мають важливе прикладне значення. Запропоновані залежності дозволяють визначати технічний стан гідромотора за вимірюваними параметрами без його демонтажу, що відкриває можливість створення систем оперативної діагностики та прогнозування ресурсу.

Водночас слід зазначити певні обмеження дослідження. Отримані моделі справедливі для заданого діапазону варіювання параметрів і конкретної конструкції гідромотора типу PRG–22, що потребує подальшої валідації для інших типорозмірів і умов експлуатації. Крім того, у роботі не враховано вплив температурних режимів, забруднення робочої рідини та динамічних навантажень, що може бути предметом подальших досліджень.

Таким чином, результати дослідження не лише узагальнюють існуючі уявлення про роботу планетарних гідромоторів, але й формують новий підхід до оцінювання їх технічного стану, заснований на аналізі взаємозв'язку експлуатаційних параметрів і конструктивних змін, викликаних зносом.

Висновки. Обґрунтовано вибір діаметрального зазору в циклоїдальному зачепленні як більш інформативного та достовірного діагностичного параметра для планетарних гідромоторів. Встановлено, що діаметральний зазор тісно пов'язаний з вихідними характеристиками гідромотора (частота обертання, крутний момент) та дозволяє більш точно оцінити його технічний стан. Доведено, що в діапазоні зміни навантаження ($M_{кр} = 280 \dots 1440$ Н·м), витрати робочої



рідини ($Q = 20 \dots 110$ л/хв) та діаметрального зазору ($G = 0,02 \dots 0,16$ мм) – ККД гідромотора залишається відносно стабільним ($\eta = 0,9 \dots 0,78$), не відображаючи фактичний ступінь зносу деталей циклоїдального зачеплення.

На основі повного факторного експерименту отримано математичні моделі у вигляді рівнянь регресії, які з довірчою ймовірністю 0,95 адекватно описують взаємозв'язок між експлуатаційними параметрами та вихідними характеристиками планетарного гідромотора. Встановлено, що коефіцієнти корисної дії (об'ємний, механічний і загальний) у діапазоні зміни діаметрального зазору 0,02...0,16 мм залишаються відносно стабільними і не відображають реального ступеня зносу, що обмежує їх застосування як діагностичних параметрів.

Дослідженнями доведено, що найбільш чутливим і інформативним параметром технічного стану є частота обертання валу гідромотора, яка відображає вплив навантаження, витрати робочої рідини та діаметрального зазору і може бути використана для оперативної діагностики. Виявлено критичні режими роботи, за яких при збільшенні діаметрального зазору до значень близько 0,23 мм відбувається різке погіршення характеристик і втрата працездатності гідромотора, що дозволяє визначити граничні стани його експлуатації.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розширенням отриманих моделей на інші типорозміри гідромоторів, урахуванням впливу температури, забруднення робочої рідини та динамічних режимів навантаження, а також інтеграцією отриманих залежностей у системи інтелектуальної діагностики.

Список використаних джерел

1. Bulgakov, V., Pascuzzi, S., Adamchuk, V., Kuvachov, V., Nozdrovicky, L. Theoretical study of transverse offsets of wide span tractor working implements and their influence on damage to row crops. *Agriculture (Switzerland)*, 2019. 9 (7). 144. <https://doi.org/10.3390/agriculture9070144>
2. Панченко А. І., Волошина А. А., Ковязін О.С., Панченко І.А., Волошин А. А. Зміна функціональних параметрів мехатронних систем з планетарними гідромоторами при різних умовах експлуатації. *Науковий вісник ТДАТУ*, 2025. Вип. 15. Т. 2. С. 127–135. <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-15>
3. 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. 744–754. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68014-5_72
4. Panchenko, A., Voloshina, A., Sadullozoda, S.S., Panchenko, I., Mitin, V. The Changes in the Output Parameters of Planetary Hydraulic Machines with the Increase in the Gap Between Their Rotors. *InterPartner 2022: Advanced Manufacturing Processes IV. LNME. Springer, Cham*, 2023. 540–551. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8_51
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. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2023-1-3>
6. Gamez-Montero, P., Codina, E., Castilla, R. A Review of Gerotor Technology in Hydraulic Machines. *Energies*, 2019. 12. 2423. <https://doi.org/10.3390/en12122423>
7. Egusquiza, E., Valero, C., Presas, A., Huang, X., Guardo, A., Seidel, U. Analysis of the dynamic response of pump-turbine impellers. Influence of the rotor. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016. 68–69. 330–341. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2015.05.034>
8. Krasnikov, S., Rogovyi, A., Mishchenko, I., Avershyn, A., Solodov, V. Vibration reliability of the turbine unit's housing considering random imperfections. In *Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange. Springer, Cham*, 2022. 3–12. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06044-1_1
9. Barrio, R., Fernández, J., Blanco, E., Parrondo, J., Marcos, A. Performance characteristics and internal flow patterns in a reverse-running pump-turbine. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2012. 226 (3). 695–708. <https://doi.org/10.1177/0954406211416304>
10. Панченко А. І., Волошина А. А., Панченко І. А. Конструктивные особенности планетарных гидромоторов серии PRG. *Вісник НТУ «ХПІ»*, 2018. № 17 (1293). С.88–95.



11. Панченко А. І., Волошина А. А., Панченко І. А. Разработка планетарных гидромоторов для силовых гидроприводов мобильной техники. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*, 2015. Vol. 17. No 9. P. 29–36.
12. Andrenko, P., Rogovyi, A., Hrechka, I., Khovanskyi, S., & Svyarenko, M. The Influence of the Gas Content in the Working Fluid on Parameters of the the Hydraulic Motor's Axial Piston. In *Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange*. Springer, Cham, 2021. 97–106. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77823-1_10
13. Andrenko, P., Hrechka, I., Khovanskyi, S., Rogovyi, A., Svyarenko, M. Improving the Technical Level of Hydraulic Machines, Hydraulic Units and Hydraulic Devices using a Definitive Assessment Criterion at the Design Stage. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021. 18 (3), 57–76. <https://doi.org/10.24191/jmeche.v18i3.15414>
14. Demenego, A., Vecchiato, D., Litvin, F.L., Nervegna, N., Mancó, S. Design and simulation of meshing of a cycloidal pump. *Mechanism and Machine Theory*, 2002. 37. 311–332. [https://doi.org/10.1016/S0094-114X\(01\)00074-X](https://doi.org/10.1016/S0094-114X(01)00074-X)
15. Bonandrini, G., Mimmi, G., Rottenbacher, C. Theoretical Analysis of an Original Rotary Machine. *Journal of Mechanical Design*, 2010. 132 (2). 024501. <https://doi.org/10.1115/1.4000698>
16. Панченко А. І., Волошина А. А., Панченко І. А., Волошин А. А., Нестеренко К. В. Вплив конструктивних особливостей системи роторів планетарного гідромотора на зміну його вихідних характеристик. *Праці ТДАТУ*, 2021. Вип. 21. Т. 4. С. 61–77. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-2021-21-2-61-77>
17. 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. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-19-4-33-48>
18. Ivanović, L., Blagojević, M., Devedžić, G., Assoul, Y. Analytical and Numerical Analysis of Load Gerotor Pumps. *Scientific Technical Review*, 2010. 60 (1). 30–38.
19. Ivanovic L., Miric N., Devedzic G., Ćuković S. Analysis of forces and moments in gerotor pumps. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2010. 224 (10). 2257–2269. <https://doi.org/10.1243/09544062JMES2041>
20. Hwang, Y.-W., Hsieh, C.-F. Geometric design using hypotrochoid and nonundercutting conditions for an internal cycloidal gear. *Journal of Mechanical Design*, 2007. 129 (4). 413–420. <https://doi.org/10.1115/1.2437806>
21. Hsieh, C.-F., Hwang, Y.-W. Geometric design for a gerotor pump with high area efficiency. *Journal of Mechanical Design*, 2007. 129. 1269–1277. <https://doi.org/10.1115/1.2779887>
22. Choi, T., Kim, M., Lee, G., Jung, S., Bae, J., Kim, C. Design of Rotor for Internal Gear Pump Using Cycloid and Circular-Arc Curves. *Journal of Mechanical Design*, 2012. 134 (1). No: 011005-12. <https://doi.org/10.1115/1.4004423>
23. Ding, H., Lu J., Jiang, B. A CFD model for orbital gerotor motor. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2012. 15 (6). No: 062006. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/15/6/062006>
24. Stryczek, J., Bednarczyk, S., Biernacki K. Strength analysis of the polyoxymethylene cycloidal gears of the gerotor pump. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2014. 14 (4). 647–660. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2013.12.005>
25. Stryczek, J., Bednarczyk, S., Biernacki, K. Gerotor pump with POM gears: Design, production technology, research. *Archives of Civil and Mechanical Engineerin*, 2014. 14 (3). 391–397. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2013.12.008>
26. Панченко А. І., Волошина А. А., Панченко І. А. Надійність конструкції роторів планетарного гідромотора. *Праці ТДАТУ*, 2020. Вип. 20. Т. 1. С. 82–92. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-20-1-82-92>
27. Altare, G., Rundo, M. Computational Fluid Dynamics Analysis of Gerotor Lubricating Pumps at High-Speed: Geometric Features Influencing the Filling Capability. *Journal of Fluids Engineering*, 2016. 138 (11). No: FE-15-1757. <https://doi.org/10.1115/1.4033675>
28. Kiurchev, S., Luzan, P., Zasiadko, A., Radionov, H., Boltianska, N. Influence of the flow area of distribution systems on changing the operating parameters of planetary hydraulic motors. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021. 1021. 012037 (2021). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012037>
29. Voloshina, A., Panchenko, A., Boltyansky, O., Zasiadko, A., Verkholtantseva, V. Improvement of the Angular Arrangement of Distribution System Windows When Designing Planetary Hydraulic Machines. *InterPartner 2021: Advanced Manufacturing Processes III. LNME*. Springer, Cham 2022, 53–63. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91327-4_6



30. Yeremenko, O., Abdullo, M. A., Boltianska, N., Mikhalchenko, S., Verkholtantseva, V. Reducing the Pulsation of the Working Fluid in Planetary Hydraulic Machines by Rational Design of Their Distribution Systems. *DSMIE 2022: Advances in Design, Simulation and Manufacturing V. LNME. Springer, Cham*, 2022. 2. 133–143. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06044-1_13
31. Hutsol, T. European Green Deal: Improving the Efficiency of Using Planetary Hydraulic Machines. *Energies*, 2023. 16 (18). 6481. <https://doi.org/10.3390/en16186481>
32. Панченко А. І., Волошина А. А., Панченко І. А. Обґрунтування геометричних параметрів розподільних систем планетарних гідромашин. *Праці ТДАТУ*, 2020. Вип. 20. Т. 2. С. 23–35. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-20-2-23-35>
33. 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. 1839–1846. <https://doi.org/10.4271/2016-01-1081>
34. Paffoni, B., Progri, R., Gras, R. Teeth clearance effects upon pressure and film thickness in a trochoidal hydrostatic gear pump. *The Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2004. 218. 247–256. <https://doi.org/10.1243/0954410041872799>
35. Kiurchev, S., Abdullo, M.A., Vlasenko, T., Prasol, S., Verkholtantseva, V. Automated Control of the Gear Profile for the Gerotor Hydraulic Machine. *InterPartner 2022: Advanced Manufacturing Processes IV. LNME. Springer, Cham*, 2023. 32–43. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8_4
36. Hsieh, C.F. Fluid and dynamics analyses of a gerotor pump using various span angle Designs. *Journal of Mechanical Design*, 2012. 134 (12). 121003. <https://doi.org/10.1115/1.4007703>
37. Ivanovic, L.T., Velic`kovic, S.N., Stojanovic, B.Ž., Kandeve, M., Jakimovska, K. The selection of optimal parameters of gerotor pump by application of factorial experimental design. *FME Transactions*, 2017. 45. 159–164
38. Kyurchev, V., Kiurchev, S., Rezvaya, K., Pastushenko, A., Głowacki S. Experimental Evaluation of the Impact of the Diametral Clearance on Output Characteristics of a Planetary Hydraulic Motor. *DSMIE 2023: Advances in Design, Simulation and Manufacturing VI. LNME. Springer, Cham*, 2023. 2. 84–94. https://doi.org/10.1007/978-3-031-32774-2_9
39. Kiurchev, S., Kyurchev, V., Fatyeyev, A., Tynyanova, I., Mudryk, K. Influence of the Radius of Curvature of the Teeth on the Geometric and Functional Parameters of the Rotors of the Planetary Hydraulic Motor. *InterPartner 2023: Advanced Manufacturing Processes V. LNME. Springer, Cham*, 2024. 450–461. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_42
40. Panchenko, A., Voloshina, A., Fatyeyev, A., Rezvaya, K., Mudryk, K. Changing the Output Characteristics of a Planetary Hydraulic Motor. *DSMIE 2024: Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII. LNME. Springer, Cham*, 2024, 304–313. https://doi.org/10.1007/978-3-031-63720-9_26

Дата першого надходження статті до видання: 07.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 25.05.2026

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



A. Panchenko¹, A. Voloshina¹, O. Koviazin¹, I. Panchenko¹, A. Voloshin³

¹*Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University*

²*Separated Structural Subdivision "Melitopol Professional College of Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University"*

PREDICTION OF CHANGES IN OUTPUT CHARACTERISTICS OF A PLANETARY HYDRAULIC MOTOR UNDER OPERATING CONDITIONS

Summary

This paper examines the patterns of change in the output characteristics of a planetary (orbital) hydraulic motor during operation, taking into account its technical condition. The relevance of the study stems from the need to improve the reliability of hydraulic drives in self-propelled vehicles and the lack of effective approaches to



diagnosing hydraulic machines without disassembling them. It has been established that the key factor determining the technical condition of a hydraulic motor is the diametrical clearance between the rotors, which changes due to wear and directly impacts functional parameters of a planetary (orbital) hydraulic motor.

To study the influence of operational factors, a full factorial experiment was used, varying shaft load, hydraulic fluid flow rate, and diametrical clearance. The response functions selected were shaft speed, pressure drop, and volumetric, mechanical, and overall efficiency. Based on the experimental results, mathematical models were developed in the form of regression equations that adequately describe the relationship between the determining factors and the initial hydraulic motor characteristics with a confidence level of 0.95.

It was found that within a diametrical clearance range of 0.02–0.16 mm, efficiency factors remain relatively stable and do not reflect the actual degree of wear, limiting their use as diagnostic parameters. At the same time, the hydraulic motor shaft speed is the most sensitive indicator, decreasing with both increasing load and increasing clearance and decreasing hydraulic fluid flow. Critical operating conditions were identified, in which a significant increase in diametrical clearance (up to 0.23 mm) leads to a sharp drop in speed and loss of hydraulic motor performance.

Based on the obtained dependencies, an approach is proposed for determining the technical condition of a planetary hydraulic motor based on measured operating parameters (rotational speed, flow rate, pressure drop) without dismantling the equipment. The practical significance of these results lies in their potential use in developing diagnostic and resource forecasting systems for hydraulic drives, which will lead to increased operational efficiency and reduced maintenance costs for self-propelled equipment.

Keywords: torque, working fluid flow rate, diametrical clearance, rotational speed, full-factorial experiment.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-2-16>

УДК 633.34:664.0

І. Ю. Повар¹, аспірант

ORCID: 0009-0000-1984-8894

А. С. Комар², інженер

ORCID: 0000-0001-7037-8402

¹Полтавський державний аграрний університет²Таврійський державний агротехнологічний університет

імені Дмитра Моторного

e-mail: didur.vv@gmail.com

ОЧИЩЕННЯ ОЛІЙ ЦЕНТРИФУГУВАННЯМ

Анотація. У статті розглянуто процес очищення рослинних олій центрифугуванням як один із найпоширеніших фізичних способів видалення механічних домішок із олії-сирцю. Показано, що ефективність центрифугування істотно перевищує гравітаційне відстоювання, оскільки в полі відцентрових сил осадження частинок відбувається значно інтенсивніше. Наведено фізичні передумови процесу, базові аналітичні залежності для опису сил, що діють на тверді частинки, а також узагальнено особливості роботи дискових, барабанних, вертикальних фільтрувальних і конічних центрифуг. Встановлено, що центрифугування є ефективним насамперед на стадії попереднього очищення олій від грубодисперсних механічних домішок, однак не забезпечує повного вилучення дрібнодисперсної зависі та первинних продуктів окиснення. Обґрунтовано доцільність поєднання центрифугування з фільтрацією або адсорбційним доочищенням для покращення якості готового продукту.

Ключові слова: рослинна олія, центрифугування, очищення олії, механічні домішки, відцентрова сила, осадження, дискова центрифуга, конічний очищувач, фільтрація, адсорбція.

Постановка проблеми. Нерафіновані рослинні олії після пресування або екстрагування містять механічні домішки, частинки оболонки, білкові та слизові речовини, фосфоліпіди, вільні жирні кислоти, пігменти та продукти початкового окиснення, які погіршують прозорість, стабільність і термін зберігання продукту [3–5]. Тому первинне очищення олій є обов'язковою стадією технологічного процесу. Одним із найпоширеніших способів механічного очищення є центрифугування. На відміну від відстоювання, де поділ фаз відбувається лише під дією сили тяжіння, у центрифугуванні розділення інтенсифікується відцентровим прискоренням, що істотно скорочує тривалість процесу й підвищує ступінь вилучення грубих частинок. Водночас навіть за високої інтенсивності обертання центрифугування не завжди забезпечує видалення тонкодисперсної зависі та продуктів окиснення, через що виникає потреба у вдосконаленні технології очищення.

Аналіз останніх досліджень. У сучасних дослідженнях з очищення рослинних олій значна увага приділяється комбінуванню фізичних і фізико-хімічних методів очищення. Огляди з рафінації рослинних олій підкреслюють, що механічне очищення є лише початковою стадією і переважно спрямоване на видалення зважених домішок, тоді як стабільність, колір і безпечність олії істотно залежать також від фосфоліпідів, вільних жирних кислот, пігментів та окиснених сполук [3–5]. У роботах українських дослідників показано, що для малих і середніх підприємств особливого значення набуває розроблення компактних систем первинного очищення рослинної олії, де центрифугування використовується як базова операція вилучення механічних домішок [1, 2]. Разом з тим у сучасних публікаціях щодо режимів періодичної роботи центрифуг для очищення рослинних олій зазначено, що саме густина частинок домішок, швидкість обертання ротора й тривалість процесу визначають ефективність вилучення зависі із соняшникової та ріпакової олії [6]. Отже, сучасний стан досліджень підтверджує



високу ефективність центрифугування як методу попереднього очищення, але також вказує на його обмеження щодо вилучення колоїдних і окиснених домішок [7]. Це зумовлює необхідність обґрунтування оптимальних режимів центрифугування та розгляду комбінованих схем очищення [1–6, 8].

Формулювання мети статті. Метою роботи є узагальнення теоретичних та технологічних основ очищення рослинних олій центрифугуванням, аналіз ефективності різних конструкцій центрифуг і визначення меж застосування цього методу в технології первинного очищення олій.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- розглянути фізичну сутність очищення олій центрифугуванням;
- подати основні аналітичні залежності, що описують процес осадження частинок;
- проаналізувати конструктивні особливості найпоширеніших центрифуг;
- визначити переваги й недоліки центрифугування як способу очищення;
- обґрунтувати напрями вдосконалення процесу [1–6].

Основна частина. Теоретичні основи очищення олій центрифугуванням. Ефективність очищення олій центрифугуванням істотно вища, ніж за звичайного відстоювання. Якщо при відстоюванні на частинку діє сила тяжіння:

$$G_0 = mg, \quad (1)$$

де m – маса твердої частинки, кг;

g – прискорення вільного падіння, м/с²,

то при центрифугуванні ця сила замінюється відцентровою:

$$G_u = m \frac{v^2}{R}, \quad (2)$$

де v – колова швидкість руху суспензії, м/с;

R – радіус обертання, м.

За умов ламінарного осадження швидкість осідання частинки при гравітаційному полі може бути описана законом Стокса, а в полі центрифуги замість g використовується відцентрове прискорення. Це означає, що зі зростанням швидкості обертання та радіуса розділення швидкість вилучення твердих частинок зростає, а час очищення зменшується.

Термінальна швидкість осадження частинки в гравітаційному полі:

$$u_g = \frac{d^2 (\rho_p - \rho_l) g}{18\mu}, \quad (3)$$

а в полі центрифуги:

$$u_c = \frac{d^2 (\rho_p - \rho_l) \omega^2 r}{18\mu}, \quad (4)$$

де d – діаметр частинки;

ρ_p – густина частинки;

ρ_l – густина рідкої фази;

μ – динамічна в'язкість олії;

ω – кутова швидкість ротора;

r – поточний радіус осадження.

Таким чином, центрифугування особливо ефективно для вилучення частинок більшої густини та діаметра. Проте дрібнодисперсні частинки, густина яких близька до густини олій, можуть не встигати осідати на робочих поверхнях центрифуги і виносяться разом

з очищеною фракцією. Саме цим пояснюється обмежена глибина очищення при одноразовому центрифугуванні.

Принцип дії класичної центрифуги. У класичному варіанті суспензія надходить до центральної труби ротора, потрапляє в барабан із пакетом конічних тарілок і під дією відцентрових сил розділяється на важку та легку фази. Більш важкі механічні домішки переміщуються до периферії барабану, а очищена олія відводиться окремим каналом. Саме тарілчастий пакет значно збільшує площу осадження, що підвищує інтенсивність очищення. Однак таке очищення слід вважати переважно попереднім, оскільки з рідкої фази вилучаються, передусім, грубі конгломерати твердих частинок. Дрібнодисперсна завесь і продукти початкового окиснення в олії залишаються, а з часом можуть спричинити помутніння, коагуляцію та втрату харчової придатності продукту. Подібні небажані компоненти дійсно належать до ключових факторів зниження стабільності сирих рослинних олій.

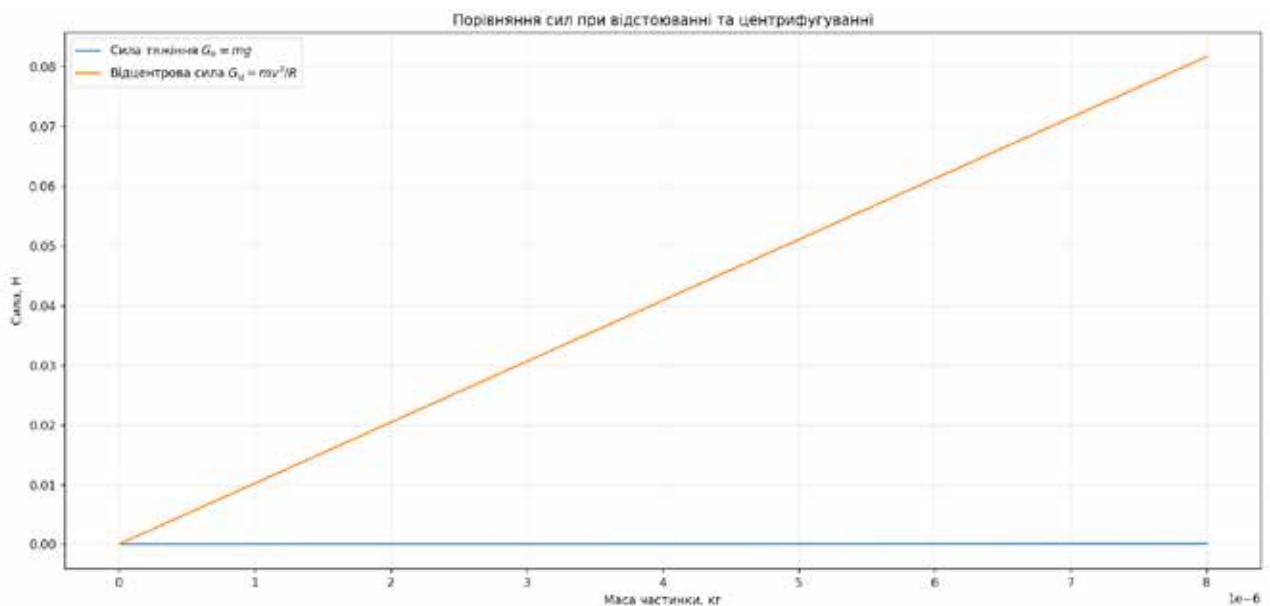


Рис. 1. Схема дії сил при відстоюванні та центрифугуванні

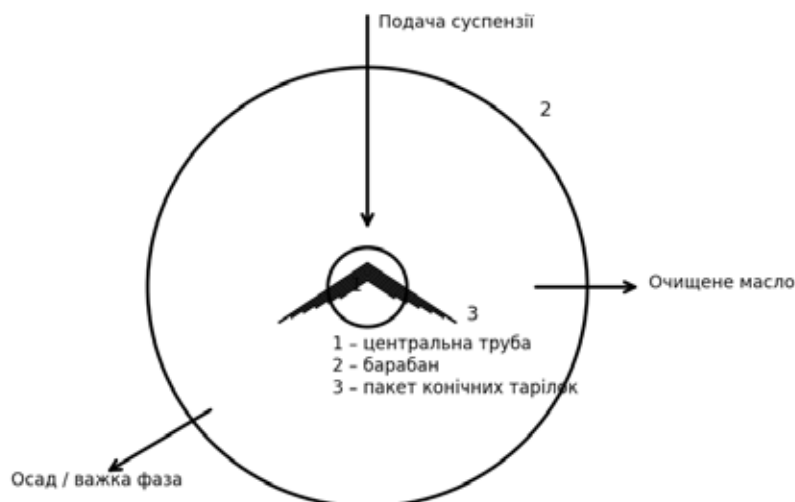


Рис. 2. Схематична будова тарілчастої центрифуги для очищення олій

Основні типи центрифуг для очищення олій. У виробництві сирих і нерафінованих соняшникових олій застосовують товстостінні, циліндричні, трубчасті, тонкостінні, спіральні-відцентрові, конічні та комбіновані центрифуги. Для малотоннажних виробництв найбільш поширеними є тонкостінні та конічні очищувачі.

Вертикальна фільтрувальна центрифуга з вертикальною віссю обертання розділяє суспензію на тверду і рідку фази, але працює циклічно: після накопичення осаду потрібне розвантаження і очищення фільтроелемента. Це знижує стабільність процесу й погіршує якість очищення при повторному завантаженні. Барабанні центрифуги забезпечують механічний поділ суспензії за рахунок наростання шару осаду на фільтрувальній перегородці. Їх перевага полягає у вищій продуктивності, однак вони теж не усувають проблему тонкодисперсної зависі. Окремий інтерес становлять тонкостінні й конічні очищувачі типу ГЦН, які завдяки значній площі осадження мають вищу тонкість розділення та можуть ефективніше вилучати важкі й легкі домішки. Водночас навіть вони не забезпечують повного вилучення первинних продуктів окиснення, тому часто потребують доочищення. Центробіжно-адсорбційні установки, у яких поєднано відцентровий поділ і шар сорбенту, дозволяють одночасно зменшувати вміст механічних домішок і частково вилучати продукти окиснення. Їх недоліком є засмічення картриджів і необхідність періодичної заміни. Ця ідея загалом відповідає сучасній тенденції комбінувати центрифугування з додатковими стадіями очищення.

Технологічні переваги та обмеження методу. До основних переваг центрифугування належать:

- висока інтенсивність поділу фаз;
- відсутність потреби в нагріванні або хімічних реагентах на стадії первинного очищення;
- можливість механічного видалення домішок без істотного впливу на харчову цінність олії;
- придатність для безперервних і періодичних режимів роботи.

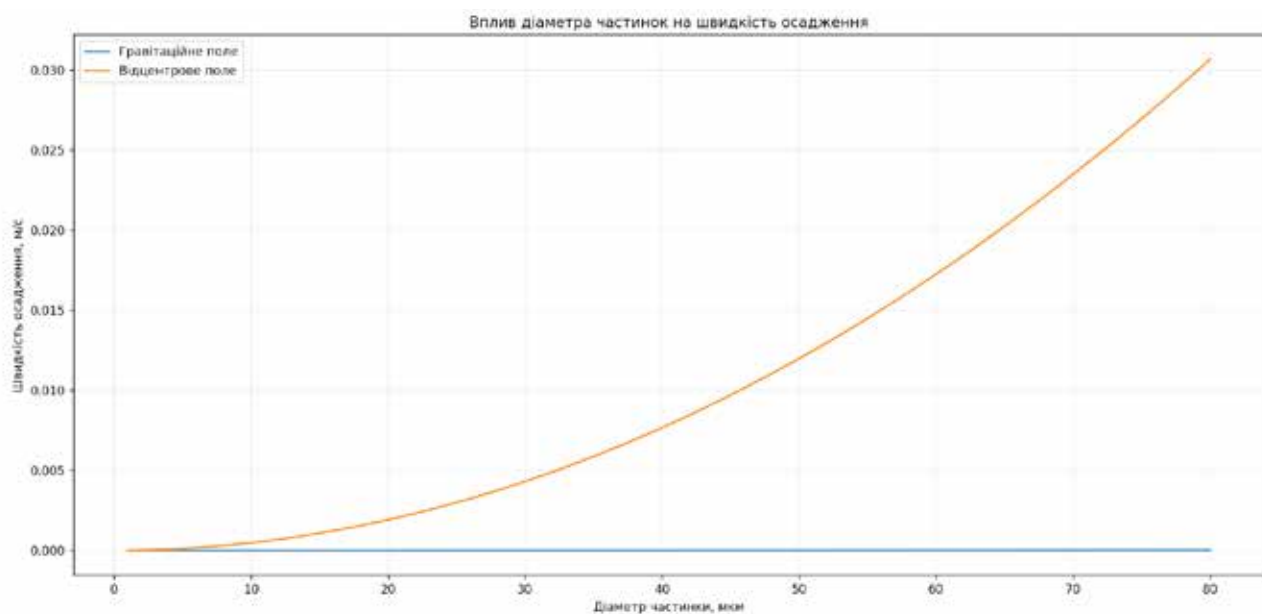


Рис. 3. Порівняльна залежність швидкості осадження від діаметра частинок у гравітаційному та відцентровому полі

Разом з тим центрифугування має й суттєві обмеження:

- неповне видалення дрібнодисперсних частинок;
- слабка ефективність щодо колоїдних домішок та продуктів окиснення;



- потреба в періодичному очищенні робочих елементів;
- залежність ефективності від в'язкості олії, густини та дисперсності домішок, а також режиму обертання ротора [4–11].

За результатами сучасних розрахунків для соняшникової олії рекомендовані режими роботи періодичної центрифуги можуть визначатися залежно від густини частинок і швидкості обертання ротора; для соняшникової олії в одній із моделей рекомендовано близько 3400 об/хв і час очищення порядку 6500 с для максимального вилучення зависі. Ці значення є прикладом розрахункової оптимізації, а не універсальною нормою для будь-якої машини.

Отже, центрифугування доцільно розглядати як ефективний етап попереднього очищення олій, який бажано доповнювати фільтрацією, гідратацією, адсорбцією чи іншими методами поглибленого очищення залежно від вимог до готового продукту [2–5].

Висновки. Центрифугування є високоефективним методом первинного очищення рослинних олій від механічних домішок, який значно перевищує відстоювання за інтенсивністю поділу фаз. Його ефективність зумовлена дією відцентрових сил, що багаторазово збільшують швидкість осадження частинок.

Найбільш придатними для очищення сирих та нерафінованих соняшникових олій є тарілчасті, тонкостінні та конічні центрифуги, які забезпечують велику площу осадження й відносно високу продуктивність. Водночас навіть ефективні центрифуги не забезпечують повного вилучення дрібнодисперсної зависі та продуктів окиснення.

Для підвищення якості очищення доцільно поєднувати центрифугування з фільтраційним або адсорбційним доочищенням. Такий підхід відповідає сучасним тенденціям у технології очищення рослинних олій і дозволяє підвищити стабільність, прозорість і термін зберігання продукту.

Список використаних джерел

1. Осадчук П. І., Дударев І. І. Формування технології очистки рослинної олії в умовах міні-цехів. *Наукові праці ОНАХТ*. 2018. Т. 82, вип. 1. С. 99–103.
2. Осадчук П. І. Теоретичні основи технології очищення рослинних олій. *Наукові праці ОНАХТ*. 2010. Вип. 37. С. 135–139.
3. Sonawane A., Waghmode S. *A Review on Vegetable Oil Refining: Process, Advances and Value Addition to Refining By-Products*. IntechOpen, 2023. DOI: 10.5772/intechopen.108752.
4. Gharby S. *Refining Vegetable Oils: Chemical and Physical Refining*. Foods. 2022.
5. Lv Y. et al. Removal strategies for the undesirable components from crude vegetable oils: A review. *Journal of Cleaner Production*. 2024.
6. Osadchuk P. I., Domuschi D. P., Enakiev Y. I., Elenov B. Theoretical justification of the operating modes of periodic activity of vegetable oil purification. *Research in Agricultural Engineering*. 2022. Vol. 68, No. 1. P. 35–40. DOI: 10.17221/107/2020-RAE. .
7. Дідур, В. В., В'юник, О. В., Білокінь, Я. В., Петриченко, Є. А. Основні закономірності процесів фільтрації. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*, Запоріжжя. ТДАТУ, 2025. Вип. 25, том 3, С.112-117. <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-3-15>
8. Дідур В. В., Лещенко І. А., В'юник О. В. Проблеми очищення рослинних олій. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету : наукове фахове видання*. Запоріжжя : ТДАТУ, 2024. Вип. 24, т. 1. С. 63-74. DOI 10.32782/2078-0877-2024-24-1-4
9. Marvin Winkler, Heiko Sonner, Marco Gleiss, Hermann Nirschl Fractionation of ultrafineparticles: Evaluation of separation efficiency by UV–visspectroscopy. *Chemical Engineering Science*. 2020. Vol. 213. e115374. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.115374>.
10. Паламарчук І. П., Бандура В. М., Фіалковська Л. В., Пазюк В. М. Обґрунтування технології та розробка обладнання для первинного очищення соняшникової олії. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2017. № 1(84). С. 128 – 132.



11. Деллап'яне Хуан, Пельосо, Хосе. Процес очищення рослинних олій шляхом виділення твердих речовин центрифугуванням на стадії міцели. Патент. 2014. US8692004B <https://www.researchgate.net/publication/302724382> (дата звернення 04.01.2024).

Дата першого надходження статті до видання: 06.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 25.05.2026

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



I. Povar¹, A. Komar²

¹*Poltava State Agrarian University*

²*Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University*

OIL PURIFICATION BY CENTRIFUGATION

Summary

Unrefined vegetable oils after pressing or extraction contain mechanical impurities, shell particles, protein and mucous substances, phospholipids, free fatty acids, pigments and initial oxidation products, which impair the transparency, stability and shelf life of the product. Therefore, primary purification of oils is a mandatory stage of the technological process. The aim of the work is to generalize the theoretical and technological foundations of vegetable oil purification by centrifugation, analyze the efficiency of various centrifuge designs, and determine the limits of application of this method in the technology of primary oil purification. The article presents the results of an analysis of modern research, considers vegetable oil purification by centrifugation as one of the main physical methods for removing mechanical impurities from crude oil. It is shown that centrifugation is substantially more effective than gravitational settling because the separation of solid particles occurs under centrifugal acceleration. The physical basis of the process, the main analytical equations, and the design features of disc-stack, drum, vertical filtering, and conical centrifuges are summarized. It is established that centrifugation is highly effective at the stage of preliminary purification of oils from coarse suspended particles, but it does not ensure complete removal of fine-dispersed impurities and primary oxidation products. Therefore, for deeper purification, centrifugation should be combined with filtration or adsorption treatment. To enhance the purification process, centrifugation with filtration or adsorption purification is necessary. This approach corresponds to current trends in the technology of purification of vegetable oils and allows us to improve the stability, purity and conservation of the product.

Keywords: vegetable oil, centrifugation, oil purification, mechanical impurities, centrifugal force, sedimentation, disc-stack centrifuge, conical purifier, filtration, adsorption.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-2-17>

УДК 620.92:631.862:519.876

О. Г. Скляр¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-0456-2479

Р. В. Скляр¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-1547-5100

Б. В. Болтянський¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-2072-4025

В. Д. Акулов¹, аспірантО. С. Пушка², канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-6481-8536

¹Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного²Уманський національний університет

e-mail: radmila.skliar@tsatu.edu.ua

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ НАКОПИЧЕННЯ МЕТАНОУТВОРЮЮЧИХ МІКРООРГАНІЗМІВ В АНАЕРОБНОМУ БІОФІЛЬТРІ

Анотація. У статті розроблено математичну модель процесу накопичення метаноутворюючих мікроорганізмів в анаеробному біофільтрі біогазової установки. Обґрунтовано кінетичні залежності, що описують вплив концентрації органічної речовини, дози завантаження метантенка та конструктивних параметрів носіїв на швидкість утворення біогазу. Модель побудована з використанням рівнянь Моно та враховує процес закріплення активної біомаси на поверхні носія. Запропонований підхід дозволяє інтенсифікувати анаеробне зброджування гнойових стоків і підвищити енергетичну ефективність біогазових установок.

Ключові слова: анаеробне зброджування, метаноутворюючі мікроорганізми, біофільтр, математична модель, біогаз, гнойові стоки, інтенсифікація процесу.

Постановка проблеми. Зростання обсягів органічних відходів тваринництва та птахівництва потребує впровадження ефективних технологій їх анаеробної переробки з одночасним підвищенням енергетичної продуктивності біогазових установок [1, 2]. Однією з ключових проблем метанового зброджування є винос активної метаногенної мікрофлори з реактора при збільшенні дози завантаження субстрату, що призводить до зниження швидкості газоутворення та нестабільності технологічного процесу. Традиційні метантенки без систем утримання біомаси мають обмежені можливості інтенсифікації процесу через залежність від гідравлічного часу утримання та концентрації органічної речовини [3, 4]. Використання анаеробних біофільтрів дозволяє створити умови для накопичення метаноутворюючих мікроорганізмів на поверхні носіїв, однак відсутність адекватних математичних моделей, що враховують динаміку росту та закріплення біомаси, ускладнює оптимізацію конструктивних і технологічних параметрів [5–7]. Таким чином, виникає необхідність розроблення математичного інструментарію для прогнозування швидкості утворення біогазу залежно від параметрів біофільтра та режимів роботи метантенка.

Аналіз останніх досліджень. Сучасні дослідження в галузі анаеробного зброджування спрямовані на підвищення ефективності біогазових установок шляхом оптимізації температурних режимів, систем перемішування, дозування субстрату та утримання активної біомаси в реакторі [8–10]. Значна увага приділяється використанню кінетичних моделей, заснованих на залежностях типу Моно, що описують швидкість росту мікроорганізмів залежно від концентрації субстрату [11, 12]. У наукових публікаціях розглядаються питання підвищення метановиділення через збільшення площі поверхні носіїв у біофільтрах, застосування структурованих або гранульованих матеріалів, а також впровадження реакторів із фіксованою або псевдозрідже-



ною біомасою [13, 14]. Разом із тим, більшість моделей орієнтована на традиційні реактори без урахування специфіки накопичення біомаси на носіях складної геометрії. Недостатньо дослідженим залишається питання кількісного зв'язку між конструктивними параметрами біофільтра, товщиною шару закріплених мікроорганізмів та зміною швидкості утворення біогазу [15]. Це зумовлює актуальність розроблення комплексної динамічної моделі процесу накопичення метаногенів у біофільтрі біогазової установки.

Формулювання мети статті. Метою статті є розроблення та теоретичне обґрунтування математичної моделі процесу накопичення метаноутворюючих мікроорганізмів в анаеробному біофільтрі біогазової установки, що дозволяє встановити функціональний зв'язок між конструктивними параметрами носіїв, режимами завантаження метантенка та швидкістю утворення біогазу для інтенсифікації процесу анаеробного зброджування органічних відходів.

Основна частина. Основним напрямком підвищення інтенсивності утворення біогазу при переробці гнойових стоків є штучне збільшення метаноутворюючих мікроорганізмів у метантенці, при якій винос метаноутворюючих мікроорганізмів і неперебродилої сировини зменшуються. При анаеробній переробці гнойових стоків збереження метаногенної мікрофлори в метантенці має першорядне значення, оскільки компенсувати втрати її з камери зброджування можна тільки шляхом збільшення тривалості переробки, тому що в перероблюваному гної є достатня концентрація органічних речовин. Однак, цей варіант, тобто збільшення тривалості переробки гною, призводить до збільшення енергетичних витрат і собівартості виробленого продукту [16].

Необхідною умовою вдосконалення процесу переробки гнойових стоків є утримання метаноутворюючих мікроорганізмів у робочій камері метантенка. Це головний технологічний принцип роботи всіх анаеробних фільтрів, реалізація якого можлива на основі здатності метанових мікроорганізмів створювати закріплені макроструктури.

Накопичення метаноутворюючих мікроорганізмів в анаеробному біофільтрі [16] відбувається в умовах мінливих зовнішніх впливів, зумовлених численними і різноманітними факторами: температура, вологість, доза і періодичність завантаження метантенка, фізико-механічні властивості гнойового стоку, вміст органічних речовин в сировині тощо.

Вхідні параметри процесу переробки гнойових стоків поділяються на зовнішні та внутрішні. Зовнішні параметри описують умови функціонування метантенку [17], а внутрішні параметри характеризують елементи біофільтра (форма, кількість робочих органів, конструкція частин тощо), властивості перероблюваної сировини та стан метаноутворюючих мікроорганізмів у системі (зміна температури та вологості сировини, швидкості накопичення, діяльності та концентрації анаеробних мікроорганізмів, кінетика анаеробної переробки тощо).

Розглядаючи функціонування метантенка [18] як реакцію на вхідні впливи і позначивши через $\bar{Y} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$ – вектор вихідних параметрів, а через $\bar{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ і $\bar{F} = (F_1, F_2, \dots, F_n)$ відповідно вектори зовнішніх і внутрішніх параметрів, представимо модель функціонування біогазової установки у вигляді (рис. 1).

Загальна математична модель процесу утворення біогазу може бути представлена за принципом вхід-вихід у такому вигляді:

$$\bar{Y} = A(\bar{F}); \bar{X} \quad (1)$$

Побудова математичної моделі метантенка полягає у визначенні виду оператора $A = A(\bar{F})$, що визначає алгоритм перетворення зовнішніх впливів \bar{X} у вихідні параметри \bar{Y} . Структура оператора A залежить не тільки від конструктивної схеми метантенка з біофільтром, але й від значення внутрішніх параметрів.

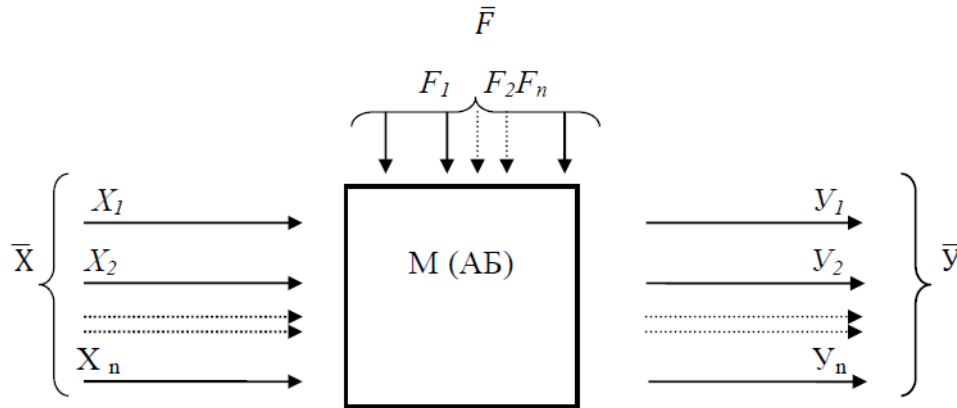


Рис. 1. Модель функціонування метантенку з біофільтром

Динамічну модель функціонування метантенку з біофільтром представимо в такому вигляді М(АБ) (рис. 2) [19].

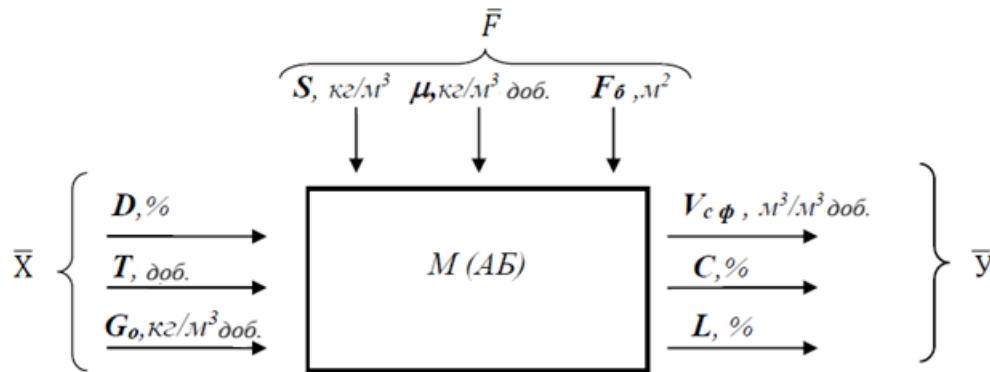


Рис. 2. Динамічна модель функціонування метантенку (М) з біофільтром (АБ)

Вхідні параметри: доза, D , відс., періодичність завантаження T , доб., метантенка і вміст органічної сухої речовини в гнойовому стоці G_ϕ , $\text{кг}/\text{м}^3 \text{ доб.}$; вихідні параметри: швидкість утворення біогазу $V_{c\phi}$, $\text{м}^3/\text{м}^3 \text{ доб.}$, метановміст у біогазі C , відс., і ступінь розкладання органічної речовини L , відс.; внутрішні параметри: вихідна концентрація органічних речовин у субстраті S , $\text{кг}/\text{м}^3$, максимальна швидкість росту мікроорганізмів у заданому процесі ферментації μ $\text{кг}/\text{м}^3 \text{ доб.}$, загальна площа поверхні носія біофільтра F_ϕ , м^2 .

Теоретичною основою для побудови математичної моделі процесу накопичення метаноутворюючих мікроорганізмів у біологічних фільтрах стала кінетична модель Конто, яка може бути застосована до ширшого класу органічних відходів. Вона описує швидкість утворення біогазу V_c , $\text{м}^3/\text{м}^3 \text{ доб.}$, залежно від технологічних параметрів процесу анаеробної переробки гною [15, 17, 20]:

$$V_c = \frac{V_{\delta} S}{\tau_u} \left(1 - \frac{K_s}{\mu \tau_u - 1 + k_s} \right) \quad (2)$$

де V_δ – граничний вихід біогазу з органічної речовини заданого складу при нескінченному часі переробки τ_u (діб), $\text{м}^3/\text{кг}$;

S – початкова концентрація органічної речовини в гної, $\text{кг}/\text{м}^3$;



μ – максимальна швидкість росту мікроорганізмів у заданому процесі переробки, кг/м³ доб.;
 k_s – кінетичний параметр (константа напівнасичення).

Швидкість утворення біогазу $V_{c\phi}$, м³/м³доба, з накопиченою активною біомасою метаноутворюючих мікроорганізмів в анаеробному біофільтрі визначаємо за виразом:

$$V_{c\phi} = V_c + \Delta V, \quad (3)$$

де V_c – швидкість газоутворення в традиційній біогазовій установці, м³/м³доб.;

ΔV – зміна швидкості газоутворення в метантенці з біофільтром, м³/м³доб.

Звідси випливає, що ΔV може залежати від таких параметрів:

$$\Delta V = f(X_{\phi m}, F_{\phi}, S, L, dS/d\tau_u, \mu, \tau_u \text{ тощо}), \quad (4)$$

де $X_{\phi m}$ – маса анаеробних бактерій, накопичених на носіях біофільтра, кг/м³;

F_{ϕ} – загальна площа поверхні носія лопатей біофільтра, м²;

S – концентрація органічної речовини в перероблюваному гної, кг/м³;

L – ступінь розкладання органічної речовини, відс.;

$dS/d\tau_u$ – зміна концентрації органічної речовини в гної за час переробки τ_u ;

μ – швидкість росту мікроорганізмів у біофільтрі, кг/м³доб.

Тоді, зміну швидкості утворення біогазу в анаеробному біофільтрі визначаємо як:

$$\Delta V = X_{\phi m} K_{\phi} (\mu / S), \quad (5)$$

де K_{ϕ} – коефіцієнт утворення біогазу з одиниці активної біомаси біофільтра, м³/кг.

Швидкість накопичення активної біомаси в метантенку залежить від концентрації органічної сировини і виражається залежністю, запропонованою Ж. Моно [21, 22]:

$$\frac{dS}{d\tau} = \frac{k_m \cdot Sx}{k_s + S}, \quad (6)$$

де k_m – максимальна питома швидкість переробки гною, кг/(м³ доб.);

k_s – константа Моно, що дорівнює концентрації субстрату, при якій питома швидкість росту біомаси в метантенку відповідає:

$$\mu = 1/2\mu_m, \text{ доб.}^{-1}. \quad (7)$$

Масу накопичених анаеробних бактерій на поверхнях носія лопатей анаеробного біофільтра визначаємо за виразом:

$$X_{\phi m} = F_{\phi} \delta \rho_{\phi}, \quad (8)$$

де δ – товщина шару накопичених мікроорганізмів у біофільтрі, м/м³;

ρ_{ϕ} – щільність мікроорганізмів, кг/м³.

Звідси загальна площа поверхні носія лопатей F_{ϕ} , м², розробленого нами кулястого біофільтра, визначається наступним чином:

$$F_{\phi} = F_l n_l = \pi d_{ш} l_{ш} n_l, \quad (9)$$

де F_l – загальна площа поверхні носія (капроновий шнур) лопатей біофільтра м²;

n_l – кількість лопатей біофільтра, шт.;

$d_{ш}$ – діаметр капронового шнура, м;

$l_{ш}$ – загальна довжина шнура, м.

Після перетворень виразу (2) швидкість утворення біогазу з накопиченими метаноутворюючими мікроорганізмами в анаеробному біофільтрі прийме вигляд:

$$V_{c\phi} = B \frac{S}{\tau_u} \left(1 - \frac{K_s}{\mu \tau_u - 1 + K_s} \right) + [X_{\phi m} K_{\phi} (\mu / S)]. \quad (10)$$



Отже, отримаємо математичну модель процесу накопичення метаноутворюючих мікроорганізмів на носіях кулястого біофільтра, що характеризується швидкістю утворення біогазу $V_{c\phi}$, м³/м³доба, у такому вигляді:

$$V_{c\phi} = V_c + [X_{om} K_o (\mu / S)]. \quad (11)$$

Розроблена математична модель процесу накопичення метаноутворюючих мікроорганізмів у біофільтрі дозволяє інтенсифікувати процес анаеробної переробки органічних стоків тваринництва в біогазовій установці (БГУ). У зв'язку з цим, продуктивність біогазової установки знаходиться у функціональній залежності від структурних елементів біофільтра (діаметра, кількості лопатей і площі поверхні носіїв), з підвищенням розмірів яких, збільшуються процес накопичення метаногенної мікрофлори і швидкість утворення біогазу. Концентрація метаноутворюючих мікроорганізмів і інтенсивність утворення біогазу різко знижуються при збільшенні дози завантаження гною в метантенк. Це відбувається внаслідок видалення з метантенку колоній метаноутворюючих мікроорганізмів з переробленою дозою вивантаженого гною, що, в свою чергу, призводить до скорочення загального обсягу газотворення [23].

За розробленою математичною моделлю (10) і системним аналізом процесу накопичення метаноутворюючих мікроорганізмів на носіях біофільтра розроблена структурна модель технології анаеробної переробки гнойових стоків у метантенку, яка складається з таких елементів: ЕМЗ – енерго-мікробіологічні засоби, ТЗ – технічні засоби та ЕТЗ – енерго-технічні засоби.

Розроблена модель дозволяє простежити процес інтенсифікації анаеробної переробки гнойових стоків у біогазовій установці шляхом накопичення метаноутворюючих мікроорганізмів у кулястому біофільтрі, який є конструктивним елементом метантенка, а також керуючий пристрій (КП) енерго-технологічними (ЕТП) і мікробіологічними процесами (МБП). Критеріями оцінки технологічного процесу інтенсифікації анаеробного зброджування гнойових стоків, які представлені в структурній моделі, є накопичувальні властивості та фізико-структурні характеристики носіїв анаеробного біофільтра. Накопичення метаноутворюючих мікроорганізмів в анаеробному біофільтрі характеризується швидкістю утворення біогазу, в результаті чого отримаємо енергетичні показники роботи біогазової установки при переробці гнойових стоків (рис. 3).

Однією з основних величин, що підлягають визначенню при проектуванні цехів з переробки гнойових стоків в анаеробних умовах, є доза завантаження метантенку, від якої залежить місткість камери зброджування і тривалість переробки стоків.

Експериментальними дослідженнями, проведеними провідними фахівцями [21–24] встановлено, що від дози завантаження вихідного гною в метантенк залежать ефективність процесу зброджування, ступінь розкладання органічних речовин, що містяться в ньому, обсяги одержуваного біологічного газу з реактора, а, отже, величина капітальних і експлуатаційних витрат. Доза завантаження метантенку вибирається з умови надійного захисту навколишнього середовища від забруднення та ефективного виробництва органічних добрив. Охорона навколишнього середовища забезпечується при повному знезараженні гною в процесі зброджування від елементів і хвороботворних мікроорганізмів, а якість органічних добрив визначається ступенем розпаду беззольної органічної речовини [20].

Звідси випливає, що при накопиченні метаногенної мікрофлори на носіях біофільтра контролюючим параметром є швидкість утворення біогазу $V_{c\phi}$, м³/м³доб., в одиницю часу перероблюваної сировини, яка залежить від дози завантаження метантенка D , відс.

$$D = \frac{\rho_o V_{c\phi}}{L \rho_H G_o K_o} 100^2, \quad (12)$$

де ρ_o – щільність біогазу, кг/м³;

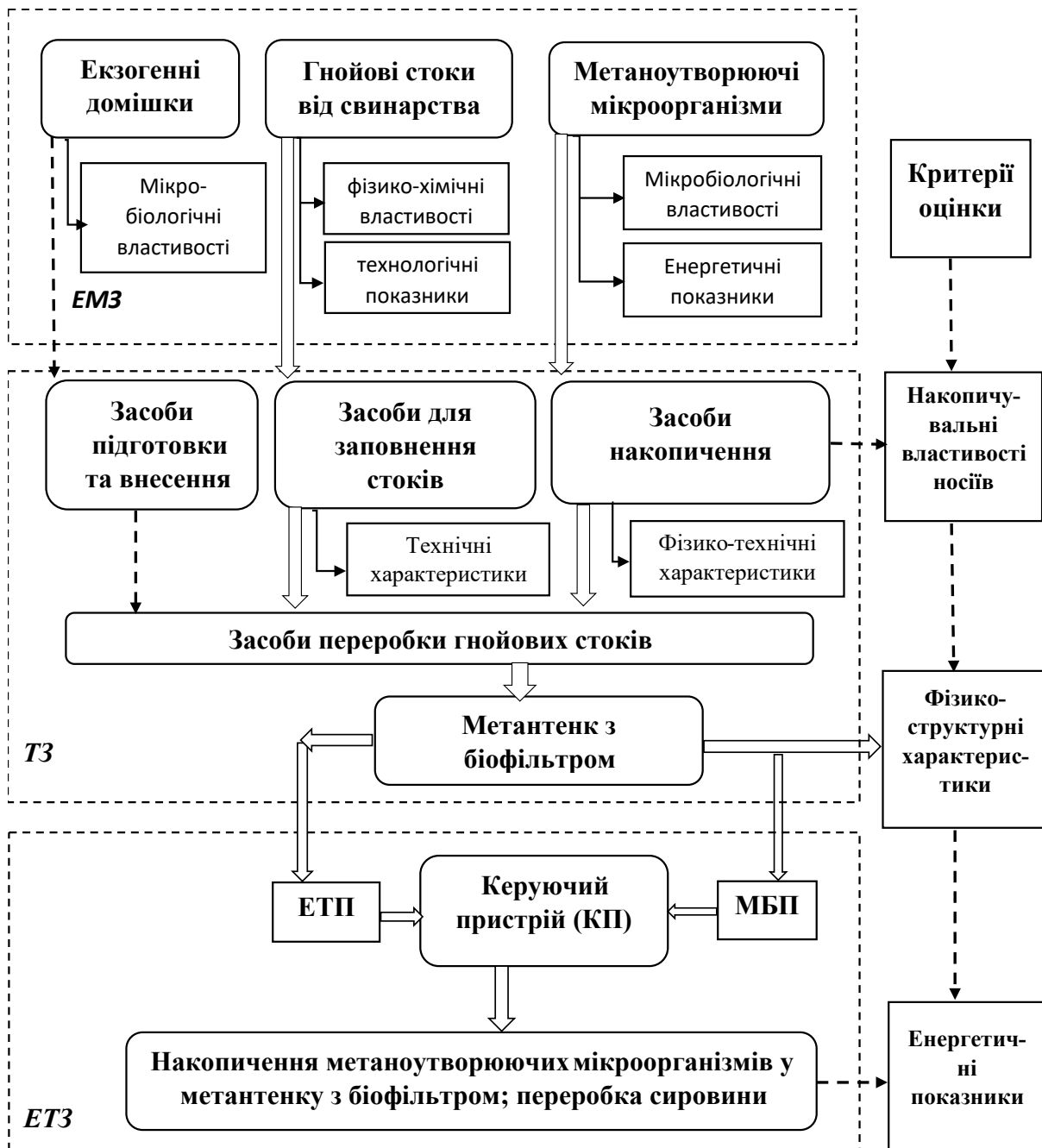


Рис. 3. Структурна модель технології анаеробної переробки гнойових стоків свинарства: EMЗ – енерго-мікробіологічні засоби; TZ – технічні засоби; ETЗ – енерго-технічні засоби; ЕТП – енерго-технологічний процес; МБП – мікробіологічний процес

L – ступінь розкладання органічної речовини, відс.;

G_o – маса органічної речовини в перероблюваному гнойовому стоці, кг/м³доб.;

ρ_H – щільність гнойового стоку, кг/м³;

K_b – коефіцієнт утворення біогазу з одиниці активної біомаси біофільтра, м³/кг.

Обсяг органічної речовини в зброджуваному гнойовому стоці залежить від його вологості та зольності і визначається за формулою:

$$G_o = G_H (100 - W)(100 - A_c)100^{-2}, \quad (13)$$



де G_n – маса зброджуваного гнойового стоку в метантенку, кг;

W – вологість, відс.;

A_C – зольність гнойового стоку, відс.

Доза завантаження метантенку D , відс., є фактором, на якому базується весь хід процесу метанового зброджування і при цьому, даний фактор зумовлює ступінь біологічної конверсії органічної речовини. Вона вказується за обсягом і беззольною речовиною. Доза завантаження за обсягом виражається у відсотках і показує, яку частину обсягу метантенка становить добовий обсяг завантаження субстрату. Доза завантаження за беззольною речовиною – це маса беззольної речовини субстрату в кілограмах, що подається на $1,0 \text{ м}^3$ обсягу метантенка на добу [8, 15].

Доза завантаження метантенка за беззольною речовиною D_B , відс., вихідного гною пов'язана з дозою завантаження за обсягом зброджуваної сировини D_3 , відс. такою залежністю:

$$D_B = D_3(100 - W)(100 - A_C) / 1000. \quad (14)$$

Ефективність виробництва біогазу багато в чому залежить не тільки від властивостей гною і схем його переробки, але і від технологічного процесу, конструктивних параметрів біогазової установки, а також температури навколишнього середовища.

Головним показником технологічного процесу утворення біогазу є тривалість зброджування гною в метантенці τ , д.б., і визначають таким чином:

$$\tau = \frac{V_{\phi} \rho_H}{V_{c.f.} G_H}, \quad (15)$$

де V_{ϕ} – об'єм виділеного біогазу, м^3 ;

$V_{c.f.}$ – швидкість утворення біогазу з зброджуваного гнойового стоку в метантенці з анаеробним біофільтром, $\text{м}^3/\text{м}^3\text{доб}$.

Знаючи тривалість зброджування сировини, визначаємо необхідну місткість камери зброджування метантенка V_k , м^3 , за наступним виразом:

$$V_k = \frac{G_H \tau (1 + \beta)}{\rho_H},$$

де β – коефіцієнт об'ємного розширення гною, д.од.

Висновки. Розроблено математичну модель процесу накопичення метаноутворюючих мікроорганізмів на носіях анаеробного біофільтра, яка враховує кінетичні параметри росту біомаси, концентрацію органічної речовини та конструктивні характеристики фільтруючих елементів. Встановлено функціональну залежність швидкості утворення біогазу від площі поверхні носія, дози завантаження метантенка та ступеня розкладання органічної речовини. Доведено, що збільшення ефективної площі закріплення біомаси сприяє підвищенню концентрації активних метаногенів та інтенсифікації процесу анаеробного зброджування. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації конструкції біофільтрів і режимів роботи біогазових установок при переробці гнойових стоків. Запропонована модель створює наукове підґрунтя для підвищення енергетичної ефективності та стабільності функціонування аграрних біогазових систем.

Список використаних джерел

1. Гелетуха Г. Г., Железна Т. А. Біоенергетика в Україні. *Матеріали для дебатів з питань енергозбереження*. Івано-Франківськ : Агенств. з розв. «Приватн. ініціативи», 2011. С. 18–23.
2. Матеріали Біоенергетичної асоціації України. URL: <https://uabio.org/>



3. Ратушняк Г. С., Джеджула В. В. Інтенсифікація біоконверсії коливальним перемішуванням субстрату. Вінниця : УНІВЕРСУМ, 2008. 117 с.
4. 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>
5. 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.
6. 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>
7. 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.
8. Скляр Р. В. Аналіз методів визначення часу перебування та навантаження на метантенк. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка*. 2014. Вип. 148. С. 405–412.
9. 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
10. 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.
11. Karne H., Bendre A., Singh A. Mathematical modelling of a pilot scale biogas plant. *Materials Today: Proceedings*, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.303> .
12. Abilmazhinov Y., Shakerkhan K., Meshechkin V., Shayakhmetov Y., Nurgaliyev N., Suychinov A. Mathematical Modelling for Evaluating the Sustainability of Biogas Generation through Anaerobic Digestion of Livestock Waste/ *Sustainability*. 2023. Vol. 15, No. 7, 5707. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15075707>.
13. Chorukova E., Simeonov I. Mathematical modeling of the anaerobic digestion in two-stage system with production of hydrogen and methane including three intermediate products. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 45. Issue 20. 2020. P. 11550–11558. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.228> .
14. Chorukova E., Kabaivanova L., Hubenov V., Simeonov I., Roeva O. Mathematical Model of a Thermophilic Anaerobic Digestion for Methane Production of Wheat Straw. *Processes* , 2022. 10(4). 742. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10040742>
15. 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: <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-1-6>
16. Біотехнологія відходів тваринницьких підприємств : монографія / М.О. Захаренко та ін. К., 2015. 380 с.
17. Skliar A., Skliar R. Justification of conditions for research on a laboratory biogas plant. *MOTROL: Motoryzacja I Energetyka Rolnictwa*. Lublin, 2014. Vol.16. No2, b. Pp. 183–188.
18. Zobeashia S.S.LT., Abioye O.P., Ijah U.J.J. Design and optimization of anaerobic digestion systems by advanced microbial community dynamics modelling. *Discov. Chem.* 2, 360 (2025). DOI: <https://doi.org/10.1007/s44371-025-00457-9> .
19. Khattabi N.El, Ahlamine I., Abdellah A. Mathematical modelling of the anaerobic digestion process with acidogenic and methanogenic biomasses. *Authorea*. April 14, 2024. DOI: 10.22541/au.171309199.90952619/v1
20. 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: <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2024-24-2-3>
21. Математичне моделювання біоплівки/ Робоча група IWA з моделювання біоплівки, Герман Еберль/ IWA Publishing, 2006. 179 с.
22. Lyberatos G., Skiadas I.V. Modeling of Anaerobic Digestion – A Review. *Global NEST Journal* 2013, 1(2), pp 63–76.
23. Вербинський В.В., Земляний М. Г. Регіональна енергетична політика України та шляхи її реалізації. Дніпропетровськ, 2003. 64 с.



24. Куріс Ю. В. Біоенергетичні установки. Обладнання та технології переробки органічних енергоресурсів : підручник Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 348 с.

Дата першого надходження статті до видання: 20.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 14.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 25.05.2026

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



O. Skliar¹, R. Skliar¹, B. Boltianskyi¹, V. Akulov¹, O. Pushka²

¹*Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University*

²*Uman National University*

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF ACCUMULATION OF METHANE-PRODUCING MICROORGANISMS IN AN ANAEROBIC BIOFILTER

Summary

The article presents the development and theoretical substantiation of a mathematical model describing the process of accumulation of methanogenic microorganisms in an anaerobic biofilter integrated into a biogas reactor. The relevance of the study is обусловлена необхідністю підвищення енергетичної ефективності та стабільності роботи біогазових установок, що переробляють manure-based organic waste, where biomass washout and insufficient microbial retention often limit methane productivity. The proposed model is based on kinetic relationships derived from Monod-type equations and extended to incorporate biomass attachment and growth on carrier surfaces within the biofilter structure. The interaction between substrate loading rate, initial organic matter concentration, hydraulic retention time, and structural parameters of the carrier elements is analytically described. Particular attention is paid to the influence of effective surface area and accumulated active biomass thickness on the methane formation rate. A dynamic representation of the anaerobic digestion process is formulated, enabling quantitative evaluation of changes in biogas production intensity under varying operational conditions. The model demonstrates that increasing the specific surface area of the biofilter and optimizing loading dosage significantly enhances microbial concentration within the reactor, reduces biomass washout, and stabilizes methane yield. The obtained results provide a scientific basis for improving the design and operational control of anaerobic digesters equipped with biofilters. Implementation of the developed modeling approach contributes to increased energy efficiency, higher methane productivity, and improved sustainability of agricultural biogas systems operating within a circular bioeconomy framework.

Keywords: anaerobic digestion, methanogenic microorganisms, biofilter, mathematical modeling, methane production, biomass retention, process intensification.



ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-2-18>

УДК 641.5:640.432:005.7

С. С. Андреева, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-2981-481X

С. Л. Юрченко, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-1286-081X

В. В. Гербін, здобувач вищої освіти

Державний біотехнологічний університет

e-mail: svetana783@ukr.net

ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА ОРГАНІЗАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО АДАПТАЦІЇ ТРАДИЦІЙНИХ СТРАВ У СИСТЕМІ РЕСТОРАННОЇ ІНДУСТРІЇ

Анотація. У статті досліджено особливості адаптації традиційних страв до умов функціонування закладів ресторанної індустрії різних форматів. Проаналізовано вплив сучасних гастрономічних тенденцій на трансформацію рецептур і технологічних процесів. Визначено основні напрями адаптації, зокрема модифікацію рецептур, оптимізацію технологій, зміну подачі та розширення асортименту. Обґрунтовано практичне значення адаптації традиційних страв як чинника підвищення конкурентоспроможності закладів і збереження гастрономічної спадщини. Розглянуто приклади адаптації традиційних страв у різних форматах закладів ресторанного господарства. Встановлено доцільність використання інноваційних технологій при збереженні автентичних властивостей кулінарної продукції.

Ключові слова: традиційні страви, ресторанна індустрія, адаптація, технологія приготування, кулінарна продукція, формати закладів.

Постановка проблеми. Ресторанна індустрія є однією з найбільш динамічних сфер економіки, що активно розвивається під впливом змін споживчих уподобань, технологічного прогресу та глобалізації гастрономічної культури. У сучасних умовах спостерігається зростання попиту на поєднання традиційних кулінарних рішень із інноваційними підходами до виробництва та подачі страв. У цих умовах традиційні страви, які є важливою складовою національної спадщини, потребують адаптації до сучасних вимог ринку та різних форматів закладів ресторанного господарства [1, с. 12].

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення конкурентоспроможності закладів ресторанної індустрії шляхом впровадження адаптованих традиційних страв, що відповідають сучасним тенденціям здорового харчування, швидкості обслуговування та естетики подачі. Водночас важливим завданням є збереження автентичності кулінарної продукції, що формує гастрономічну ідентичність та культурну цінність національної кухні.

Проблема полягає у необхідності збереження автентичності традиційних страв при одночасному їх пристосуванні до сучасних технологій виробництва, швидкості обслуговування та очікувань споживачів [2, с. 34]. Це потребує комплексного підходу, який враховує як технологічні, так і організаційні аспекти функціонування закладів ресторанного господарства.

Наукова новизна дослідження полягає у систематизації підходів до адаптації традиційних страв з урахуванням специфіки різних форматів закладів ресторанної індустрії, а також у визначенні взаємозв'язку між технологічними змінами рецептур, форматом закладу та споживчими очікуваннями. Це дозволяє сформулювати цілісне уявлення про механізми інтеграції традиційної кулінарної спадщини у сучасний гастрономічний простір.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання технології продукції ресторанного господарства та адаптації традиційних страв висвітлюються у працях багатьох науковців. Зокрема, у роботах В. Г. Захарчука розглянуто основи технології кулінарної продукції та організації виробничих процесів [1, с. 78].

Сучасні дослідження свідчать, що інновації в ресторанному господарстві спрямовані на модернізацію технологій та розширення асортименту продукції [3, с. 41]. Окремі автори наголошують на необхідності інтеграції традиційної кухні у сучасні ресторани концепції як фактору конкурентоспроможності [4, с. 52].

Значну увагу науковці приділяють впровадженню інноваційних технологій у ресторанному господарстві. Зокрема, інновації охоплюють не лише нові методи приготування страв, але й використання сучасного обладнання, цифрових технологій, автоматизації процесів та нових форм організації обслуговування, що сприяє підвищенню ефективності діяльності закладів [3, с. 41].

Окремий напрям досліджень пов'язаний із модернізацією традиційних рецептур. Науковці зазначають, що використання нових видів сировини, функціональних інгредієнтів та альтернативних способів теплової обробки дозволяє не лише зберегти автентичні властивості страв, але й підвищити їх харчову та біологічну цінність.

Водночас дослідники підкреслюють необхідність адаптації технологічних процесів до сучасних умов функціонування ресторанного бізнесу, зокрема скорочення часу приготування, стандартизації виробництва та впровадження інноваційного обладнання. Це особливо актуально для різних форматів закладів ресторанного господарства, які мають відмінні вимоги до організації виробництва та обслуговування.

Разом з тим питання системної адаптації традиційних страв до різних форматів закладів ресторанної індустрії залишається недостатньо дослідженим [5, с. 63].

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою статті є дослідження особливостей адаптації традиційних страв до умов функціонування закладів ресторанної індустрії різних форматів.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання:

- проаналізувати формати закладів ресторанного господарства;
- визначити напрями адаптації традиційних страв;
- дослідити технологічні зміни рецептур;
- обґрунтувати практичне значення адаптації традиційних страв.

Основна частина. Сучасна ресторанна індустрія представлена різними форматами закладів (рис. 1), кожен з яких має свої технологічні та організаційні особливості.



Рис. 1. Характеристика основних форматів закладів ресторанного господарства

Заклади швидкого обслуговування (QSR) характеризуються стандартизацією меню та мінімальним часом приготування, що передбачає використання напівфабрикатів [2, с. 37].

Формат *casual dining* орієнтований на поєднання якості та доступності, з використанням традиційних технологій приготування [3, с. 44].

Fine dining передбачає високий рівень сервісу, авторські страви та складні технологічні процеси [4, с. 55].

Адаптація традиційних страв до умов сучасної ресторанної індустрії є комплексним процесом, що передбачає трансформацію як рецептурного складу, так і технології приготування, організації виробництва та способів подачі кулінарної продукції. З огляду на зростання конкуренції на ринку ресторанних послуг, а також зміну споживчих уподобань, адаптація традиційних страв спрямована на забезпечення балансу між збереженням автентичності та впровадженням інноваційних підходів [3, с. 44].

Основні напрямки адаптації традиційних страв наведено на рис. 2.



Рис. 2. Основні напрями адаптації традиційних страв

Модифікація рецептур. Даний напрям передбачає зміну складу інгредієнтів традиційних страв з метою підвищення їх харчової та біологічної цінності, а також відповідності сучасним принципам здорового харчування. Зокрема, здійснюється зниження вмісту жирів, цукру та солі, використання альтернативних компонентів (рослинних замінників, безглутенових інгредієнтів, функціональних добавок), а також впровадження локальних і сезонних продуктів [5, с. 66]. Такий підхід дозволяє зберегти характерні органолептичні властивості страв і водночас зробити їх більш привабливими для сучасного споживача.

Оптимізація технологічних процесів. Оптимізація технології приготування спрямована на скорочення тривалості виробничого циклу, підвищення продуктивності праці та забезпечення стабільної якості готової продукції. Це досягається шляхом стандартизації технологічних операцій, використання напівфабрикатів високого ступеня готовності, впровадження сучасного теплового обладнання та інноваційних методів обробки сировини (су-від, шокове охолодження тощо) [2, с. 39]. Особливого значення цей напрям набуває у закладах швидкого обслуговування, де час приготування є критичним фактором.

Зміна формату подачі страв. Сучасні тенденції розвитку ресторанної індустрії передбачають значну увагу до естетики подачі кулінарної продукції. Традиційні страви адаптуються

шляхом використання нових способів сервірування, індивідуального порціонування, використання сучасного посуду та дизайнерських елементів оформлення [6, с. 28]. У закладах високого рівня (fine dining) це проявляється у вигляді авторської презентації страв, тоді як у форматах fast casual і QSR – у зручності споживання та мобільності подачі.

Розширення асортименту. Адаптація традиційних страв також передбачає створення нових варіацій на основі класичних рецептів. Це може включати зміну начинок, поєднання інгредієнтів різних кухонь (ф'южн-підхід), розроблення сезонних або авторських версій страв [7, с. 47]. Такий підхід дозволяє не лише урізноманітнити меню, але й підвищити інтерес споживачів до традиційної кухні в сучасній інтерпретації.

Адаптація традиційних страв є багатовекторним процесом, що охоплює як технологічні, так і організаційні аспекти діяльності закладів ресторанного господарства. Її ефективна реалізація сприяє підвищенню конкурентоспроможності підприємств, задоволенню потреб споживачів та збереженню національної кулінарної спадщини [4, с. 53]. Приклади адаптації традиційних страв у ЗРГ, наведено в таблиці 1.

Представлені приклади демонструють, що трансформація може здійснюватися як через зміну рецептурного складу, так і шляхом удосконалення технологічних процесів приготування. Особливу увагу приділено зниженню калорійності страв, використанню альтернативних інгредієнтів та впровадженню більш ефективних способів теплової обробки. Крім того, простежується тенденція до розширення асортименту за рахунок створення нових варіацій традиційних страв.

Таблиця 1

Приклади адаптації традиційних страв у ЗРГ

№	Традиційна страва	Напряма адаптації	Формат закладу	Приклад адаптації
1	Борщ	оптимізація технології	QSR / casual	використання концентрованих бульйонів, порційна подача
2	Вареники	розширення асортименту	casual / fine	гарбуз–рікота–мед; шпинат–фета–горіхи; лосось–крем-сир
3	Деруни	модифікація рецептур	casual	запікання; додавання кабачка, батату, сиру, грибів
4	Голубці	модифікація рецептур	casual / fine	булгур, кіноа, гриби, рослинний фарш
5	Салат «Олів'є»	модифікація рецептур	усі формати	йогуртовий або авокадо-соус
6	Котлета по-київськи	модифікація рецептур	casual / fine	паніровка з висівок, насіння, горіхів
7	Узвар	зміна подачі	casual / fine	холодна подача, узвар-коктейлі
8	Сирники	модифікація рецептур	casual	запікання, додавання ягід, насіння чіа
9	Млинці	розширення асортименту	QSR / casual	різні види борошна, н/ф тіста тривалого зберігання
10	Холодець	зміна подачі	fine	порційна подача у вигляді закусок
11	Квас	зміна формату	QSR / casual	крафтовий квас, коктейлі на основі квасу
12	Вареники десертні	розширення асортименту	casual / fine	шоколад–вишня, сир–лаванда, карамель–яблуко

Важливим напрямом є також зміна формату подачі, що підвищує естетичну привабливість продукції та відповідає сучасним гастрономічним трендам. У цілому, наведені приклади підтверджують доцільність комплексного підходу до адаптації традиційної кулінарної спадщини.

Одним із ключових напрямів адаптації традиційних страв у сучасній ресторанній індустрії є трансформація технологій приготування та рецептурного складу. Зазначені зміни спрямовані на підвищення ефективності виробничих процесів, покращення харчової цінності продукції та відповідність сучасним вимогам споживачів щодо якості й безпечності харчування.



Сучасні технологічні підходи передбачають як оптимізацію класичних процесів, так і впровадження інноваційних методів кулінарної обробки. Зокрема, при приготуванні борщу можливе використання концентрованих бульйонів, вакуумованих напівфабрикатів та попередньо підготовлених овочевих сумішей, що дозволяє суттєво скоротити тривалість виробничого циклу без значної втрати органолептичних властивостей страви [1, с. 91].

Вареники, як традиційна страва, можуть бути модернізовані не лише за рахунок введення нових начинок, але й шляхом удосконалення технології тіста (застосування безглютенових сумішей, збагачення білковими компонентами, використання технологій швидкого заморожування). Це сприяє підвищенню харчової цінності продукції та розширенню можливостей її використання у різних форматах закладів ресторанного господарства [3, с. 49].

Адаптація дерунів передбачає застосування альтернативних способів теплової обробки, таких як запікання, приготування у пароконвекційних печах або використання комбінованих методів обробки. Це дозволяє знизити вміст жиру у готовому продукті та зробити страву більш відповідною принципам здорового харчування.

Крім того, важливим аспектом є впровадження сучасного технологічного обладнання (пароконвектомати, шокові охолоджувачі, вакуумні пакувальники), що забезпечує стабільність якості продукції та можливість стандартизації виробничих процесів [2, с. 42]. Використання напівфабрикатів високого ступеня готовності та технологій попередньої підготовки сировини також сприяє підвищенню продуктивності праці та оптимізації витрат часу.

Особливу увагу слід приділити впровадженню інноваційних кулінарних технологій, таких як су-від, низькотемпературна обробка, шокове заморожування, що дозволяють зберегти природні властивості інгредієнтів, покращити текстуру та підвищити харчову цінність страв [4, с. 57].

Таким чином, технологічні зміни рецептур традиційних страв є необхідною умовою їх адаптації до сучасних умов функціонування ресторанної індустрії. Вони забезпечують поєднання традиційних смакових характеристик із інноваційними підходами до виробництва кулінарної продукції, що підвищує конкурентоспроможність закладів та задовольняє потреби сучасного споживача [5, с. 70].

Адаптація традиційних страв до сучасних умов функціонування закладів ресторанної індустрії має важливе практичне значення та є одним із ключових чинників підвищення ефективності діяльності підприємств галузі. В умовах зростаючої конкуренції та динамічних змін споживчих уподобань саме впровадження адаптованих кулінарних продуктів дозволяє закладам ресторанного господарства формувати унікальну концепцію та забезпечувати стабільний попит на продукцію. Практичне значення адаптації традиційних страв наведено на рис. 3.

Рисунок демонструє, що адаптація має комплексний характер і охоплює як технологічні, так і економічні, соціокультурні та організаційні складові діяльності закладів ресторанного господарства.

Зокрема, відображено, що адаптація сприяє підвищенню конкурентоспроможності закладів за рахунок поєднання автентичності традиційної кухні з сучасними гастрономічними тенденціями та інноваційними технологіями. Водночас вона забезпечує розширення та оновлення асортименту меню, що дозволяє задовольнити потреби різних категорій споживачів, зокрема прихильників здорового або функціонального харчування.

Важливим аспектом є оптимізація виробничих процесів, яка передбачає скорочення тривалості приготування страв, зменшення витрат сировини та енергоресурсів, а також стандартизацію технологічних операцій, що забезпечує стабільну якість продукції.

Поряд із цим адаптація позитивно впливає на економічну ефективність діяльності підприємств, оскільки впровадження сучасних технологій і напівфабрикатів сприяє зниженню собівартості продукції та підвищенню рентабельності.

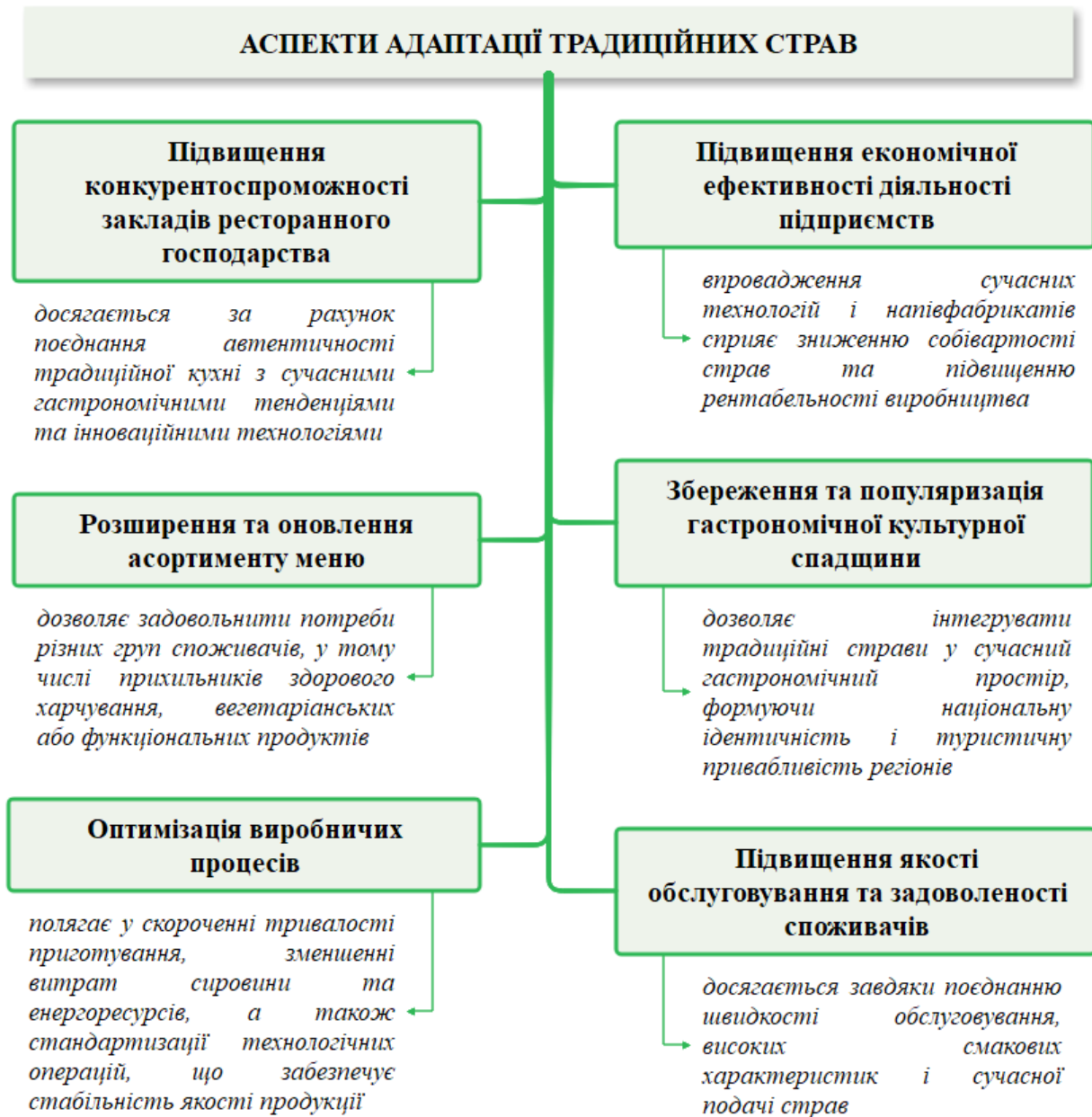


Рис. 3. Аспекти адаптації традиційних страв у ресторанній індустрії

Окремо у рисунку підкреслено значення адаптації для збереження та популяризації гастрономічної культурної спадщини, що дозволяє інтегрувати традиційні страви у сучасний гастрономічний простір і формувати національну ідентичність.

Висновки. У результаті проведеного дослідження досягнуто поставлену мету та виконано визначені завдання.

Зокрема, у ході дослідження проаналізовано особливості функціонування основних форматів закладів ресторанного господарства, таких як QSR, casual dining та fine dining, що відрізняються рівнем сервісу, організацією виробництва та вимогами до технологій приготування страв.

Визначено основні напрями адаптації традиційних страв, серед яких ключовими є модифікація рецептур, оптимізація технологічних процесів, зміна способів подачі та розширення асортименту. Встановлено, що ці напрями забезпечують можливість поєднання традиційної кулінарної спадщини з сучасними гастрономічними тенденціями.



Досліджено технологічні зміни рецептур традиційних страв, які включають використання інноваційних методів обробки сировини, альтернативних інгредієнтів та сучасного обладнання. Доведено, що такі зміни сприяють скороченню часу приготування, підвищенню харчової цінності продукції та стабільності її якості.

Обґрунтовано практичне значення адаптації традиційних страв, що проявляється у підвищенні конкурентоспроможності закладів ресторанного господарства, розширенні асортименту меню, оптимізації виробничих процесів та збереженні гастрономічної культурної спадщини.

Таким чином, результати дослідження підтверджують доцільність комплексного підходу до адаптації традиційних страв та визначають перспективи подальшого розвитку ресторанної індустрії на засадах поєднання традицій та інновацій.

Список використаних джерел

1. Захарчук В. Г., Кунділовська Т. А., Гайдукович Г. Є. Технологія продукції ресторанного господарства : навч. посіб. Одеса : Атлант, 2016. 320 с.
2. Медведєв С. В., Булдаков О. В., Якименко-Терещенко Н. В. Інноваційні технології в закладах ресторанного господарства. Харків : ХДУХТ, 2023. 256 с.
3. Дишкантюк О. В., Власюк К. В., Тітомир Л. А. Інновації в ресторанному господарстві: адаптація технологій харчування до сучасних вимог. Київ : НУХТ, 2023. 198 с.
4. Івашина Л. О., Куракін О. В., Бишовець Л. М. Тенденції запровадження сучасних технологій харчування для ресторанних послуг. *Наукові праці НУХТ*. 2025. Т. 31, № 2. С. 45–52.
5. Ляхович П. С., Бондаренко О. В., Ковальчук І. М. Адаптація технології стародавніх кондитерських виробів у ресторанному господарстві. *Харчова наука і технологія*. 2024. № 3. С. 60–68.
6. Церклевич В. С., Діль Г. В. Модерна інтерпретація старовинних рецептів у концепції ресторану «Local food». *Ресторанний і готельний бізнес*. 2024. № 1. С. 25–32.
7. Васільєва В. О., Сильчук Т. І. Інноваційні підходи організації споживання ресторанної продукції. *Вісник ХДУХТ*. 2024. № 2. С. 30–36.
8. Spence S. Multisensory Flavor Perception. *Cell*. 2015. Vol. 161(1). P. 24–35.
9. Sloan A. E. Top 10 Food Trends. *Food Technology*. 2024. Vol. 78(4). P. 20–38.
10. Kotschevar L., Withrow D. Management by Menu. 5th ed. Wiley, 2008. 320 p.
11. Cousins J., Lillicrap D., Weekes S. *Food and Beverage Service*. 9th ed. Hodder Education, 2014. 400 p.
12. Walker J. R. The Restaurant: From Concept to Operation. 8th ed. Wiley, 2021. 720 p.
13. Harrington R. J. Defining Gastronomic Identity: The Impact of Environment and Culture on Prevailing Components, Texture and Flavors in Wine and Food. *Journal of Culinary Science & Technology*. 2005. Vol. 4(2–3). P. 129–152.
14. Fields K. Demand for the Gastronomy Tourism Product: Motivational Factors. *Tourism and Gastronomy*. Routledge, 2002. P. 36–50.
15. International Culinary Federation. The Professional Chef. 9th ed. Wiley, 2011. 1232 p.

Дата першого надходження статті до видання: 05.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 25.05.2026

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





S. Andrieieva, S. Yurchenko, V. Herbin

State Biotechnological University

TECHNOLOGICAL AND ORGANIZATIONAL APPROACHES TO THE ADAPTATION OF TRADITIONAL DISHES IN THE RESTAURANT INDUSTRY

Summary

The article examines the features of adapting traditional dishes to the conditions of functioning of restaurant establishments of various formats. The influence of modern gastronomic trends on the transformation of recipes and technological processes is analyzed. The main directions of adaptation are identified, including recipe modification, optimization of technologies, changes in presentation, and expansion of the assortment. The practical significance of adapting traditional dishes as a factor in increasing the competitiveness of establishments and preserving gastronomic heritage is substantiated. Examples of adaptation of traditional dishes in different formats of restaurant establishments are considered. The expediency of using innovative technologies while preserving the authentic properties of culinary products is established.

Keywords: Traditional dishes, restaurant industry, adaptation, cooking techniques, culinary products, restaurant formats.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-2-19>

УДК 613.292:615.322:001.892

В. В. Атанасова, канд. техн. наук

О. Б. Чабанова, канд. техн. наук

К. О. Білик, фахівець з харчування

В. С. Атанасова, здобувачка вищої освіти

*Одеський національний технологічний університет*e-mail: vitaatanasova@gmail.com

ORCID: 0000-0002-7560-5202

ORCID: 0000-0002-1455-2987

ORCID: 0009-0006-4173-1995

ТЕХНОЛОГІЯ ПРОДУКЦІЇ З РОСЛИННИМИ АДАПТОГЕНАМИ ДЛЯ ЗАКЛАДІВ РЕСТОРАННОГО ГОСПОДАРСТВА

Анотація. У статті розглянуто доцільність використання рослинних адаптогенів, зокрема порошку кореня ашваганди, у технології харчових продуктів для нівелювання наслідків хронічного стресу. Метою дослідження було розроблення рецептур інноваційного здобного печива та встановлення впливу нетрадиційної сировини на показники якості готового продукту.

У роботі використано комбінації пшеничного борошна з кунжутним, соняшниковим та соєвим борошном у співвідношенні 50/50, а також додавання пшеничних висівок та порошку ашваганди. Для забезпечення стабільної структури застосовано метод попереднього заморожування напівфабрикатів.

Встановлено, що розроблені зразки («Халва-шоколад», «Фісташка-вишня», «Брауні-чизкейк» та «Мак-лимон») за вмістом білка у 1,5–2 рази перевищують показники контрольного печива, а вміст клітковини зріс у 4–5 разів. Зафіксовано високу концентрацію мінеральних речовин: рівень магнію та цинку в окремих зразках покриває понад 20 % добової потреби. Фізико-хімічні дослідження підтвердили відповідність виробів вимогам ДСТУ 3781:2014, зокрема масова частка вологи не перевищує 15,5 %, а показник рН варіюється від 4,5 до 6,0 залежно від наповнювача.

Практичне значення роботи полягає у створенні конкурентоспроможних функціональних десертів із високою біологічною цінністю, що можуть бути впроваджені на підприємствах харчової промисловості та в закладах ресторанного господарства для підтримки психоемоційного здоров'я населення.

Ключові слова: адаптогени, ашваганда, здобне печиво, кунжутне борошно, соняшникове борошно, харчова цінність, антистресові властивості, магній, вітаміни групи В, показники якості.

Постановка проблеми. За висновками міжнародних експертів, хронічний стрес став невід'ємним фактором повсякденності українців, що провокує розвиток широкого спектра психосоматичних розладів, серцево-судинних патологій та порушень обміну речовин. Проте особливої уваги потребує зміна харчової поведінки як відповідь на тривалу дію стресорів: зростає тенденція до «емоційного харчування» [1], коли споживання їжі використовується як механізм психологічної компенсації та миттєвого зниження тривожності.

Найбільш затребуваною групою продуктів у такі періоди стають солодкі страви, що пояснюється нейробіологічною реакцією мозку на поєднання жирів та вуглеводів, яке стимулює систему винагороди [2–5]. Однак традиційна рецептура таких виробів характеризується високим вмістом рафінованих інгредієнтів, «порожніми» калоріями та критично низьким вмістом мікронутрієнтів.

Наукові дані свідчать, що за умов стресу організм стрімко втрачає магній [6], а нестача вітамінів В1 та В6 порушує синтез серотоніну й дофаміну. Це створює парадоксальну ситуацію: людина споживає продукт для заспокоєння, але через дефіцит есенціальних речовин (магнію, цинку, вітамінів групи В) лише поглиблює виснаження нервової системи.



Актуальним завданням харчової технології стає трансформація десертів у функціональні продукти з антистресовими властивостями. Використання рослинних адаптогенів (зокрема ашваганди) у комбінації з нетрадиційними видами борошна дозволяє створювати вироби спрямованої біологічної дії. Такі продукти здатні знижувати рівень кортизолу та підтримувати адаптаційні резерви організму без побічних ефектів.

Аналіз останніх досліджень. Сучасні наукові дослідження підтверджують роль мікронутрієнтів у регуляції функціонального стану нервової системи та адаптаційних можливостей організму.

Магній бере участь у понад 300 ферментативних реакціях, забезпечує стабільність клітинних мембран, регуляцію нервової провідності та скорочення м'язів [7]. У дорослому організмі міститься близько 25 г магнію, більша частина якого локалізована в кістковій тканині та м'яких тканинах, а його гомеостаз регулюється переважно нирками [8].

Дефіцит магнію асоціюється з підвищеною нервовою збудливістю, депресивними станами, аритміями та гіпертонією [7]. Хоча рекомендована добова норма споживання становить 400 мг для чоловіків та 350 мг для жінок [9], значна частина населення не досягає цих показників. Це зумовлено високим рівнем споживання оброблених продуктів, використанням демінералізованої води та сільськогосподарськими практиками, що призводять до збіднення ґрунтів [8].

Найбільш багатими на магній є насіння, горіхи, бобові та зелені листові овочі [10]. Однак рафінування та промислова обробка зернових культур суттєво знижують вміст елемента через видалення частин зерна, що містять основну кількість мінералів. Враховуючи, що організм засвоює в середньому лише 30–40 % магнію, під час формування раціону важливо зважати не лише на загальну кількість нутрієнту, а й на його біодоступність [9].

Цинк забезпечує каталізаторну, структурну та регуляторну функції, впливаючи на гомеостаз, імунну відповідь і процеси клітинного старіння. Його дефіцит асоціюється з розвитком атеросклерозу, онкологічних, неврологічних патологій та вікових дегенеративних порушень [11]. Недостатнє надходження мікроелемента посилює запальні реакції та погіршує перебіг хронічних захворювань. Основними джерелами цинку є м'ясо, морепродукти, горіхи та злакові культури. При цьому значна концентрація цинку в гарбузовому насінні та сої характеризується зниженою біодоступністю через наявність фітатів.

Вітаміни групи В – це есенціальні водорозчинні мікронутрієнти, що регулюють енергетичний обмін, метаболізм амінокислот та функціонування нервової системи. Оскільки організм не здатний синтезувати ці сполуки самостійно, їхнє регулярне надходження має забезпечуватися виключно через раціон.

Вітаміни В1, В6 та В12 мають важливе значення для нервової діяльності, а їхній дефіцит призводить до тяжких неврологічних розладів та когнітивних порушень. Тіамін (В1) забезпечує передачу нервових імпульсів, тоді як піридоксин (В6) необхідний для синтезу нейротрансмітерів та підтримки здоров'я мозку через регуляцію обміну гомоцистеїну

Важливим напрямом сучасних досліджень є застосування адаптогенів – сполук, здатних підвищувати неспецифічну резистентність організму до впливу несприятливих факторів, нормалізувати фізіологічні функції незалежно від характеру порушень і не викликати негативних побічних ефектів [12–14].

Традиції інтеграції таких рослин у щоденний раціон налічують тисячоліття: від аюрведичних напоїв в Індії до цілющих чаїв у країнах Месопотамії [15]. Сьогодні зростаючий попит на функціональну їжу змушує виробників шукати інгредієнти, що поєднують у собі користь та технологічну стабільність.

Серед розмаїття рослинної сировини особливої уваги заслуговує ашваганда (*Withania somnifera*). Її екстракти мають не лише виражені антистресові, а й антиоксидантні та анти-

мікробні властивості, що дозволяє не тільки підвищувати харчову цінність, а й покращувати збереження готових виробів [16, 17].

Актуальність розробки харчових виробів із ашвагандою підтверджується динамікою світового ринку. У 2024 році обсяг сегменту адаптогенів сягнув 10,89 млрд доларів, де ашваганда впевнено займає лідируючу позицію (понад 38 % частки ринку) [18–20].

Сучасні споживачі, особливо в Європі та США, все частіше обирають функціональні перекуси та напої як частину стратегії підтримки психічного здоров'я. Враховуючи, що кожен інвестований у благополуччя працівників долар приносить чотирикратний прибуток через підвищення продуктивності [19], створення доступних функціональних десертів на основі ашваганди є обґрунтованим і перспективним кроком.

Формулювання мети статті. Метою дослідження є розробка функціонального печива, збагаченого адаптогенами та біоактивними компонентами, здатних знижувати рівень стресу та сприяти покращенню психоемоційного стану людини. Для досягнення цієї мети передбачено експериментальне створення рецептур, аналіз їхнього хімічного складу, визначення харчової цінності та визначення відповідності виготовлених зразків печива нормативним фізико-хімічним показникам за ДСТУ 3781:2014 «Печиво. Загальні технічні вимоги».

Основна частина. Оцінювання якості удосконаленої продукції здійснювали шляхом дослідження органолептичних показників: зовнішній вигляд, консистенція, колір, смак і запах. Оцінювання здійснювалося для чотирьох зразків, які відрізняються співвідношенням видів борошна (пшеничне, кунжутне, соняшникове, соєве), типом і кількістю начинки, що впливало на текстуру, вологоутримання та смакові властивості готового виробу.

У процесі виготовлення зразків печива було застосовано комбінування різних видів борошна, зокрема пшеничного у поєднанні з соняшниковим, кунжутним або соєвим у співвідношенні 50/50. Такий підхід дозволив підвищити харчову цінність продукції та сформувані специфічні структурні властивості тіста. Важливим технологічним етапом стало попереднє заморожування напівфабрикатів, що сприяло збереженню геометрії виробів і стабілізації структури під час випікання.



Рис. 1. Загальний вигляд готових зразків печива

Аналіз органолептичних властивостей (табл. 1) показав відмінності між окремими зразками, що зумовлено рецептурними особливостями.



Таблиця 1

Органолептичні показники зразків печива

Показник	Характеристика				
	Печив здобне з начинкою (контроль)	Халва-шоколад (1)	Фісташка-вишня (2)	Брауні-чизкейк (3)	Мак-лимон (4)
Форма	Правильна, відповідає назві виробу; краї рівні, без вм'ятин чи пошкоджень.	Правильна, без вм'ятин.	Правильна, без вм'ятин.	Правильна, без вм'ятин.	Правильна, без вм'ятин.
Поверхня	Рівна, без підгорілостей чи тріщин; Оздоблення відповідає рецептурі. Допускається наявність слідів начинки.	Рівна, не підгоріла, з тріщинами; видимі вкраплення чорного шоколаду.	Рівна, не підгоріла, з тріщинами; помітні вкраплення фісташок.	Рівна, не підгоріла, з тріщинами.	Рівна, не підгоріла, з невеликими тріщинами.
Колір	Властивий даному виду печива; рівномірний, від світлих до темніших відтінків. Більш насичене забарвлення країв і денця.	Рівномірний, із більш насиченим відтінком по краях.	Рівномірний, із більш насиченим відтінком по краях.	Насичений темно-коричневий, рівномірний.	Рівномірний, із більш насиченим відтінком по краях.
Смак та запах	Характерні для здобного печива цього виду; чисті, без сторонніх присмаків і запахів.	Виражений горіхово-насіньевий присмак;	виражений горіховий присмак фісташок, збалансований кисло-сол.;	Виражений смак шоколаду у поєднанні з сирно-шоколадною начинкою;	Легкий присмак лимону у поєднанні з сирно-маковою начинкою;
Вигляд у розламі	Структура пориста, допускається нерівномірність та наявність дрібних порожнин. Виріб добре пропечений. Начинка рівномірно розташована в товщі печива, не виступає за краї; консистенція начинки однорідна, без грудочок.	Рівномірна пористість; тісто крихке, добре пропечене; начинка однорідної консистенції.	Рівномірна пористість; тісто крихке, добре пропечене; начинка однорідна.	Структура рівномірна та щільна; тісто добре пропечене, з помірною пружністю; начинка однорідна, без грудочок.	Рівномірна пористість; тісто м'яке, добре пропечене; начинка однорідної консистенції.
Вигляд у розламі	Структура пориста, допускається нерівномірність та наявність дрібних порожнин. Виріб добре пропечений. Начинка рівномірно розташована в товщі; консистенція начинки однорідна, без грудочок.	Рівномірна пористість; тісто крихке, добре пропечене; начинка однорідної консистенції.	Рівномірна пористість; тісто крихке, добре пропечене; начинка однорідна.	Структура рівномірна та щільна; тісто добре пропечене, з помірною пружністю; начинка однорідна, без грудочок.	Рівномірна пористість; тісто м'яке, добре пропечене; начинка однорідної консистенції.

Підвищена крихкість зразка «Халва-шоколад» зумовлена значним вмістом жирів та слабкими клейковинними властивостями насінневого борошна. Специфічний і збалансований смак печива «Фісташка-вишня» формується завдяки поєднанню горіхової сировини з органічними кислотами фруктової начинки.

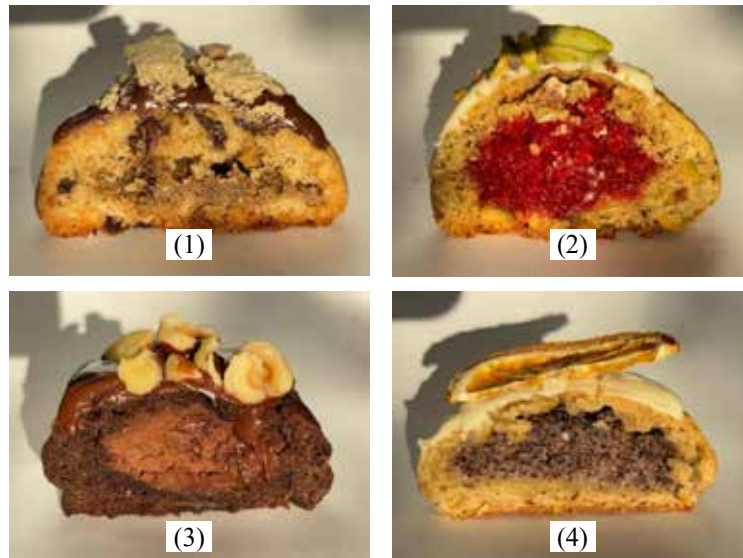


Рис. 2. Внутрішня структура та вигляд на розрізі дослідних зразків печива: 1 – «Халва-шоколад»; 2 – «Фісташка-вишня»; 3 – «Брауні-чизкейк»; 4 – «Мак-лимон»



Рис. 3. Профілограма органолептичних показників виготовлених зразків печива



Рис. 4. Зовнішній вигляд та варіанти оздоблення розроблених зразків печива



У «Брауні-чизкейку» насичений шоколадний смак обумовлений високим вмістом какао-продуктів, тоді як додавання порошку ашваганди до сирної начинки вплинуло на її консистенцію та підкреслило щільність структури. Найніжніша текстура у зразку «Мак-лимон» пояснюється співвідношенням жирних компонентів та використанням макової сировини, яка не знижує еластичність тіста, а лимонний наповнювач формує легкий кислуватий акцент.

Узагальнюючи результати, можна зазначити, що всі представлені зразки відповідають вимогам до здобного печива. Водночас відмінності у структурі та смаку підтверджують доцільність використання нетрадиційних видів борошна та функціональних добавок з метою варіювання якості готової продукції.

У ході досліджень встановлено, що масова частка вологи в усіх зразках печива знаходиться в межах допустимих значень, передбачених ДСТУ 3781:2014, тобто не перевищує 15,5 %. Незначні коливання показників пояснюються різним вмістом жирних і білкових компонентів у рецептурах.

Таблиця 3

Масова частка вологи готових виробів з начинкою та без, %

Масова частка вологи, %:	Номер зразка			
	1	2	3	4
– з начинкою	9,4	11	10,8	11,8
– без начинки	11,8	8,6	10,4	10,4

Показник кислотності характеризує свіжість, хімічну стабільність і якість сировини, використаної у виробництві. У результаті дослідження встановлено, що кислотність усіх зразків печива перебуває на рівні, характерному для здобних виробів, і не виходить за межі нормативних вимог.

Таблиця 4

Кислотність готових виробів з начинкою та без, град

Кислотність, град:	Номер зразка			
	1	2	3	4
– з начинкою	4	1,6	3,2	2,2
– без начинки	1,6	2,2	2,8	2,2

Лужність печива відображає кількість залишкових лужних компонентів, що залишаються після випікання, згідно з ДСТУ 3781:2014 не має перевищувати 2,0 град. Показники зразків без начинки склали 2,0–2,2 град, а з начинкою – 2,4–2,6 град. Незначне відхилення у виробках із наповнювачем пов'язане з вищим дозуванням розпушувачів для стабілізації структури тіста в умовах підвищеної вологості.

Таблиця 5

Лужність готових виробів з начинкою та без, град

Лужність, град:	Номер зразка			
	1	2	3	4
– з начинкою	2,0	2,6	2,6	2,6
– без начинки	2,4	2,0	2,0	2,2

Показник рН є інтегральною характеристикою кислотньо-лужного стану продукту, що впливає на його мікробіологічну стійкість і смакові властивості. У досліджених зразках значення рН варіювали від 4,5 до 6,0:

1. Халва-шоколад рН = 6.



2. Фісташка-вишня рН = 5.
3. Брауні-чизкейк рН = 5.
4. Мак-лимон рН = 4,5.

Максимальний рівень рН характерний для зразка «Халва-шоколад» (рН = 6,0) внаслідок використання насінневого борошна, тоді як мінімальний зафіксовано у «Мак-лимон» (рН = 4,5) через вплив лимонного наповнювача. Отримані дані підтверджують стабільність технологічного процесу та відсутність деструктивних змін у складі виробів.

Порівняння інноваційних рецептур із контрольним зразком (рис. 5) засвідчило суттєве збагачення виробів білками, мінеральними речовинами та вітамінами. Такі зміни мають подвійне значення: з одного боку, вони підвищують харчову цінність продукції, а з іншого – формують функціональний ефект, який може позитивно впливати на психоемоційний стан споживачів.

Сировина, г	Маса сировини нетто, г	Білки, г	Жири, г	Вуглеводи, г	Клітковина, г	Цукор, г	Мінеральні речовини, мг						Вітаміни, мг					Триптофан	Алкоголь	Q, ккал
							Mg	Zn	Fe	Se (мкг)	K	Ca	B1	B6	B9 (мкг)	B12 (мкг)	A (мкг)			
РДНС (RDA / DV)	-	10% від 2000 ккал → -50 г/добу	На основі 2000 ккал, DV = 78 г/день	DV = 275 г (для 2000 ккал)	Жінки -25 г, чоловіки -28 г	-	320 мг – жінки ≥31 р, 420 мг – чоловіки ≥31 р	11 мг – жінки, чоловіки	18 мг – жінки 19-50 р, 8 мг – чоловіки	55 мкг для дорослих, UL = 400 мкг	2600 мг – жінки, 3400 мг – чоловіки (FDA DV = 4700 мг)	1000 мг – жінки, 1300 мг – DV, жінки 51+ р	1,2 мг – жінки, 1,1 мг – чоловіки	1,4 мг – жінки, 1,7 мг – чоловіки	RDA 400 мкг для дорослих; UL 1000 мкг	RDA 2,4 мкг, вітаміни B12 азаспирин для веганів	Чоловіки: 900 мкг, жінки: 700-770 мкг	Дорослі 3-6 мг/кг, діти 9 мг/кг, вагітні/годувальні 5-6 мг/кг	-	загальний енергетичний добушок в раціоні – близько 2000 ккал, під який розраховані %DV
<p>Пояснення скорочень: RDA Recommended Dietary Allowance DV Daily Value UL Upper Limit AI Adequate Intake Рекомендована добова доза – скільки потрібно для більшості людей Добова норма Верхня допустима межа безпечного споживання Адекватне споживання – коли немає достатньо даних для RDA</p>																				
Середнє РДНС	-	55	70	275	26	35	370	10	13	55	3000	1100	1,15	1,55	400	2,4	800	300	4	2000
ПЕЧИВО ЗДОБНЕ З НАЧИНКОЮ (КОНТРОЛЬ)																				
На порцію	65	4,00	11,8	44,7	1,2	18	6,50	-	0,52	-	55,2	14,9	0,06	-	-	-	85,8	-	-	293
Норма на день у %		7,27	16,9	16,3	4,62	51,4	1,76	-	4,00	-	1,84	1,35	5,22	-	-	-	10,7	-	-	14,7
ХАЛВА ШОКОЛАД (1)																				
На порцію	65	8,09	22,0	19,9	4,83	6,25	119,6	2,05	3,98	12,8	196	96,7	0,68	1,19	34,9	0,07	89,2	124	4	290
Норма на день у %		14,7	31,4	7,26	18,6	17,8	32,3	20,5	30,6	23,2	6,53	8,79	58,8	77,0	8,71	3,00	11,2	41,5	100	14,5
ФІСТАШКА-ВИШНЯ (2)																				
На порцію	65	5,71	13,0	31,1	4,46	0,83	54,5	1,34	2,43	6,73	152	51,1	0,10	0,38	12,1	0,07	70,4	76,2	4	256
Норма на день у %		10,4	18,6	11,3	17,2	-	14,7	13,4	18,7	12,3	5,07	4,65	8,70	24,5	3,03	2,92	8,80	25,4	100	12,8
БРАУНІ-ЧИЗКЕЙК (3)																				
На порцію	65	7,27	15,3	22,3	5,61	6,50	80,7	1,20	2,46	8,38	287	94,0	0,92	1,72	29,2	0,22	90,7	37,4	4	227
Норма на день у %		13,2	21,9	8,10	21,6	18,5	21,8	12,0	18,9	15,2	9,55	8,55	79,8	111	7,29	9,17	11,3	12,5	100	11,2
МАК-ЛИМОН (4)																				
На порцію	65	7,29	13,1	18,6	5,10	5,50	67,5	1,29	2,07	10,9	134	154	0,27	0,42	28,8	0,14	89,5	81,1	4	213
Норма на день у %		13,3	18,7	6,75	19,6	15,7	18,2	12,9	15,9	19,9	4,46	14,1	23,5	26,8	7,20	5,63	11,2	27,0	100	10,7

Рис. 5. Порівняльна характеристика харчової та біологічної цінності розроблених виробів у зіставленні з контрольним зразком

Дослідження підтвердили значне покращення нутрієнтного профілю розроблених виробів порівняно з контрольним зразком. Вміст білка у печиві «Халва-шоколад», «Брауні-чизкейк» та «Мак-лимон» зріс у 1,5–2 рази, що забезпечує організм триптофаном – попередником серотоніну, необхідним для регуляції настрою. Концентрація харчових волокон збільшилася у 4–5 разів, що опосередковано стабілізує емоційний стан через збалансовану роботу мікробіоти.

Мінеральна насиченість виробів також суттєво підвищилася: зразок «Халва-шоколад» покриває понад 20 % добової потреби у магнії та цинку, а «Брауні-чизкейк» і «Фісташка-вишня» збагачені залізом та селеном для антиоксидантного захисту. Високий вміст вітамінів групи В (B1, B6, B9, B12) сприяє адаптації організму до стресових навантажень.



Головним фактором функціональності є введення адаптогену ашваганди. Її синергічна взаємодія з магнієм і триптофаном посилює антистресовий ефект, дозволяючи класифікувати розроблене печиво як продукт цільового призначення для підтримки психоемоційного здоров'я.

Висновки. У ході дослідження було підтверджено доцільність створення функціонального печива, збагаченого адаптогенами та біоактивними речовинами. Проведений комплекс експериментів – від розробки рецептур до визначення органолептичних, фізико-хімічних та харчових показників – дозволив встановити, що інноваційна продукція відповідає вимогам ДСТУ 3781:2014 «Печиво. Загальні технічні вимоги» і може бути рекомендована до виробництва як виріб профілактичного харчування.

Часткова заміна пшеничного борошна на кунжутне, соняшникове та соєве у поєднанні з висівками забезпечила зростання вмісту білків, харчових волокон та мінеральних речовин. Це дозволило збалансувати амінокислотний склад і сформуванню стабільну структуру тіста з високими споживчими характеристиками.

Порівняльна оцінка підтвердила суттєве підвищення концентрації магнію, цинку, заліза, селену та вітамінів групи В у нових рецептурах порівняно з контролем. Науково обґрунтовано функціональну дію продукту: синергія ашваганди, магнію та триптофану посилює антистресовий ефект і сприяє стабілізації психоемоційного стану.

Розроблену технологію рекомендовано до впровадження на підприємствах харчової промисловості та в сегменті HoReCa. Подальші дослідження будуть спрямовані на вивчення стабільності біоактивних компонентів та встановлення термінів зберігання готової продукції.

Список використаних джерел

1. Gonzalez M. J., Miranda-Massari J. R. Diet and stress. *The Psychiatric Clinics of North America*. 2014. Vol. 37, No. 4. P. 579–589. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psc.2014.08.004>.
2. Sinha R. Role of addiction and stress neurobiology on food intake and obesity. *Biological Psychology*. 2018. Vol. 131. P. 5–13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2017.05.001>.
3. Geiker N. R. W. et al. Does stress influence sleep patterns, food intake, weight gain, abdominal obesity and weight loss interventions and vice versa? *Obesity Reviews*. 2018. Vol. 19, No. 1. P. 81–97. DOI: <https://doi.org/10.1111/obr.12603>.
4. Torres S. J., Nowson C. A. Relationship between stress, eating behavior, and obesity. *Nutrition*. 2007. Vol. 23, No. 11–12. P. 887–894. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nut.2007.08.008>.
5. Chao A. M. et al. Stress, cortisol, and other appetite-related hormones: prospective prediction of 6-month changes in food cravings and weight. *Obesity*. 2017. Vol. 25, No. 4. P. 713–720. DOI: <https://doi.org/10.1002/oby.21790>.
6. Pickering G. et al. Magnesium status and stress: the vicious circle concept revisited. *Nutrients*. 2020. Vol. 12, No. 12. Art. 3672. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu12123672>.
7. Gröber U., Schmidt J., Kisters K. Magnesium in prevention and therapy. *Nutrients*. 2015. Vol. 7, No. 9. P. 8199–8226. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu7095388>.
8. Olza J. et al. Reported dietary intake and adequacy of calcium, phosphorus, magnesium and vitamin D in the Spanish population. *Nutrients*. 2017. Vol. 9, No. 2. Art. 168. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu9020168>.
9. Grzebisz W. Magnesium – food and human health. *Journal of Elementology*. 2011. Vol. 16, No. 2. DOI: <https://doi.org/10.5601/jelem.2011.16.2.13>.
10. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service. *FoodData Central*. 2024. Available at: <https://fdc.nal.usda.gov>.
11. Chasapis C. T. et al. Zinc and human health: an update. *Archives of Toxicology*. 2012. Vol. 86, No. 4. P. 521–534. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00204-011-0775-1>.
12. Panossian A. G. et al. Evolution of the adaptogenic concept. *Medicinal Research Reviews*. 2021. Vol. 41, No. 1. P. 630–703. DOI: <https://doi.org/10.1002/med.21743>.
13. Panossian A. Adaptogens: tonic herbs for fatigue and stress. *Alternative & Complementary Therapies*. 2003. Vol. 9, No. 6. P. 327–331. DOI: <https://doi.org/10.1089/107628003322658610>.



14. Wagner H., Nörr H., Winterhoff H. Plant adaptogens. *Phytomedicine*. 1994. Vol. 1, No. 1. P. 63–76. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0944-7113\(11\)80025-5](https://doi.org/10.1016/S0944-7113(11)80025-5).
15. Shinde S. et al. Recent advancements in extraction techniques of Ashwagandha. *ACS Omega*. 2023. Vol. 8, No. 44. P. 40982–41003. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c03491>.
16. Sharma R., Sharma P., Bhardwaj R. Adaptogens: new age healing gems for physical wellbeing. *American Journal of Multidisciplinary Research and Development*. 2021. Vol. 3, No. 10. P. 26–35.
17. Landge U. B. et al. Preparation of Shrikhand using Ashwagandha powder as additive. *Journal of Dairying, Foods and Home Sciences*. 2011. Vol. 30. P. 79–84.
18. *Adaptogens market report*. Grand View Research. Available at: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/adaptogens-market-report> (дата звернення: 19.03.2025).
19. *US adaptogenic beverages market – 2024–2031*. DataM Intelligence. Available at: <https://www.marketresearch.com/DataM-Intelligence-4Market-Research-LLP-v4207/Adaptogenic-Beverages-39336283/> (дата звернення: 19.03.2025).
20. *Europe adaptogens market size & outlook, 2024–2030*. Grand View Research. Available at: <https://www.grandviewresearch.com/horizon/outlook/adaptogens-market/europe> (дата звернення: 19.03.2025).

Дата першого надходження статті до видання: 09.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 25.05.2026

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



V. Atanasova, O. Chabanova, K. Bilyk, V. Atanasova

Odesa National University of Technology

TECHNOLOGY OF FOOD PRODUCTS WITH PLANT ADAPTOGENS FOR THE RESTAURANT INDUSTRY

Summary

The article examines the feasibility of using plant adaptogens, in particular ashwagandha root powder, in food technology to mitigate the effects of chronic stress. The aim of the study was to develop formulations for innovative butter cookies and to determine the impact of non-traditional raw materials on the quality characteristics of the finished products.

The study employed combinations of wheat flour with sesame, sunflower, and soy flours in a 50/50 ratio, as well as the addition of wheat bran and ashwagandha powder. To ensure a stable structure, a method of pre-freezing semi-finished products was applied.

It was found that the developed samples (“Halva-Chocolate,” “Pistachio-Cherry,” “Brownie-Cheesecake,” and “Poppy-Lemon”) contained 1.5–2 times more protein compared to the control cookies, while the fiber content increased by 4–5 times. A high concentration of minerals was recorded: the levels of magnesium and zinc in certain samples cover more than 20 % of the daily requirement. Physicochemical analyses confirmed that the products comply with the requirements of DSTU 3781:2014; in particular, the moisture content does not exceed 15.5 %, and the pH value ranges from 4.5 to 6.0 depending on the filling.

The practical significance of the study lies in the development of competitive functional desserts with high biological value that can be implemented in confectionery production and the food service industry to support the psycho-emotional health of the population.

Keywords: adaptogens, ashwagandha, butter cookies, sesame flour, sunflower flour, food technology, functional ingredients, nutritional value, anti-stress properties, magnesium, B-group vitamins, quality indicators.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-2-20>

УДК 664.8:637.146:664.858

В. М. Бандура¹, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0001-8474-3020

М. Є. Сердюк¹, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-6504-4093

Т. О. Колісниченко², канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-0560-9520

¹Національний університет біоресурсів і природокористування України²Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: vbandura@nubip.edu.ua

РОЗРОБКА РЕЦЕПТУР МУСОВИХ ДЕСЕРТІВ НА ОСНОВІ МОЛОЧНОЇ ТА ЯГІДНОЇ СИРОВИНИ

Анотація. Метою дослідження була розробка рецептур мусових десертів на основі молочної та ягідної сировини зі зниженим вмістом цукру та оцінювання їх органолептичних і фізико-хімічних властивостей. Наукова новизна полягає в обґрунтуванні рецептурних рішень для мусових десертів із полуницею, малиною та чорною смородиною і заміною цукру на еритритол та інулін. Практична цінність роботи полягає у можливості створення десертів зі зниженим вмістом цукру без істотного погіршення споживчих властивостей. У результаті досліджень розроблено шість рецептур мусових десертів, проведено їх органолептичне оцінювання та аналіз фізико-хімічних показників. Встановлено, що найбільш прийнятними за сукупністю сенсорних властивостей були класичний полуничний мус з цукром і полуничний мус з природними цукрозамінниками. Показано, що модифікація рецептур сприяє зниженню вмісту жирів і цукрів. Мус із чорної смородини зі зниженим вмістом цукру характеризувався найвищою білковою та вітамінною цінністю.

Ключові слова: мусові десерти, ягідна сировина, еритритол, інулін, органолептична оцінка, фізико-хімічні показники, функціональні продукти.

Постановка проблеми. Сучасна харчова промисловість орієнтована на створення продуктів із підвищеною біологічною цінністю, натуральним складом і функціональними властивостями. Перспективним напрямом є виробництво мусових десертів на основі ягідної сировини, оскільки ягоди є джерелом вітаміну С, поліфенолів, антоціанів, органічних кислот і харчових волокон, що зумовлює їх високу харчову цінність і привабливі органолептичні властивості. Водночас мусові десерти належать до складних дисперсних систем, тому їх розробка потребує обґрунтованого вибору структуроутворювачів, стабілізаторів і технологічних параметрів для забезпечення стабільності структури та належної консистенції. Актуальність дослідження полягає у створенні нових десертних продуктів із використанням доступної локальної ягідної сировини та оптимізації їх рецептури і технології.

Аналіз останніх досліджень. Сучасний розвиток харчових технологій орієнтований на створення десертних продуктів із високою харчовою цінністю, натуральним складом і вираженими функціональними властивостями. У цьому контексті ягоди розглядаються як перспективна сировина для десертів завдяки високому вмісту поліфенолів, антоціанів, вітамінів, органічних кислот і харчових волокон. Огляди останніх років підкреслюють, що ягоди поєднують високу сенсорну привабливість із потенційними антиоксидантними та протизапальними ефектами, а також добре підходять для виробництва продуктів із мінімальним ступенем переробки [1].

Особливий інтерес для технологій виготовлення десертної продукції становлять ягоди з інтенсивним природним забарвленням. Їхня технологічна цінність пов'язана насамперед із вмістом антоціанів та інших фенольних сполук, які формують колір, смак й підвищують біологічну цінність продукту. Для бузини показано значний вміст фенольних компонентів та



широкий потенціал використання у функціональних харчових продуктах, тоді як для обліпихи додатковою перевагою є наявність каротиноїдів і функціональних ліпідів [2–4].

Разом із тим, ягідна сировина є технологічно нестабільною. Антоціани, які забезпечують червоне, пурпурове та синє забарвлення ягідних продуктів, чутливі до температури, кисню, світла, рН та взаємодії з компонентами харчової системи. У сучасних оглядах наголошується, що стабільність антоціанів у харчових основах значною мірою залежить від їх взаємодії з білками та полісахаридами, а також від умов переробки й зберігання. Це є особливо важливим для мусових десертів, де одночасно необхідно зберегти інтенсивний колір, ніжну текстуру та прийнятні органолептичні властивості [5].

Практичну важливість вибору щадної технології підтверджують експериментальні дослідження ягідних рецептур. Зокрема, у роботі щодо малини та бузини встановлено, що найбільші втрати антоціанів спостерігалися у варенні та рецептурах із термічним навантаженням, тоді як включення ягід у мус призводило до мінімального зниження вмісту антоціанів. Це свідчить про перспективність мусових десертів як форми використання ягідної сировини, що дозволяє краще зберігати біологічно активні речовини порівняно з більш жорсткими способами кулінарної обробки [6].

Не менш важливим є питання формування структури мусу. Мусові десерти є аерованими дисперсними системами, стабільність яких визначається співвідношенням рідкої, газової та структурованої фаз. Літературні дані свідчать, що тип гідролоїду та жорсткість гелю істотно впливають не лише на механічні властивості, але й на смакові якості, вивільнення ароматичних речовин і загальну сенсорну оцінку продукту. Показано, що пектинові та желатинові системи по-різному модифікують аромат і солодкість, а підвищення жорсткості гелю зменшує інтенсивність смаку та запаху. Для ягідних мусів це означає необхідність точного підбору структуроутворювачів, щоб забезпечити ніжну консистенцію без пригнічення природного ягідного аромату [7, 8].

Сучасні роботи також показують, що фруктові муси володіють функціональними властивостями. Полуниця є однією з найбільш популярних видів сировини для виробництва десертів, завдяки високому вмісту вітаміну С, антоціанів та легких ароматичних сполук, які формують її характерний смак і аромат. Водночас її використання у мусових десертах має певні технологічні обмеження, пов'язані з високою вологістю та нестабільністю структури пюре.

Отже, ягоди є перспективною сировиною для створення мусових десертів функціонального призначення. Водночас потребують подальшого вивчення питання обґрунтування рецептур і вибору структуроутворювачів для формування належних органолептичних і фізико-хімічних властивостей продукту. Це зумовлює доцільність розробки мусових десертів на основі ягідної сировини та оцінювання їх якості.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою дослідження була розробка рецептур мусових десертів на основі молочної та ягідної сировини зі зниженим вмістом цукру та оцінювання їх органолептичних і фізико-хімічних властивостей.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити завдання: розробити рецептури мусових десертів, дослідити органолептичні показники виготовлених десертів, визначити фізико-хімічні показники виготовлених за розробленими рецептурами десертів.

Основна частина. Об'єктами дослідження були ягоди полуниці, малини та чорної смородини, а також молочні інгредієнти, зокрема вершки, знежирений йогурт і кисломолочний сир. Як джерела солодкості використовували цукор і його замітники – еритритол та інулін. Для формування структури продуктів застосовували різні гелеутворювачі, а саме желатин, агар-агар і пектин.

Розроблені експериментальні рецептури мусових десертів наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Дослідні рецептури мусових десертів (г/100 г готового продукту)

Найменування інгредієнтів	Вміст інгредієнтів, г					
	К1	К2	К3	К4	К5	К6
Пюре полуничне	45,0	–	–	45,0	–	–
Пюре малинове	–	40,0	–	–	40,0	–
Пюре чорносмородинове	–	–	35,0	–	–	35,0
Вершки 30 %	25,0	28,0	–	–	–	–
Йогурт знежирений	–	–	–	30,0	25,0	–
Сир кисломолочний 5 %	–	–	30,0	–	–	–
Сир кисломолочний знежирений	–	–	–	–	–	30,0
Цукор	10,0	11,0	12,0	–	–	–
Еритритол	–	–	–	3,0	4,0	3,5
Інулін	–	–	–	5,0	6,0	7,0
Желатин	1,5	1,3	–	1,5	–	–
Агар-агар	–	–	–	–	0,8	–
Пектин	–	–	1,0	–	–	1,0
Вода питна	18,5	19,7	22,0	15,5	24,2	23,5
Разом	100	100	100	100	100	100

У таблиці 1 наведено склад шести варіантів мусових десертів на основі різних видів ягідної сировини: полуниці, малини та чорної смородини, серед яких К1–К3 є класичними рецептурами з цукром, а К4–К6 – модифікованими варіантами без цукру. В усіх парних зразках частка ягідного пюре залишається незмінною, що дає змогу коректно порівнювати вплив інших рецептурних компонентів на властивості готового продукту. У класичних рецептурах солодкий смак забезпечується цукром, тоді як у дослідних зразках його повністю замінено еритритолом та інуліном, що дає змогу знизити цукрове навантаження й одночасно підвищити вміст харчових волокон. Важливою відмінністю між класичними та модифікованими зразками є також склад молочної основи. У полуничному та малиновому мусах вершки 30 % у класичних варіантах замінено відповідно на знежирений йогурт, а у мусі з чорної смородини сир кисломолочний 5 % – на знежирений сир. Така заміна спрямована на зниження вмісту жиру та енергетичної цінності продуктів без істотного погіршення їх білкової складової.

Структуроутворювальні компоненти в рецептурах підбрано з урахуванням особливостей сировини та бажаних органолептичних характеристик. У полуничних зразках як у класичному, так і в модифікованому варіанті використано желатин. У малиновому класичному мусі також застосовано желатин, тоді як у дослідному варіанті його замінено на агар-агар, що дає змогу сформувати структуру іншого типу. У рецептурах мусу з чорної смородини в обох варіантах як стабілізатор використано пектин. Відмінності у вмісті води пов'язані з необхідністю компенсації зміни складу рецептур і забезпечення необхідної консистенції готових десертів.

Для виготовлення десертів ягідну сировину попередньо інспектували, промивали, подрібнювали до пюреподібного стану та, за потреби, протирали для отримання однорідної консистенції. Кисломолочний сир перед внесенням гомогенізували до пастоподібного стану. Усі інгредієнти дозували згідно з рецептурою на лабораторних вагах.

Зразки К1, К2 та К4 готували за спільною технологічною схемою із застосуванням желатину як структуроутворювача. Желатин попередньо гідратували у частині рецептурної води до набухання, після чого розчиняли на водяній бані без доведення до кипіння. Окремо в решті води розчиняли цукор або еритритол. Інулін у дослідному зразку К4 вводили при інтенсивному перемішуванні до повного розчинення. Отриманий розчин поєднували з відповідним ягідним пюре і ретельно перемішували до однорідності, після чого вносили розчинений желатин.

У зразках К1 і К2 вершки, попередньо охолоджені, збивали до напівстійкої піни та обережно вводили в підготовлену ягідну основу при обережному перемішуванні, мінімізуючи руйнування аерованої структури. У зразку К4 замість вершків використовували знежирений йогурт, який вносили на завершальному етапі при помірному перемішуванні до однорідного стану.

Агар-агар попередньо диспергували у воді, передбаченій рецептурою, нагрівали до повного розчинення і вводили у малинову основу, що містила еритритол та інулін. Після досягнення однорідного стану суміш частково охолоджували, після чого додавали знежирений йогурт і ретельно перемішували до формування рівномірної мусової маси.

Зразки К3 і К6 готували на основі чорносмородинового пюре, кисломолочного сиру та пектину. Для запобігання грудкуванню пектин попередньо змішували з цукром у зразку К3 або з еритритолом та інуліном у зразку К6, після чого вносили у чорносмородинове пюре разом із рецептурною кількістю води при безперервному перемішуванні. Після рівномірного розподілу пектину ягідну основу поєднували з попередньо гомогенізованим сиром відповідної жирності та перемішували до отримання пластичної однорідної системи.

Після приготування мусову масу кожного зразка фасували у підготовлені форми однакового об'єму та витримували за температури $4\pm 2^\circ\text{C}$ для завершення структуроутворення і стабілізації консистенції. Після стабілізації структури готові десерти використовували для подальшого органолептичного та фізико-хімічного оцінювання. Визначення усіх показників виконували за стандартними методиками [9].

Органолептичне оцінювання мусових десертів проводили за показниками зовнішнього вигляду, кольору, аромату, смаку та консистенції. Результати представлені на рисунку 1.

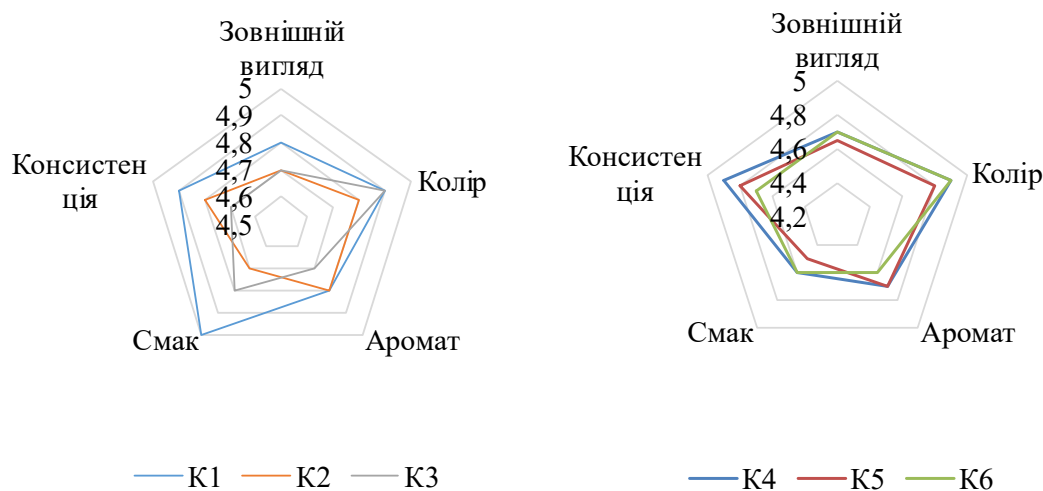


Рис. 1. Результати органолептичної оцінки мусових десертів

Серед класичних зразків найвищу органолептичну оцінку отримав зразок, виготовлений за рецептурою К1, який переважав інші варіанти за смаком, консистенцією та зовнішнім виглядом. Зразок мусу за рецептурою К2 характеризувався дещо нижчими сенсорними оцінками, насамперед за смаком, хоча за кольором, ароматом і консистенцією зберігав достатньо добрі результати. Мус, виготовлений за рецептурою К3 отримав високу оцінку кольорової гами та зовнішнього вигляду, проте за ароматом, смаком і консистенцією він поступався К1.

Серед зразків мусів, виготовлених за модифікованими рецептурами найбільш збалансованими органолептичними властивостями характеризувався мус К4, який мав високі оцінки за кольором і консистенцією та достатньо високі – за ароматом і зовнішнім виглядом. Зразок мусу



К5 також отримав високі бали за кольором і консистенцією, проте нижчу оцінку за смаком. Для К6 характерні високі оцінки за зовнішнім виглядом і кольором, однак менш виражені показники аромату, смаку та консистенції порівняно з К4.

За результатами органолептичного оцінювання зразок мусу, виготовлений за рецептурою К1 визнано найкращим серед класичних, а мусу, що виготовлений за рецептурою К4 – серед модифікованих, тому саме їх доцільно рекомендувати для подальших досліджень і практичного використання.

З метою комплексної оцінки розроблених десертів були визначені їх фізико-хімічні показники та показники харчової цінності (табл. 2).

Таблиця 2

Фізико-хімічні показники мусових десертів на основі ягідної та молочної сировини

Показник	К1	К2	К3	К4	К5	К6
Активна кислотність, рН	4,51±0,02	4,38±0,03	4,16±0,03	4,22±0,02	4,08±0,03	3,97±0,03
Сухі речовини, %	33,15±0,50	34,20±0,55	31,80±0,48	24,34±0,40	25,90±0,42	27,10±0,45
Білки, г/100г	2,29± 0,05	2,21±0,05	5,18± 0,08	3,19± 0,06	1,82± 0,05	5,74±0,08
Жири, г/100г	7,69± 0,10	8,58±0,11	1,61± 0,04	0,22± 0,01	0,18± 0,01	0,24±0,01
Вуглеводи, г/100 г	15,80±0,20	16,60±0,22	18,10±0,25	10,94±0,15	12,30±0,18	13,40±0,19
у т. ч. цукри, г/100 г	15,80±0,20	15,90±0,22	16,40±0,24	5,50± 0,10	6,30± 0,11	6,10±0,11
Аскорбінова кислота, мг/100 г	18,51±0,63	15,4 ± 0,5	59,8 ± 1,0	21,3 ± 0,7	17,2 ± 0,6	62,5 ± 1,1

Наведені в таблиці 2 дані свідчать, що заміна цукру на еритритол та інουλін у рецептурах мусів К4–К6 супроводжувалася зниженням активної кислотності, масової частки сухих речовин, загального вмісту вуглеводів і цукрів порівняно з відповідними класичними зразками за рецептурами К1–К3. Найбільш виражені відмінності встановлено за вмістом жиру. Так, у модифікованих зразках його кількість зменшилася на 1,37–8,40 г/100 г, що зумовлено заміною вершків і напівжирного кисломолочного сиру на знежирені молочні компоненти. Водночас білковий склад змінювався залежно від виду молочної основи: у мусі К4 вміст білка був вищим ніж у мусі К1 на 0,90 г/100 г, у мусі К6 порівняно з мусом К3 – на 0,56 г/100 г, тоді як у парі К2–К5 спостерігалось його зниження на 0,39 г/100 г. За вмістом аскорбінової кислоти найкращими були зразки мусів з чорносмородиновим пюре, у яких цей показник перевищував полуничні та малинові варіанти більш ніж утричі, що вказує на вищу мікронутрієнтну цінність мусових десертів К3 і К6. Серед безцукрових зразків мусів найнижчий вміст цукрів встановлено для К4, тоді як найвищий вміст білка та аскорбінової кислоти характерний для мусу К6.

Висновки. У результаті проведених досліджень розроблено рецептури мусових десертів із використанням полуниці, малини та чорної смородини як базової сировини, а також проведено їх модифікацію шляхом заміни цукру на еритритол і інουλін.

Органолептичне оцінювання показало, що найбільш прийнятними за сукупністю сенсорних властивостей були зразки К1 і К4, що підтверджує можливість створення мусових десертів зі зниженим вмістом цукру на основі ягідної сировини без суттєвого погіршення їх споживчих характеристик.

Визначено, що модифікація рецептур за рахунок вилучення цукру та заміни традиційних молочних компонентів на знежирені дала змогу знизити вміст жирів і цукрів у мусових десертах, при цьому зразок, виготовлений за рецептурою К4 вирізнявся найменшим цукровим навантаженням, а за рецептурою К6 – найвищою білковою та вітамінною цінністю.

**Список використаних джерел**

1. Aguilera J.M. (2024). Berries as Foods: Processing, Products, and Health Implications. *Annual Review of Food Science and Technology* 15, pp. 1 – 26. Vol. 15:1–26 <https://doi.org/10.1146/annurev-food-072023-034248>
2. Pascariu, O.-E., & Israel-Roming, F. (2022). Bioactive Compounds from Elderberry: Extraction, Health Benefits, and Food Applications. *Processes*, 10(11), 2288. <https://doi.org/10.3390/pr10112288>
3. Сердюк М., Бандура В., Колісниченко Т., Сефіханова К. Розробка джемів із локальної сировини зі зниженим глікемічним індексом. Technical sciences. *Herald of Khmelnytskyi national university*, Iss. 3, Part 2, 2025 (353). С. 160–166.
4. Бандура В.М. Сердюк М.Є., Колісниченко Т.О., Сефіханова К.А. Розроблення сиркового десерту з каротиновмісною сировиною. *Інновації та технології в сфері послуг і харчування*. 2 (16), С. 18–24. [https://doi.org/10.32782/2708-4949.2\(16\).2025.3](https://doi.org/10.32782/2708-4949.2(16).2025.3)
5. Zang, Z., Tang, S., Li, Z., Chou, S., Shu, C., Chen, Y., Chen, W., Yang, S., Yang, Y., Tian, J., & Li, B. (2022). An updated review on the stability of anthocyanins regarding the interaction with food proteins and polysaccharides. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21, 4378–4401. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13026>
6. Cordeiro T., Fernandes I., Pinho O., Calhau C., Mateus N., Faria A. (2021). Anthocyanin content in raspberry and elderberry: The impact of cooking and recipe composition, *International Journal of Gastronomy and Food Science*. Vol. 24, 100316, <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2021.100316>.
7. Boland, A. B., Delahunty, C. M., van Ruth, S. M. (2006). Influence of the texture of gelatin gels and pectin gels on strawberry flavour release and perception, *Food Chemistry*. Vol. 96, Iss. 3, P. 452–460. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.02.027>
8. Wang R., Hartel R. W. (2022). Confectionery gels: Gelling behavior and gel properties of gelatin in concentrated sugar solutions, *Food Hydrocolloids*, Vol. 124, Part A, 107132, <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107132>
9. Сердюк М.Є., Прісс О.П., Гапріндашвілі Н.А., Здоровцева Л.М., Сухаренко О.І., Іванова І.Є. Дослідницький практикум. Частина 1. Методи дослідження плодоовочевої та ягідної продукції. Мелітополь : Видавничо-поліграфічний центр «Люк», 2020. 370 с. https://elib.tsatu.edu.ua/dep/ate/tpzpsg_1/page5.html

Дата першого надходження статті до видання: 21.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 25.05.2026

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



V. Bandura¹, M. Serdyuk¹, T. Kolisnychenko²

¹National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

²Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

DEVELOPMENT OF RECIPES FOR MOUSSE DESSERTS BASED ON DAIRY AND BERRY RAW MATERIALS

Summary

The aim of the study was to develop formulations of mousse desserts based on dairy and berry raw materials with reduced sugar content and to evaluate their sensory and physicochemical properties. The relevance of the study is обусловлена? Need proper English: stems from the need to expand dessert product range with improved nutritional characteristics, in particular with reduced sugar content and the use of natural berry raw materials. The scientific novelty lies in substantiating formulation solutions for mousse desserts with strawberry, raspberry, and blackcurrant in combination with dairy raw materials, as well as in determining the effect of replacing sugar with erythritol and inulin on the quality characteristics of the finished product. The practical value of the results obtained lies in the possibility of creating mousse desserts with reduced sugar content without significant deterioration of their consumer properties. In the course of the study, six formulations of mousse desserts were developed, three of which were conventional and three modified. Strawberry, raspberry, and blackcurrant purées were used as the berry



base, while cream, low-fat yogurt, curd cheese, and fat-free curd cheese were used as the dairy base. In the sugar-free samples, sweetness was achieved by using erythritol and inulin. According to the results of sensory evaluation, the most acceptable samples in terms of the overall set of sensory properties were the conventional strawberry mousse and the reduced-sugar strawberry mousse. It was shown that modification of the formulations contributed to a reduction in the fat and sugar contents of the finished desserts. At the same time, the reduced-sugar strawberry mousse was characterized by the lowest sugar load, whereas the reduced-sugar blackcurrant mousse had the highest protein and vitamin value. The obtained results confirm the feasibility of using dairy and berry raw materials for the development of mousse desserts with reduced sugar content.

Keywords: mousse desserts, berry raw materials, erythritol, inulin, sensory evaluation, physicochemical properties, functional foods.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-2-21>

УДК 664.002.5:621.9.02

В. В. Дуб¹, канд. техн. наук, доц.

ORCID: 0000-0002-2078-4426

І. В. Лебединец², канд. техн. наук, доц.

ORCID: 0000-0002-5703-838X

Д. В. Дмитревський², канд. техн. наук, доц.

ORCID: 0000-0003-1330-7514

Л. М. Задорожна¹, ст. викладач

ORCID: 0000-0001-9075-3011

А. С. Стефашкіна¹, студент

ORCID: 0009-0002-4234-0049

¹Центральноукраїнський національний технічний університет²Державний біотехнологічний університет

e-mail: igor13lebedinec@gmail.com

ІНЖЕНЕРНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО НОЖА КУТЕРА ДЛЯ ЗАКЛАДІВ РЕСТОРАННОГО ГОСПОДАРСТВА ТА ХАРЧОВОЇ ІНДУСТРІЇ

Анотація. У статті розглянуто актуальну проблему підвищення енергоефективності кутерного обладнання для харчової індустрії та ресторанного господарства. Встановлено, що енерговитрати залежать від кута загострення та профілю різальної кромки ножів. Оптимізація їх геометричних параметрів дає компроміс між зносостійкістю та питомими витратами. Запропоновано технічне рішення з метою зниження енергоспоживання приводу кутера.

Розроблена конструкція ножа зменшує опір різанню та тепловиділення, а також запобігає нагріванню сировини понад норми. Наукова новизна отриманих результатів заключається у раціональному поєднанні елементів різальної кромки та форми корпусу ножа, що дозволяє знизити гідродинамічний опір під час роботи. Практична цінність розробки полягає у зменшенні експлуатаційних витрат. На запропоноване технічне рішення подано заявку на корисну модель.

Ключові слова: різальний інструмент, подрібнення, тертя, тепловиділення, енергоефективність, зносостійкість, корисна модель.

Постановка проблеми. Енергетична ефективність технологічного обладнання є одним з ключових чинників конкурентоспроможності сучасних харчових, м'ясопереробних підприємств та закладів ресторанного господарства [1]. Кутери, використовуються для дрібнодисперсного подрібнення рибного та м'ясного фаршу, який піддавався попередньому подрібненню за допомогою вовчків або м'ясорубок. Процес кутерування є досить енергоємним. Причому основна частка енерговитрат припадає на подолання опору різанню та сил тертя, що виникають між бічними поверхнями ножів і сировиною, яка обробляється [2].

Саме тому проектування робочих органів із покращеними геометричними параметрами, здатних зменшити сили тертя та знизити загальне енергоспоживання агрегату, є актуальним техніко-економічним завданням. Ця стаття присвячена комплексному аналізу параметрів робочих органів кутерів, їх впливу на ефективність процесу та інженерному проектуванню нового високоефективного ножа.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження показують, що опір різанню замерзлого м'яса або м'яса з високим вмістом сполучних тканин може зростати на 40...60 %, що кардинально змінює вимоги до міцності кромки. При цьому вибір кута загострення ножа для кутера не може бути універсальним і часто вимагає адаптації під конкретну лінійку продукції підприємства. Наприклад, для подрібнення напівжирної свинини може бути достатнім кут загострення 25°, тоді як для обробки жирної яловичини з сухожиллями, з метою запобігання вищерблювання, доцільно загострювати ніж під кутом 32...35°.



Експериментальні дані свідчать, що збільшення кута загострення від 20° до 30° може підвищити стійкість інструменту на 50...80 %, але водночас призводить до зростання питомих енерговитрат на 15...25 % [3]. Таким чином, оптимізація роботи кутерів зводиться до пошуку компромісу, за якого показники зношування ножів та рівень енергоспоживання забезпечують мінімум сумарних експлуатаційних витрат.

Відомо, що профіль спуску леза безпосередньо впливає на динаміку процесу. Клиноподібний профіль створює ефект «клина», який активно розтискає волокна, але водночас стискає продукт з боків, що збільшує площу контакту та тертя. У той же час, випуклі спуски забезпечують плавне відведення матеріалу від лінії різку, та зменшують бічний тиск. Це підтверджується експериментами з вимірювання бічних зусиль при різанні м'ясної сировини [4]. Профіль, який утворює увігнуті спуски, ще більше зменшує площу контакту, але може бути менш міцним при роботі з твердими включеннями, наприклад частинками кісток або льоду.

У патентній літературі описано прогресивні рішення щодо конструкцій ножів. Наприклад, дослідники Харківського державного університету харчування та торгівлі запропонували комбінований профіль, в якому верхня частина спуску виконана увігнутою для зменшення ваги, а безпосередньо біля кромки представляє опуклий мікро-профіль для підвищення міцності [5]. Це дозволяє поєднати низький опір різанню зі стійкістю до зношування.

Схожі принципи описані в європейському патенті EP 2676570 A1, в якому лезо виконано зі змінним кутом спуску по довжині з метою адаптації до різної щільності продукту [6].

Інноваційним напрямком є відхід від прямої лінії ріжучої кромки. Традиційні ножі кутерів мають прямий або злегка вигнутий профіль. Однак дослідження динаміки потоку в чаші кутера показують, що рівномірна кривизна не завжди оптимальна. Патент US 8844149 B2 детально описує лезо зі спеціально розрахованою хвилеподібною або серпоподібною кромкою [7]. Фізичний принцип дії такого ножа полягає у наступному: ділянка з більшою кривизною інтенсивніше захоплює і початково деформує продукт, тоді як наступна ділянка з меншою кривизною завершує різання. Це призводить до розподілу навантаження в часі та у просторі, згладжує пульсації моменту сили, що навантажує двигун, і відповідно, знижує пікове енергоспоживання.

Українські розробки також рухаються аналогічним шляхом. Наприклад, представлений робочий орган кутера [8] включає сегментоване лезо, окремі секції якого встановлені під різними кутами атаки, що також забезпечує поетапне різання.

Критично важливим аспектом подрібнення м'ясної сировини є вплив геометрії робочого органу кутера на генерацію тепла за рахунок сил тертя. Сильне тертя леза об продукт призводить до нагрівання як ножа, так і м'ясної сировини. Нагрівання м'яса понад $10...12^\circ\text{C}$ може запускати денатурацію білків на поверхні зрізу, що відповідно погіршує якість фаршу. Правильно підібрана геометрія робочого органу кутера, що мінімізує тертя, безпосередньо покращує і технологічні показники продукту [9, 10].

У вирішенні даної проблеми, деякі сучасні дослідники, йдуть ще далі, інтегруючи в ножі системи внутрішнього охолодження [11]. Проте очевидно, що ефективність таких систем також залежить від первинної геометрії спусків кутерного ножа.

Отже, сучасний підхід до проектування геометрії ріжучої кромки ножів кутерів перестає бути уніфікованим. Він перетворюється на складну інженерну задачу, що враховує властивості сировини, режими роботи агрегату та вимоги до якості кінцевого продукту. Ця тенденція чітко простежується в останніх патентних заявках як в Україні, так і за кордоном, де описується ціла система робочих органів, адаптованих до зміни рецептури.

Мета досліджень. Метою даної роботи є підвищення енергоефективності процесу кутерування м'ясної сировини шляхом розробки нової конструкції робочого органу з оптимізованими геометричними параметрами. Дослідження зосереджене на системному визначенні оптималь-



них співвідношень між геометричними параметрами леза (кутом загострення, профілем спуску, кривизною ріжучої кромки). Це повинно забезпечити мінімізацію питомих енерговитрат при різанні м'ясної сировини без шкоди для продуктивності, довговічності інструменту та якості технологічного процесу. Для досягнення поставленої мети необхідно розробити конструкцію ножа, що забезпечує зменшення гідродинамічного опору та мінімізацію тепловиділення в зоні різання.

Виклад основного матеріалу дослідження. Енергетичні витрати при різанні м'яса визначаються низкою параметрів: товщиною леза, глибиною його занурення, станом поверхні ножа, кутом загострення, швидкістю руху та фізико-механічними характеристиками продукту. М'ясна сировина є в'язкопружним анізотропним матеріалом, опір якого різанню залежить від його сорту, вологості, температури, ступеня підморожування та орієнтації волокон. Комплексне врахування цих чинників є критично важливим у процесі проектування робочих органів подрібнювального обладнання.

Енергія різання E витрачається на деформацію продукту, подолання сил тертя по поверхнях леза та утворення нової поверхні. Вона може бути описана співвідношенням:

$$E = k \cdot A \cdot \tau \quad (1)$$

де k – коефіцієнт, що залежить від геометрії леза;

A – площа зрізу, м²;

τ – питомий опір зсуву продукту, Н/м².

Із представленого виразу виходить, що одним із шляхів зниження енерговитрат при кутеруванні м'ясної сировини є мінімізація коефіцієнта k шляхом оптимізації геометрії та кута заточки леза ножа.

В ряді промислових конструкцій, ножі кутера обладнані різальною кромкою, яка виконана у вигляді спіралі або ламаної лінії. Вони мають ряд переваг зрівняно з прямими ножами. Зокрема, вигнута форма леза забезпечує його кінематичне загострення [12]. В результаті процес різання м'яса відбувається лезом з ефективним кутом β , що є дещо меншим за фізичний кут загострення:

$$\operatorname{tg} \beta = \operatorname{tg} \beta_0 \cdot \cos \alpha = \operatorname{tg} \beta_0 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{V_\tau}{V_n} \right)^2}}, \quad (2)$$

де β_0 – кут загострення леза, град;

α – кут між нормаллю до різальної кромки та напрямком швидкості різання, град;

V_τ , V_n – складові швидкості руху ножа, відповідно у нормальному та тангенціальному напрямках, м/с.

Крім того, вигнута форма леза ножа сприяє зісковзуванню неперерізаних волокон сполучної тканини з ріжучої кромки, що запобігає її засміченню. Разом із тим зазначене рішення має суттєвий недолік – процес подрібнення супроводжується підвищеним енергоспоживанням.

З метою збільшення енергоефективності подрібнювального обладнання, на основі проведених досліджень та технологічних розрахунків було спроектовано вискоефективний ніж кутера, та подано заявку на корисну модель.

В якості прототипу обрано ніж серповидної форми [13], конструкція якого передбачає двосторонню заточку. Однак представлене рішення також не позбавлене недоліків, оскільки під час роботи виникає надмірне тертя та інтенсивна тепловіддача.

Запропонована корисна модель ножа кутера (рис. 1) спрямована на подолання ключових недоліків існуючих аналогів, зокрема високого енергоспоживання та інтенсивного нагріву м'ясного фаршу під час технологічного процесу подрібнення.

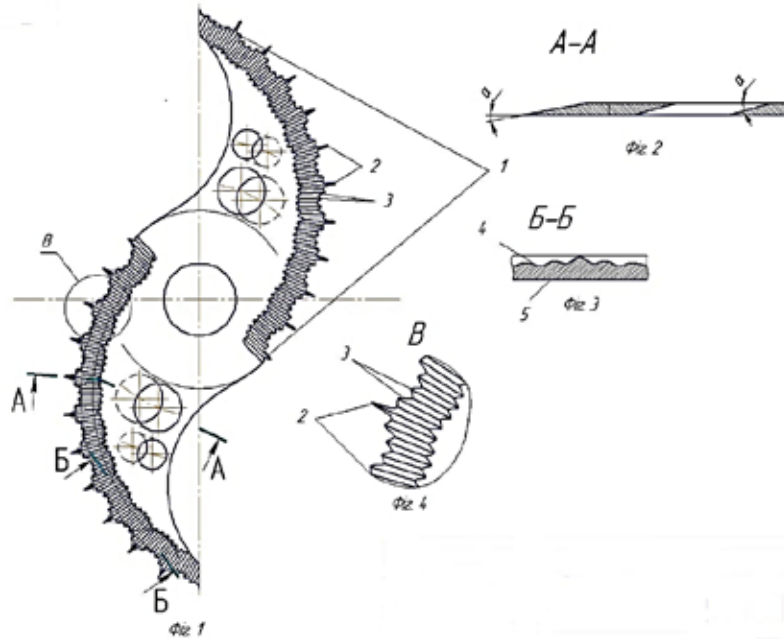


Рис. 1. Загальний вигляд ножа кутера за корисною моделлю

Суть інженерного проектування енергоефективного ножа кутера полягає в комплексній модифікації геометрії ріжучого краю 1 (рис. 1, фіг. 1) та тіла ножа. Робоча кромка виконується у формі дуги кола зі зміщеним центром, але з принципово новою конфігурацією. Одна її сторона залишається рівною для можливості класичного загострення, тоді як протилежній надають складної пилоподібної форми.

Цей пилоподібний профіль не є однорідним. Він утворений зубцями з основним кроком 2, причому кожен із цих зубців сам по собі має додаткову мікрогеометрію – вторинні канавки та зубці з меншим кроком 3 (рис. 1, фіг. 1, 4). Така багаторівнева структура забезпечує не однорідне різання, а ефект розчленованого зрізу, коли основний зубець розподіляє напруження, а мікрогеометрія допомагає подрібнювати волокна, що знижує загальний опір подрібнювального матеріалу.

Для зменшення тертя бокової поверхні об масу продукту застосовано оригінальне рішення – перфорацію тіла ножа циліндричними отворами, виконаними не перпендикулярно, а під певним кутом до бічної площини (рис. 1, фіг. 2). Це виконує одразу дві функції: значно зменшує площу контакту та, як наслідок, силу тертя, а також створює додаткові ріжучі кромки вздовж країв кожного отвору.

Таким чином, загальна активна довжина ріжучого краю збільшується, а робота різання розподіляється між основним лезом і цією допоміжною перфорованою структурою. Скошений під кутом α край кожного отвору фактично працює як мікро-лезо, що сприяє кращому захопленню ножа в продукт та його подальшому відведенню.

В перерізі видно, що ріжучий край формує асиметричний профіль: з одного боку це хвиляста поверхня 4, яка відповідає пилоподібній стороні, а з іншого – абсолютно плоска 5 (фіг. 3). Саме ця плоска поверхня є опорною для операції відновлення гостроти інструменту шляхом переточки та полірування.

Принцип дії такого комбінованого ножа ґрунтується на поєднанні ефектів. Пилоподібна багаторівнева різальна кромка замість того, щоб рівномірно розрізати, ефективніше розриває та подрібнює сполучні тканини м'яса. Перфороване тіло значно зменшує ефект прилипання фаршу, та відповідно знижує гідродинамічний опір обертанню.



Сумарним результатом є зниження потужності, яка споживається приводом кутера, та мінімізація перетворення енергії роботи у тепло, що безпосередньо запобігає небажаному нагріву сировини.

Висновки. Запропоновано нову конструкцію робочого органу кутера (заявка на корисну модель № u202504982), яка поєднує багаторівневу пилоподібну заточку зі змінним кроком, та похилу перфорацію тіла ножа. Таке інженерне рішення забезпечує розчленований зріз сполучних тканин, зменшує площу контакту та гідродинамічний опір. Похилі отвори створюють додаткові мікрорізальні кромки та покращують відведення фаршу.

Технічна новизна рішення полягає у раціональному поєднанні основного леза з допоміжними різальними елементами. Це дозволяє зменшити частку енергії, яка перетворюється на тепло, та запобігти небажаному нагріванню сировини понад технологічні норми.

Перспективним напрямом подальших робіт є серійне впровадження запропонованої конструкції ножа кутера у виробництво, а також подальше удосконалення його геометричних параметрів із застосуванням методів комп'ютерного моделювання та оптимізації.

Список використаних джерел

1. Дуб В.В., Терешкін О.Г., Пазюк В.М. Зниження енергоємності процесу подрібнення м'ясної сировини на підприємствах ресторанного господарства. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. Кропивницький : ЦНТУ, 2025. Вип. 11(42). Ч. 1. С. 84–91. <https://doi.org/10.32317/2221-1055.202003036>
2. Аткинс Е. Динаміка різання та деформування матеріалів. Оксфорд : Elsevier, 2009. 320 с.
3. Захарченко В. І. Оптимізація кута загострення робочих органів кутерів на основі аналізу енерговитрат та зносостійкості. *Обладнання та технології харчових виробництв*. 2017. № 34. С. 78–85.
4. Goksoy E. The effects of blade geometry on cutting forces in meat processing. *Journal of Food Engineering*. 2003. Vol. 57, № 3. P. 267–271.
5. Робочий орган кутера: пат. 112233 Україна: МПК В02С 18/20. № u201611234. О. М. Борисенко, С. В. Петренко; заявл. 15.11.2016; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9.
6. Cutter knife with variable geometry: пат. 2676570 А1 Європейський Союз: МПК В02С 18/40. № EP13165432. G. Schmidt, F. Weber; заявл. 26.04.2013; опубл. 24.12.2014, Бюл. № 2014/52.
7. Cutting blade for food processor having a serrated edge: пат. 8844149 В2 Сполучені Штати Америки: МПК В02С 18/18. № US13/555,678. R. L. Johnson, M. K. Davis; заявл. 23.07.2012; опубл. 30.09.2014.
8. Ніж для подрібнення харчових продуктів: пат. 123456 С2 Україна: МПК В26В 9/00. № a201700567. В. П. Сидоренко, І. І. Коваль; заявл. 24.01.2017; опубл. 25.12.2018, Бюл. № 24.
9. Дейниченко Г.В., Простаков О.О., Дуб В.В. Удосконалення процесів переробки м'ясної сировини в підприємствах харчування : монографія. Харків : ХДУХТ, 2003. 237 с.
10. Дуб В. В. Вдосконалення процесу подрібнення харчової сировини та обладнання для його реалізації на підприємствах харчування : дис. ... канд. техн. наук : 05.18.12. Харків, 2002. 237 с.
11. Internally cooled cutting blade for a food chopper: пат. 9867123 В2 Сполучені Штати Америки: МПК В02С 18/22. № US14/987,123. T. J. Miller; заявл. 03.01.2016; опубл. 16.01.2018.
12. Моделювання технологічних процесів і обладнання переробних підприємств АПК : монографія / В. Ю. Сухенко та ін.; за ред. В. Ю. Сухенка. Київ : ЦП «КОМПРИНТ», 2017. 520 с.
13. Ніж кутера: пат. 116156 Україна, МПК В02С 18/20. № 201601234. О. В. Батраченко; заявл. 18.03.2016; опубл. 12.02.2018, Бюл. № 3.

Дата першого надходження статті до видання: 21.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 25.05.2026

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





V. Dub¹, I. Lebedynets², D. Dmytrevskiy², L. Zadorozhnia¹, A. Stefaskina¹

¹Central Ukrainian National Technical University

²State Biotechnological University

DESIGN OF AN ENERGY-EFFICIENT CUTTER KNIFE FOR RESTAURANTS AND THE FOOD INDUSTRY

Summary

This study addresses improving energy efficiency in cutter equipment for the food industry. A significant share of energy consumption during comminution is attributed to cutting resistance and friction between knife lateral surfaces and raw material. Geometric characteristics of cutting tools – sharpening angle, blade profile, and cutting edge configuration – directly impact energy expenditure and product quality.

A review of scientific and patent literature shows that optimal selection of knife geometry allows a trade-off between tool wear resistance, specific energy consumption, and processed meat quality. However, existing designs (serrated or crescent-shaped knives) fail to simultaneously meet requirements of energy efficiency, reduced heat generation, and straightforward maintenance.

The primary goal is to enhance energy efficiency of meat raw material comminution through a novel cutting tool with optimized geometry. The key objective is to lower specific energy consumption without compromising tool durability or process quality.

Research methodology included analytical review, systematic analysis of knife geometry influence on energy performance, technological calculations, and engineering creativity methods.

As a result, an original cutter knife design is proposed. The developed solution incorporates a multi-level serrated cutting edge with variable tooth pitch together with inclined perforations in the knife body. The serrated pattern ensures distributed cutting action, reducing resistance from connective tissues. Inclined holes decrease contact area, lowering friction, while perforation edges act as additional micro-cutting surfaces. The blade features an asymmetric cross-section – wavy on one side, flat on the opposite – simplifying sharpening and maintenance.

Scientific novelty lies in the rational combination of the main cutting edge with auxiliary elements (serrated profile and perforation edges), reducing mechanical energy converted into heat. This prevents undesirable heating of raw material beyond technological limits and ensures lower hydrodynamic resistance.

Practical value consists in reducing energy consumption of the cutter drive while maintaining finished product quality. The flat support surface enables convenient restoration of cutting properties under industrial conditions. A utility model application (No. u202504982 dated October 13, 2025) has been filed for the proposed design.

Optimizing cutter knife geometry through a multi-level serrated edge and inclined perforations reduces cutting resistance, minimizes friction, and lowers heat generation. The proposed solution improves energy efficiency and reduces operational costs.

Keywords: cutting tool, comminution, friction, heat generation, energy efficiency, wear resistance, utility model.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-2-22>

УДК 664(075.8)

В. М. Зубко¹, д-р техн. наук, проф.

ORCID: 0000-0002-4783-2608

Є. А. Петриченко², канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-1037-077X

¹Полтавський державний аграрний університет²Уманський національний університет

e-mail: didur.vv@gmail.com

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ФІЛЬТРАЦІЇ РОСЛИННОЇ ОЛІЇ В ЗЕЄРНІЙ ЗОНІ ШНЕКОВОГО ПРЕСУ

Анотація. У статті розглянуто процес механічного вилучення рослинної олії у шнековому пресі та запропоновано математичний опис фільтраційного відокремлення олії в зеєрній зоні. Вихідною передумовою дослідження є подання олійної сировини як двокомпонентної системи, що складається з твердого пористого каркаса та рідкої фази, яка заповнює його вільний об'єм. Для опису руху рідкої фази застосовано закон Дарсі, а зміна тиску вздовж робочої ділянки преса подана у вигляді експоненціальної залежності. На основі рівняння балансу потоків отримано аналітичні співвідношення, що дають змогу визначити зміну концентрації вільної олії в м'ятці вздовж зеєрної камери, середню концентрацію відфільтрованої фази та продуктивність преса за олією. Встановлено, що зі зростанням тиску у напрямку до виходу з робочої зони інтенсивність фільтрування підвищується, а залишковий вміст олії в макусі зменшується. Запропонована модель може бути використана як для аналізу роботи діючих шнекових пресів, так і на етапі їх проектування та оптимізації параметрів процесу віджимання.

Ключові слова: шнековий прес, рослинна олія, зеєрна камера, фільтрація, математична модель, продуктивність преса, віджимання олії, пористе середовище.

Постановка проблеми. Механічне пресування олійної сировини залишається одним із найбільш поширених способів одержання рослинної олії, особливо у випадках, коли важливими є відносна простота технологічної схеми, енергоощадність та збереження цінних компонентів продукту. У шнекових пресах основні технологічні процеси відбуваються в умовах поступового ущільнення матеріалу, зростання тиску та фільтраційного виділення рідкої фази через зеєрну решітку. Саме тому ефективність роботи такого обладнання значною мірою визначається закономірностями руху олії в ущільненому пористому середовищі.

Попри наявність численних досліджень, питання аналітичного опису процесу віджимання залишаються актуальними, оскільки реальні фізико-механічні явища в робочій камері преса є складними та багатофакторними. Сучасні праці підтверджують, що продуктивність шнекових пресів, вихід олії та якість кінцевого продукту істотно залежать від тиску, геометричних параметрів шнека, температури, конструкції зеєрної камери та умов керування процесом.

Аналіз останніх досліджень. Сучасні наукові дослідження у сфері механічного вилучення рослинних олій зосереджені переважно на трьох основних напрямках: удосконалення конструкції шнекових пресів, оптимізація геометрії зеєрної камери та автоматизація технологічного процесу [1–3]. У роботі В. М. Корендія та В. Б. Гаврана досліджено вплив конструктивних і технологічних параметрів на кількісні та силові характеристики процесу витискання олії, а також обґрунтовано перспективність автоматизованого контролю температури, тиску й подачі сировини для підвищення стабільності роботи преса [4].

У праці М. Hudzenko, V. Vasylyv, M. Zheplinska, V. Sarana, D. Gorenkov вивчено ефективність конструкції олієвідвідних каналів шнекових пресів. Автори показали, що геометрія каналів зеєрної зони безпосередньо впливає на інтенсивність відведення рідкої фази, вихід олії та фор-

мування макухи, що підтверджує важливість математичного моделювання процесів фільтрації при розробленні нових конструкцій обладнання [5].

Окрему увагу в сучасних роботах приділено автоматизації процесу віджимання. У дослідженні М. Lobur та співавторів запропоновано систему керування процесом вилучення олії у шнековому пресі з урахуванням температурних параметрів камери пресування, стану електродвигуна та режиму подачі сировини. Це свідчить про перехід від суто емпіричного налаштування пресів до інтелектуального керування на основі вимірюваних параметрів процесу [6]. Отже, аналіз сучасних досліджень підтверджує, що ефективність шнекового віджимання олії визначається не лише механічними параметрами машини, а й закономірностями руху рідкої фази в ущільненому шарі м'ятки. Саме тому побудова адекватної математичної моделі фільтраційного процесу є важливою умовою подальшого вдосконалення як конструкції пресів, так і систем їх автоматизованого керування [6–10].

Формулювання мети статті. Метою дослідження є побудова математичної моделі процесу фільтраційного відокремлення олії в зерній зоні шнекового преса, яка дає змогу встановити закономірності зміни концентрації вільної олії у м'ятці вздовж каналу шнека, визначити середню швидкість фільтрації та оцінити продуктивність преса за цільовим продуктом.

Для досягнення поставленої мети передбачалося:

- проаналізувати особливості процесу механічного віджимання олії у шнекових пресах;
- розглянути сучасні дослідження у сфері вдосконалення конструкцій та режимів роботи пресового обладнання;
- сформулювати фізично обґрунтовані припущення щодо руху рідкої фази в пористому середовищі;
- отримати аналітичні залежності для розрахунку концентрації вільної олії та продуктивності преса;
- оцінити можливість використання моделі для проектування і вдосконалення шнекових пресів.

Основна частина. Теоретичні передумови моделювання процесу. Одним із найпоширеніших способів одержання рослинної олії є механічне пресування олійної сировини у шнекових пресах. У напірній зоні преса здійснюється переміщення та ущільнення матеріалу, унаслідок чого формується необхідний тиск. У другій зоні, тобто в зерній камері, під дією цього тиску відбувається фільтраційне відокремлення олії через зерну решітку. Схему роботи шнекового преса доцільно подати на рисунку 1.

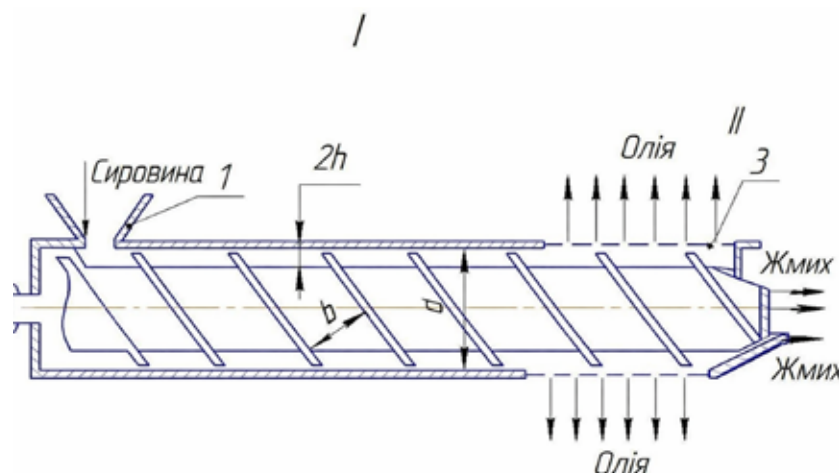


Рис. 1. Принципова схема шнекового преса:

1 – приймач сировини; 2 – шнековий вал; 3 – зерна решітка; 4 – вихідний отвір



Оброблювану сировину можна розглядати як двокомпонентну систему, що складається з твердого пористого каркаса та олії, яка заповнює його вільний простір. Якщо вважати, що у зоні фільтрування робочий об'єм повністю заповнений сировиною, то за зростання тиску об'єм каркаса зменшується, а об'єм вільної олії збільшується на відповідну величину. Тому таку систему можна прийняти як квазінезстисливу. Вплив тиску на коефіцієнт відтоку олії доцільно відобразити графічно на рисунку 2.

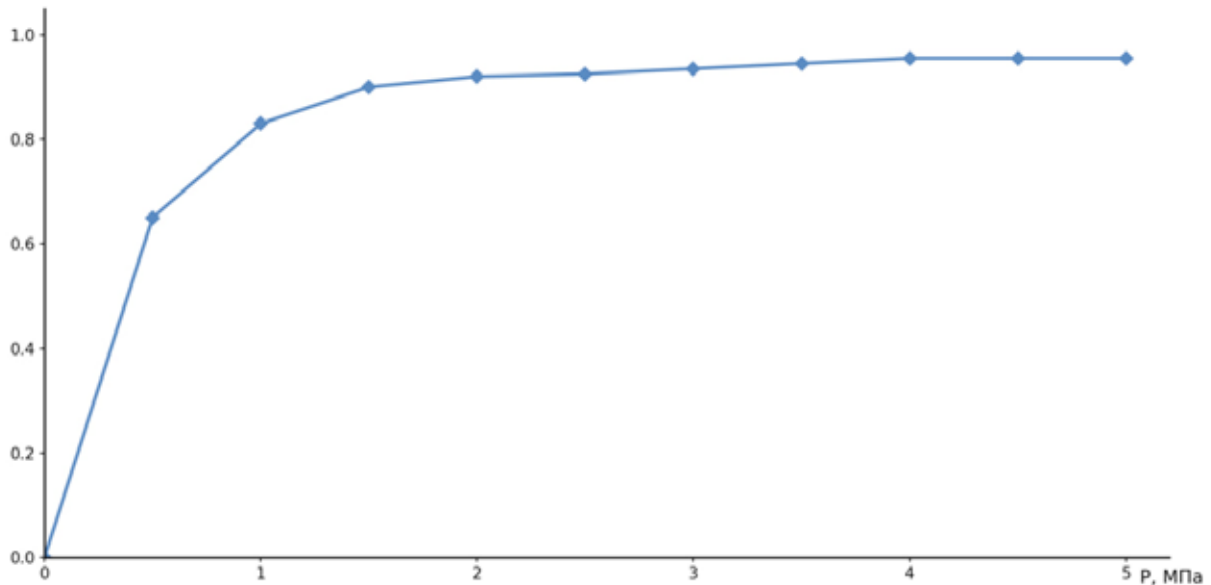


Рис. 2. Вплив тиску на коефіцієнт відтоку олії

Рівняння руху рідкої фази. Для опису процесу використовується закон Дарсі [7]:

$$V_F(z) = -\frac{k}{\mu} \cdot \frac{dP_{(z)}}{dy} \quad (1)$$

де $V_F(z)$ – швидкість руху рідини у пористому середовищі;
 μ – динамічна в'язкість олії;
 $dP_{(z)}$ – градієнт тиску в радіальному напрямку;
 k – проникність шару м'ятки.

Розгорнувши канал шнека на площину та розглянувши елементарний паралелепіпед товщиною dz , отримуємо розрахункову схему зони віджимання, яку слід подати на рисунку 3.

Оскільки витікання олії крізь зеєрну решітку відбувається в атмосферу, радіальний градієнт тиску можна записати у вигляді:

$$-\frac{dp_{(z)}}{dy} = P(z) / h \quad (2)$$

де h – висота каналу шнека.

Тиск уздовж зеєрної камери приймається експоненціально змінним:

$$P(z) = P_f \cdot e^{az} \quad (3)$$

де P_f – тиск на вході у зону фільтрування;
 a – коефіцієнт зміни тиску.

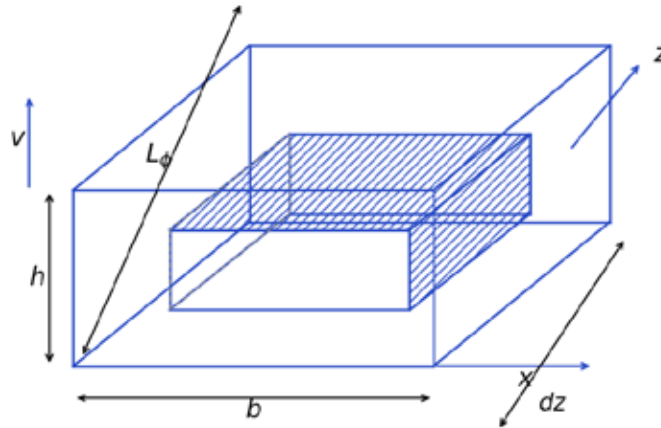


Рис. 3. Розрахункова схема зони віджимання

Коефіцієнт a визначається за формулою:

$$a = \frac{\ln\left(\frac{P_k}{P_f}\right)}{L_f} \quad (4)$$

де P_k – тиск у кінці зерної камери;

L_f – довжина зони фільтрування.

Баланс потоків олії в зерній зоні. Потік олії, що надходить в елементарний об’єм разом із матеріалом, можна записати як:

$$m(z) = V_{zcp} \cdot hb \cdot c(z) \quad (5)$$

де V_{zcp} – середня швидкість руху сировини вздовж каналу;

b – ширина каналу;

$c(z)$ – локальна об’ємна концентрація вільної олії.

Потік олії, що виходить з фільтратом, становить:

$$m_\phi(z) = V_F(z) \cdot c(z) \cdot b \cdot dz \quad (6)$$

Потік олії, що залишається у м’ятці на виході з елементарної ділянки:

$$m(z + dz) = V_{zcp} \cdot hb \cdot c(z + dz) \quad (7)$$

Рівняння балансу потоків матиме вигляд:

$$m(z) = m_\phi(z) + m(z + dz) \quad (8)$$

За умови неперервності функції концентрації:

$$c(z + dz) = c(z) + \frac{dc(z)}{dz} dz \quad (9)$$

Після підстановки співвідношень і перетворення отримаємо диференціальне рівняння процесу фільтрації:

$$\frac{dc(z)}{dz} = -\frac{kP_f}{\mu h^2 V_{zcp}} e^{az} dz \quad (10)$$

за початкової умови: $c(0) = c_0$.



Інтегрування дає залежність для зміни концентрації вільної олії вздовж зерної камери:

$$c(z) = c_0 \cdot e^{-\frac{kP_f}{\mu h^2 V_{zcp} a} \cdot (1 - e^{az})} \quad (11)$$

Цей вираз дозволяє визначати вміст вільної олії у будь-якій точці робочої зони. Зміна вмісту олії в м'ятці вздовж каналу шнека ілюструється на рисунку 4.

Кінцева концентрація олії на виході із зони фільтрування визначається при $z = L_f$.

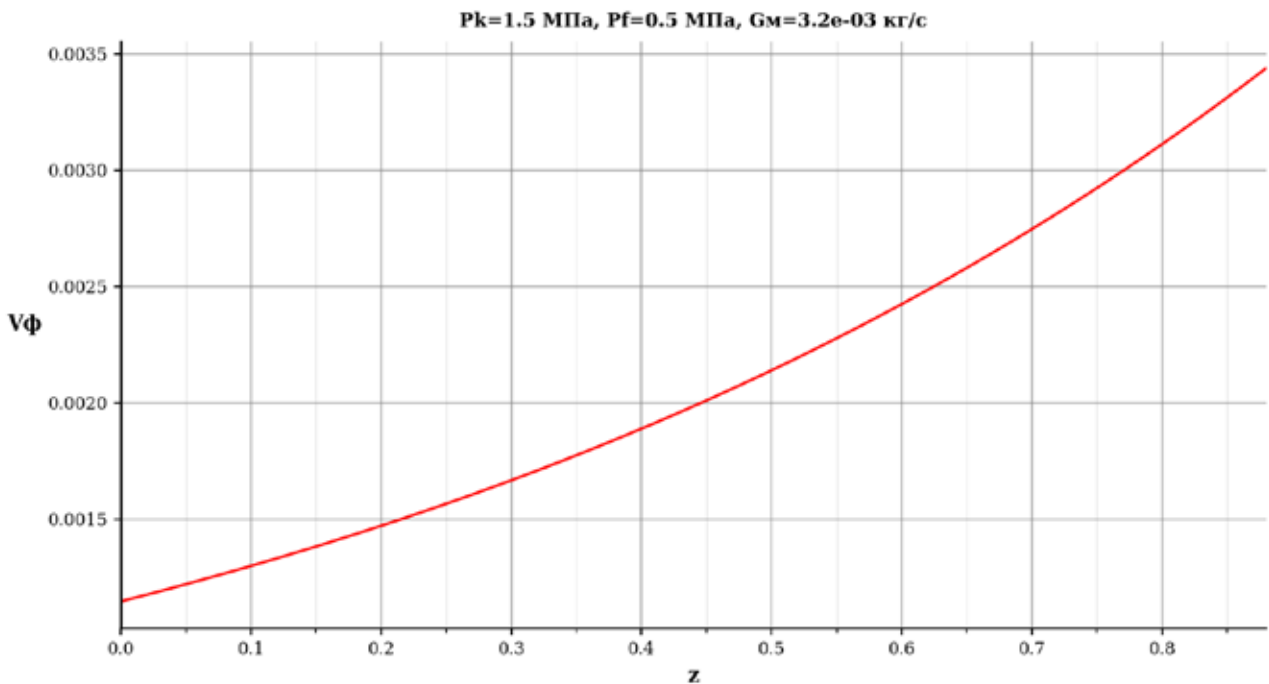


Рис. 4. Зміна вмісту олії в м'ятці по довжині каналу шнека

Це значення є одним із ключових показників ефективності роботи преса, оскільки характеризує залишковий вміст олії у макусі.

Визначення середньої концентрації та продуктивності преса. Концентрацію відфільтрованої олії у будь-якій точці зерної камери можна знаходити як різницю між початковою і поточною концентраціями вільної олії в м'ятці. Середньоінтегральне значення концентрації відфільтрованої фази по довжині робочої зони є необхідним для подальшого визначення продуктивності преса. Середня швидкість фільтрації по довжині зони віджимання:

$$\bar{V}_\phi = \frac{1}{L_f} \int_0^{L_f} V_\phi(z) dz \quad (12)$$

Після інтегрування одержуємо:

$$\bar{V}_\phi = \frac{k(P_k - P_f)}{L_f \mu h a} \quad (13)$$

Тоді продуктивність шнекового преса за олією визначається:

$$Q_m = \bar{V}_\phi \cdot S_\phi \cdot \bar{c}_\phi \quad (14)$$

де $S_\phi = b \cdot L_f$ – площа поверхні фільтрації;

\bar{c}_ϕ – середня концентрація відфільтрованої олії.

Зміна швидкості фільтрації по довжині каналу шнека наведено на рисунку 5, а швидкість зміни безрозмірної концентрації олії в м'ятці – на рисунку 6.

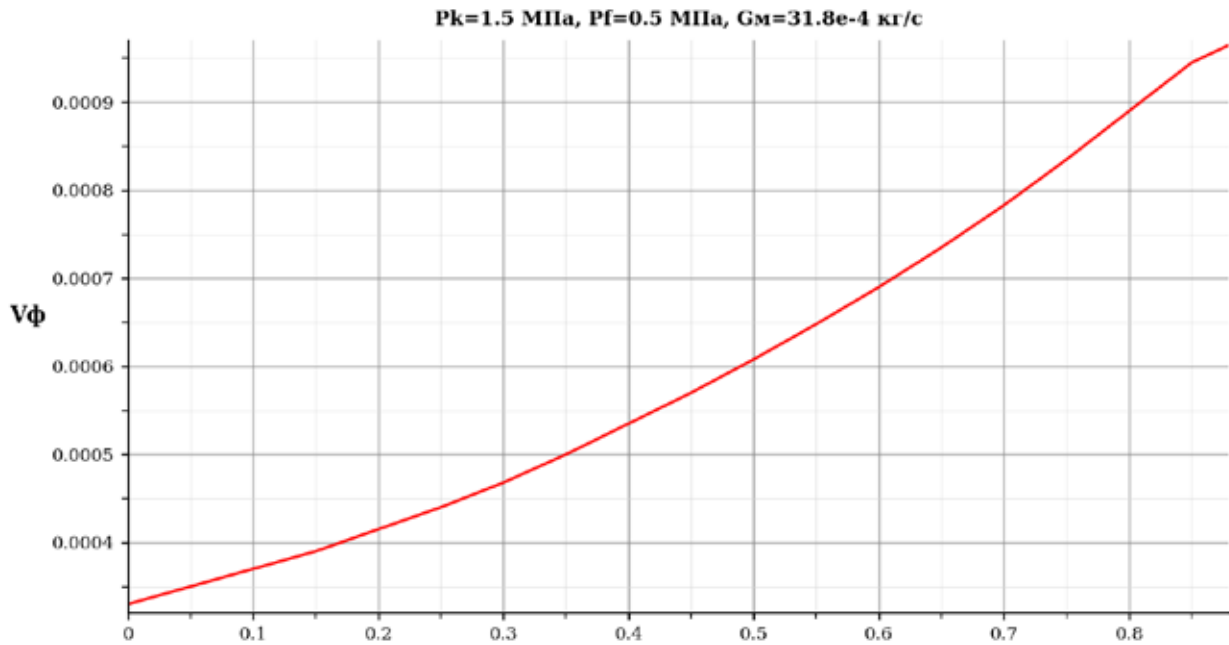


Рис. 5. Зміна швидкості фільтрації по довжині каналу шнека

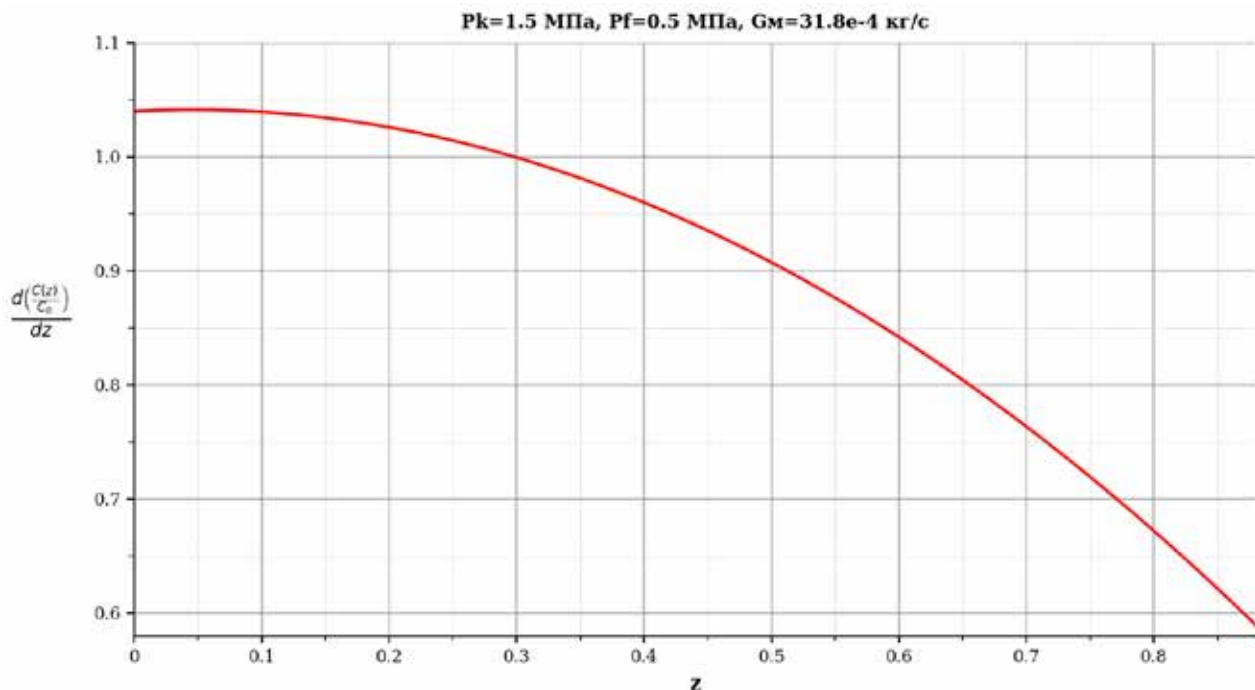


Рис. 6. Швидкість зміни безрозмірної концентрації олії в м'ятці по довжині каналу шнека

Крім того, для повнішої характеристики процесу слід навести графік зміни безрозмірної середньої концентрації відфільтрованої олії по довжині каналу шнека. Це дозволяє виявити

ділянки найбільш інтенсивного відокремлення рідкої фази. Відповідну залежність доцільно оформити у вигляді рисунку 7.

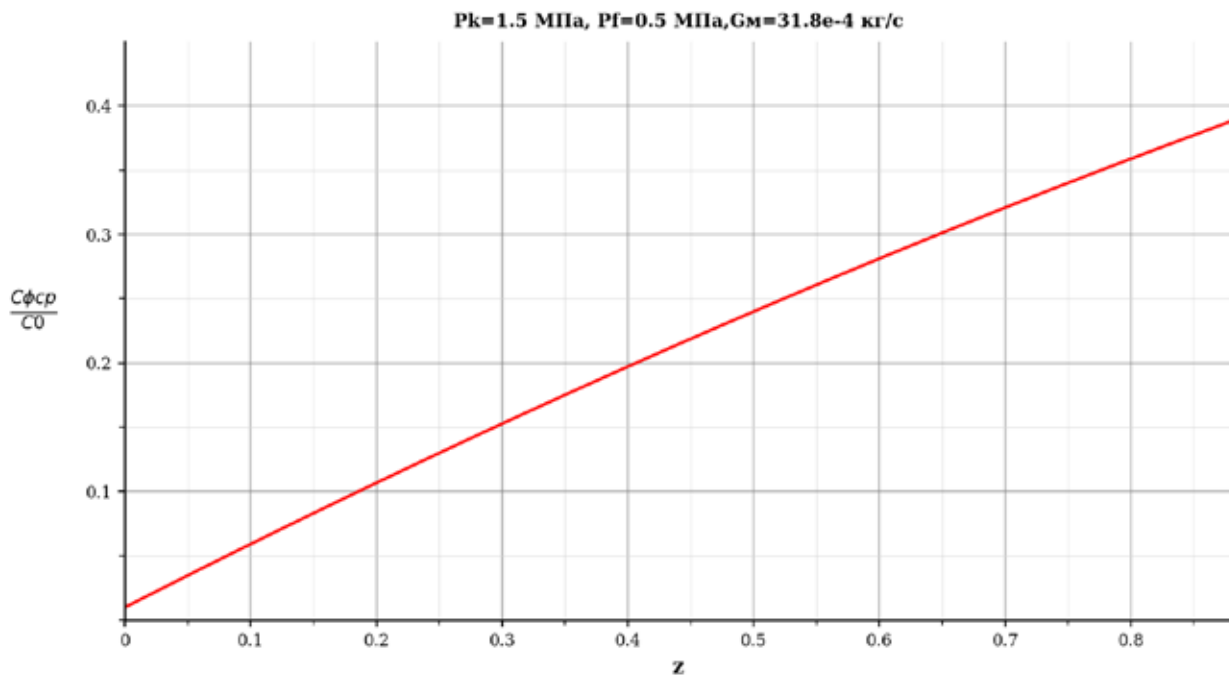


Рис. 7. Зміна середньої концентрації відфільтрованої олії по довжині каналу шнека

Практичне значення моделі. Запропонована математична модель має прикладне значення для інженерних розрахунків, оскільки дозволяє не лише оцінити продуктивність шнекового преса за олією, а й ідентифікувати проникність шару м'ятки за відомих експериментальних показників роботи. Це, своєю чергою, відкриває можливість оптимізувати геометричні параметри зерної камери, робочий тиск, швидкість подачі сировини та інші параметри технологічного процесу. Актуальність такого підходу підтверджується сучасними дослідженнями, у яких розглядаються не лише конструктивні зміни пресів, а й системи автоматизованого контролю і керування процесом віджимання.

Висновки. У результаті опрацювання процесу механічного віджимання олії в шнековому пресі сформовано математичну модель фільтраційного відокремлення рідкої фази в зерній зоні. Показано, що для опису руху олії в ущільненій м'ятці доцільно використовувати закон Дарсі, а зміну тиску вздовж робочої зони можна задати експоненціальною функцією. На основі рівняння матеріального балансу отримано залежності, які дозволяють визначати локальний та кінцевий вміст вільної олії в м'ятці, середню концентрацію відфільтрованої фази і продуктивність шнекового преса за олією. Це створює основу для інженерного аналізу роботи обладнання та вибору раціональних параметрів процесу. Практична цінність запропонованого підходу полягає у можливості застосування моделі під час проектування нових шнекових пресів, удосконалення існуючих конструкцій та подальшого розвитку систем автоматизованого керування процесом віджимання рослинної олії.

Список використаних джерел

1. Дідур В. В., Журавель Д. П., Шокарев О. М., Вюник О. В., Комар А. С. Аналіз технологій отримання олії з олійних культур. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання*. Запоріжжя : ТДАТУ, 2022. Вип. 12, том 3. С. 180–189. DOI: 10.31388/2220-8674-2022-3-17.



2. Процеси і апарати. Механічні та гідромеханічні процеси : підручник / В. С. Бойко, К. О. Самойчук, В. Г. Тарасенко [та ін.]. Мелітополь, 2021. 445 с.
3. Дідур В. А., Ткаченко А. В. Термодинамічні характеристики елементів насіння соняшника. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК*. К., 2016. Вип. 251. С. 19–30.
4. Корендій В. М., Гавран В. Б. Аналіз процесу витискання олії та визначення перспектив автоматизації роботи шнекового преса. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2024. Т. 34, № 1. С. 85–90. DOI: 10.36930/4034011286.
5. Hudzenko M., Vasylyv V., Zheplinska M., Sarana V., Gorenkov D. Study of the effectiveness of the design of the oil removal channels of screw presses for squeezing out oil. *Animal Science and Food Technology*. 2023. Vol. 14, No. 4. P. 58–73. DOI: 10.31548/animal.4.2023.58.
6. Lobur M., Korendiy V., Kachur O., Havran V. Automation of the Oil Extraction Process Performed by Means of a Screw Press. *Acta Mechanica et Automatica*. 2024. Vol. 18, No. 4. P. 166–176. DOI: 10.2478/ama-2024-0070.
7. Дарсі А. *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Paris : Victor Dalmont, 1856. 647 p.
8. Bear J. *Dynamics of Fluids in Porous Media*. New York : American Elsevier Publishing Company, 1972.
9. Gupta M. K. *Principles of Vegetable Oil Extraction*. Boca Raton : CRC Press, 2022.
10. Didur V., Tkachenko V., Tkachenko A., Didur V., Vereshchaga A. Rheology of the pulp of castor-oil seeds and its effect on the process of pressing. *ADVANCES OF SCIENCE: Proceedings of articles the international scientific conference*. Karlovy Vary, Kyiv : MCNIP, 2018. P. 609–618.

Дата першого надходження статті до видання: 16.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 12.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 25.05.2026

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



V. Zubko¹, I. Petrychenko²

¹*Poltava State Agrarian University*

²*Uman National University*

MATHEMATICAL MODELING OF THE VEGETABLE OIL FILTRATION PROCESS IN THE GRAIN ZONE OF A SCREW PRESS

Summary

Mechanical pressing of oilseeds remains one of the most common methods of obtaining vegetable oil, especially in cases where the relative simplicity of the technological scheme, energy saving and preservation of valuable product components are important. In screw presses, the main technological processes occur under conditions of gradual compaction of the material, pressure increase and filtration separation of the liquid phase through a sieve grid. That is why the efficiency of such equipment is largely determined by the laws of oil movement in a compacted porous medium. The article considers the process of mechanical extraction of vegetable oil in a screw press and proposes a mathematical model of oil filtration in the seer zone. The oil-bearing raw material is represented as a two-component system consisting of a porous solid framework and a liquid phase filling its free volume. Darcy's law is used to describe the movement of the liquid phase, while the pressure distribution along the working section of the press is assumed to follow an exponential dependence. On the basis of the flow balance equation, analytical relationships were obtained that make it possible to determine the change in the concentration of free oil in the pressed material along the seer chamber, the average concentration of the filtered phase, and the oil productivity of the press. It was established that an increase in pressure toward the outlet of the working zone intensifies the filtration process and reduces the residual oil content in the cake. The proposed mathematical model adequately reflects the physical nature of the processes occurring during oil extraction and can be used both for analyzing the operation of existing screw presses and for designing and optimizing their technological parameters.

Keywords: screw press, vegetable oil, sieve chamber, filtration, mathematical model, press performance, oil extraction, porous medium.



DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-2-23>

UDC664.644.5:664.64.016

O. O. Simakova, PhD, Associate Professor
R. P. Nykyforov, PhD, Associate Professor
S. I. Abdullin, Master Student
K. S. Soloviova, Student

ORCID: 0000-0002-4432-8337

ORCID: 0000-0001-9823-9551

Kyryvi Rih National University

e-mail: simakova@donnuet.edu.ua

SANITARY AND TECHNOLOGICAL PROCEDURES AND DETERMINATION OF MICROBIOLOGICAL PARAMETERS IN THE PROCESS OF MAKING YEAST-FREE BREAD

Summary. This work aims to apply sanitary and technological methods to prepare grain for grinding. It focuses on producing whole-ground wheat flour by the disintegration-wave method and making bread from it. The bread is made by mechanically loosening the dough without using baker's yeast.

The research results show that sanitary and technological methods improve grain cleaning and preparation for grinding. Whole wheat flour and bread can be made by mechanical loosening of the dough without baker's yeast, using new technology. Microbiological purity of the flour increased when using traditional grain preparation methods, the disintegration-wave grinding method, and adding concentrated apple juice to yeast-free bread. This approach produces bread with higher nutritional value.

Keywords: yeast-free bread, whole grains, wheat flour, bakery products, dough.

Problem statement. Flour products, especially wheat flour products, currently form the basis of human nutrition and are products of daily consumption among all contingents of the population. The most common type of flour products is bakery products, of which there are several hundred items [1]. In this regard, the quality and nutritional value of bread and bakery products hold paramount importance.

To create bread products with different functional properties, it is necessary to develop fundamentally new technologies and equipment that provide complex processing of grain raw materials based on modern electrophysical methods, which would not only preserve the technological properties of grain and its processed products, but also improve the quality of bakery products, ensuring their microbiological purity.

Recent research analysis. It should be emphasized that, for a healthy diet, bread made from whole-grain or low-extraction flour of diverse cereals is preferred [2].

A method for obtaining bread without the use of baker's yeast based on flour from whole-ground wheat grain has been developed using a fundamentally new technology by mechanically loosening the dough under excess air pressure entering the dough mixing chamber of the whipping unit during kneading. The quality of such bread largely depends on the quality of the grain used, on the surface of which there is a residual amount of heavy metals during the cultivation process, mycotoxins, pesticides, and other pollutants [3]. To obtain yeast-free bread by mechanical method of loosening the dough, it is necessary to carefully carry out the incoming control of the grain and its preliminary preparation for grinding into flour, since in this technology, when obtaining the dough, there is no fermentation process and the resulting yeast metabolic products (organic acids, ethyl alcohol, anhydrides, etc.), which prevent the development of foreign microflora in the product [4].

Formulation of article objectives (statement of the task). The article is aimed at applying sanitary and technological measures in preparing grain for grinding, obtaining flour from whole-ground wheat



grain by the disintegration-wave method, and bread based on it by the mechanical method of loosening dough without the use of baker's yeast.

To achieve this goal, the work is planned to be carried out in three stages: at the first stage, to study the quality of grain at separate stages of its preparation for grinding; at the second stage – to analyze the quality of whole grain flour obtained by the disintegration-wave method with a weak ultra-high-frequency information influence; on the third – to assess the quality of bread based on flour from whole-ground wheat grain, obtained by mechanical method of loosening dough without baker's yeast.

Main part. In order to ensure the quality and safety of flour from whole-ground wheat grain, the quality of the soft wheat grain used in the 3rd class was assessed. In terms of all organoleptic and physicochemical indicators, the grain met the standardized requirements of DSTU 3768:2019.

The dynamics of changes in the content of mycotoxins in the studied wheat grain at certain stages of its preparation for grinding are presented in the Table 1.

Table 1

Change in mycotoxin content in wheat grain

№	Mycotoxin content, µg/kg	Grain sample number				
		1	2	3	4	5
1	Aflatoxin B1	4.3	3.3	2.8	1.3	Absent
2	T-2 toxin	91.4	74.3	Absent	Absent	Absent
3	Fumonisin B1	768	631	151	22	Absent

In the initial sample of wheat grain No. 1, the content of mycotoxins did not exceed the values of the maximum permissible concentrations specified in the requirements of the technical regulation of grain composition No. 835/9434 as amended by the Order of the Ministry of Agrarian Policy No. 442 of 16.11.2004. T-2 toxin – by 18.7 %, fumonisin B1 – by 17.8 %. After passing the grains through the first wholemeal grain mill, where their surface is dry cleaned from dust, dirt, sand, torn fruit shells, foreign impurities (light, mineral, ferro-impurities), as well as after partial peeling, separation of shells and damaged grain, in sample No. 3 the content of aflatoxin decreased by another 15.2 %, fumonisin B1 – by 76.1 %, the content of T-2 toxin was not detected at all. After two more processing of grain on the second and third wholemeal grain mills with simultaneous cleaning of its surface with the help of brush devices, the content of aflatoxin B1 in sample No. 4 decreased by another 53.6 %, fumonisin B1 by 85.4 %, and in sample No. 5, the content of mycotoxins was not detected. Deoxynivalenol, ochratoxin, and zearalenone were not detected in the test samples.

The initial content of the pesticide hexachlorane in the grain was 0.22 mg/kg. This is permissible according to the technical regulations. During preparatory operations, the concentration of the pesticide in the grain significantly decreased to 0.18 mg/kg, approximately a 20 % reduction. After grinding the grain into flour using the disintegration-wave transformation method, only trace amounts of the studied pesticide were detected. A significant reduction in pesticide residues in grain can be explained, among other things, by the effect of a physical method on the product, particularly heating [5].

It has been proved that thorough cleaning of grain, repeated passage of it through wholemeal grain mills and grinding it by the method of disintegration-wave transformation with the energy of an ultra-high frequency electromagnetic field provide effective disinfection of grain from various pollutants, which allows, among other things, to reduce the microbiological content of whole-ground flour and ensure the safety of bread obtained by mechanical method of loosening dough.

The results of the analysis of quality indicators of two batches of flour from whole-ground wheat grain, obtained by different methods and an excellent degree of grinding [6], are presented in the Table 2.



Table 2

Main quality indicators of whole-ground wheat flour

№	Quality Score	Characteristics of flour from whole ground wheat grain (norm for GSTU 46004-99)	Whole-ground wheat flour	
			Batch I (obtained on the D-150 disintegrator)	Batch II (obtained on a roller mill)
<i>Organoleptic indicators</i>				
1	Color	White with a grayish tint		
2	Taste	Typical for this type of flour, without foreign flavors, not sour, not bitter		
3	Aroma	Typical for this type of flour, without foreign odors, not musty, not moldy		
4	Presence of mineral impurities	When chewing the flour, there should be no crunchiness	No crunching is felt	
5	Pest infestation	Not allowed	Not detected	
<i>Physico-chemical indicators</i>				
6	Mass fraction of moisture, %	No more than 15	12.2	13.5
7	Mass fraction of ash in terms of dry matter, %	Not less than 0.07% below the ash content of the grain before cleaning, but not more than 2%	1.6	1.5
8	Mass fraction of raw gluten, %	Not less than 20	24	22
9	Compressive deformation of raw gluten, conventional units of the GDI (Gluten Deformation Index) device	–	58.3	62.1
10	Raw gluten quality, conventional units of the GDI (Gluten Deformation Index) device	Not lower than group II	I	I
11	Grinding fineness, %:	Not more than 2	Dispersion of flour particles, $\mu\text{m}/\%$	
	residue on a wire mesh sieve according to RD (regulatory documentation)	Sieve № 045	0–25/7.5	0–60/15
	passage through a sieve according to RD (regulatory documentation)	At least 50 of silk fabric № 38 or polyamide fabric № 41/43 PA	25–30/85 30–100/7.5	60–90/80 90–100/5
12	Falling number (FN), s	Not less than 160	294	285
13	Titrated acidity, deg.	–	3.7	3.4
14	Metal-magnetic impurities, mg per 1 kg of flour; the size of the surrounding particles in the largest linear dimension 0.3 mm and (or) mass no more than 0.4 mg	Not more than 3	1.7	1.8

Whole-grain flour obtained by grinding grain on a disintegrator has a lower moisture content – 12.2 %, since with finer grinding there is stronger heating of the product and partial removal of capillary-bound moisture, and a higher content of raw gluten – 24 % (on dry matter). The total proportion of free amino acids in the protein increases on average by 1,5–2 % (on dry matter). During fine grinding, two continuous processes occur: mechanical deformation and endogenous heating of the product, while the crystal lattice of starch grains is destroyed and the so-called free starch is released from them, which contains a small part of trapped and adsorption-bound proteins, and the more intense the impact of grinding mechanisms on the grain, the more deformed starch with a destroyed crystal lattice is formed. In this case, when grinding soft wheat, up to 45 % of free starch is formed in the flour, with a protein content of about 2.7 % [7]. Due to the increase in the dispersion and specific surface area of the flour particles obtained in the disintegrator, the proportion

of free water-soluble proteins-albumins increases by 7.5 mg, globulins by 15.3 mg (per 100 g of product), which is on average 1.4 and 4.9 % higher, respectively, than in flour ground by a roller method. Water-soluble proteins, as surfactants, are primarily responsible for the formation of a foam structure in whipped dough. During intensive mixing of flour and water, the flour particles are first wetted with water; the water molecules are then hydrated by the hydrophilic surface, the flour particles swell, and the water-soluble substances, including water-soluble proteins, are dissolved in the solution. Flour from whole-grain wheat contains about 2 g/100 g of water-soluble proteins. An increase in the amount of even a small proportion of water-soluble proteins contributes to the acceleration of the formation of foam films of air bubbles and better saturation of the dough with air. During highly intensive mixing of the dough, amino acids with polar and non-polar, positively and negatively charged side chains in both gluten and water-soluble protein fractions, as well as an increased amount of gelatinized starch during baking, participate in the formation of the bread crumb structure with increased humidity [8]. The results of assessing moisture binding in bread by the thermogravimetric method showed an increase in the proportion of monomolecularly bound moisture by 7–9 %, which reduces the activity of water in bread and slows the staling process and the development of microorganisms during storage.

The organoleptic and physicochemical indicators of bread obtained by mechanical dough loosening without baking yeast, based on flour from whole-grain wheat, meet the requirements of DSTU 7517:2014 and are presented in Table 3.

Table 3

Organoleptic and physicochemical indicators of yeast-free bread

№	Indicator	Indicator value
<i>Organoleptic:</i>		
1	Surface	Rough, without large cracks or tears
2	Color	Golden yellow
3	Taste and aroma	Corresponds to bread made from whole grain flour, without extraneous taste and smell
4	Condition of the crumb	Baked, not moist to the touch, without lumps or traces of unknaded dough
<i>Physico-chemical:</i>		
5	Crumb moisture, %	51.7
6	Porosity, %	76.0
7	Acidity, deg.	3.1

The results of determining and calculating the nutritional and energy value of bread without the use of baker's yeast based on flour from whole-grain wheat are presented in Table 4.

Table 4

Nutritional and energy value of yeast-free bread and the degree of satisfaction of the body's daily need for essential nutrients

№	Nutrient	Average daily needs of the human body [9]	Contents per 1 serving (100g of bread)	Satisfaction of daily body needs, %
1	2	3	4	5
1	Protein, g	75	8.7	11.6
2	Fat, g	83	1.1	1.3
3	Digestible carbohydrates, g	365	36.3	9.9
4	Fiber, g	30	6.26	20.9
5	Organic acids, g	2	3,3	165.0

Continuation of Table 4

1	2	3	4	5
Minerals, mg:				
6	Potassium	3500	198.7	5.7
7	Calcium	1000	31.7	3.2
8	Magnesium	400	60.3	15.1
9	Phosphorus	1000	310.5	31.1
10	Iron	14	3.31	23.6
Vitamins, mg:				
11	B1	1.5	0.31	20.7
12	B2	1.8	0.11	4.3
13	PP	20	4,9	24,5
Energy value, kcal (kJ)		2500 (10 467)	169 (708)	6.8

Compared to traditional wheat-flour bread, the developed bread has higher nutritional value and lower calorie content. It contains more proteins – 1.5 times, carbohydrates – 1.2 times, as well as calcium, potassium, magnesium, and phosphorus – 3.2, 2, 1.3, 1.2 times, respectively. The resulting product contains a significant amount of fiber and vitamins B1 and PP, with degrees of satisfaction of 20.9, 20.7, and 24.5 %, respectively.

The biological value of a protein according to the amino acid scale method is determined by the composition of essential (not synthesized in the body) amino acids. The chemical score of the tested protein is the smallest ratio obtained for the content of any of the essential amino acids in the tested protein to its content in the reference protein. To assess the biological value of the protein of yeast-free bread, its amino acid score was calculated relative to the amino acid score of the reference protein [9]. The biological value of the protein of yeast-free bread is limited by the lysine content and is 52.9 %. The content of essential amino acids and some indicators of the biological value of the protein of yeast-free bread are presented in Table 5.

Table 5

Amino acid profile of yeast-free bread protein based on whole-wheat flour

№	Essential amino acid	FAO/WHO standard, g/100g of protein	Acid content, g/100g of product protein	Amino acid content, %
1	Lysine	4.5	2.38	52.9*
2	Leucine	5.9	5.87	99.5
3	Isoleucine	3.0	3.08	102.7
4	Valine	3.9	3.62	92.8
5	Methionine + cystine	2.2	1.26	57.3
6	Threonine	2.3	2.52	109.6
7	Tryptophan	0.6	1.05	175.0
8	Phenylalanine + tyrosine	3.8	4.54	119.5

Note * – limiting amino acid.

The excess amino acids in the protein can be used to meet the body's energy needs. The average excess of the amino acid score for essential amino acids relative to the limiting amino acid is characterized by KVAS (%), which shows the excess of essential amino acids used for plastic needs; in this case, the value is 48.2 %. The potential (theoretical) biological value of the protein of yeast-free bread is 51.8 %. To improve the taste characteristics, increase the nutritional value, and enhance the microbiological purity of yeast-free bread, concentrated apple juice was added to the recipe at 3 % of the dough mass [10]. The obtained indicators of microbiological contamination

of the resulting bread with concentrated apple juice, packaged in a transparent polypropylene film "BIAXPLEN", after 7 days of storage, are presented in the Table. 6.

Table 6

Microbiological indicators of yeast-free bread

№	Indicator	Wholemeal wheat bread (control)	Bread made from whole-grain wheat flour obtained using the disintegration-wave method
1	Overall bacterial population, CFU/g	4.6×10^2	3.1×10^2
2	Mold, CFU/g	19	13
3	Yeast, CFU/g	Less than 10	Less than 10
4	Coliform bacteria (coliforms)	Absent	Absent

The results show that bread made with whole-grain wheat flour has a seeding rate 32.6 % lower than bread made with wheat flour (control). This proves that careful processing of grain in the electromagnetic field of a disintegrator, as well as the use of concentrated apple juice in the bread recipe, which contains a significant amount of malic, citric and tartaric organic acids, which contribute to the suppression of the growth of microflora and have an inhibitory effect on it, allows you to increase the microbiological purity of the product and extend its shelf life [8]. Studies in yeast-free bread samples with mold showed that mold appeared on the fifth day in the control, and on the seventh day in the developed bread. Coliforms were absent in both samples, and potato disease during storage was not detected in any sample.

Conclusions. The results of experimental studies illustrate the effectiveness of implementing all sanitary and technological methods for cleaning and preparing grain for grinding, obtaining flour from whole wheat grain, and producing bread based on it by mechanical dough loosening without the use of baker's yeast, using a new technology. Increasing the microbiological purity of flour from whole wheat grain became possible using traditional methods of preparing grain for grinding, the disintegration-wave method of grinding grain into flour, and adding concentrated apple juice to the recipe for yeast-free bread, enabling the production of a product of increased nutritional value.

Bibliography

1. Баланси та споживання основних продуктів харчування населенням України. Київ : Консультант, 2016. 54 с.
2. Bartkiene E., Özogul F., Rocha J. M. Sourdough lactic acid bacteria as functional agents in bread production. *Foods*. 2022. Vol. 11, No. 3. Art. 452. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11030452>
3. Özogul F., Rocha J. M., Bartkiene E. (eds.). Handbook of Sourdough Microbiota and Fermentation: Food Safety, Health Benefits, and Product Development. London : Elsevier, 2024. 520 p.
4. Gobbetti M., De Angelis M., Di Cagno R., Calasso M., Archetti G., Rizzello C. G. Sourdough lactic acid bacteria and yeasts: Diversity, technological and functional properties. *Food Microbiology*. 2016. Vol. 37. P. 11–22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fm.2013.04.012>
5. Лозова Т. М. Наукові основи формування споживних властивостей і зберігання якості борошняних кондитерських виробів : монографія / ред. І. В. Сирохман. Львів : ЛКУ, 2009. 456 с.
6. Coda R., Rizzello C. G., Gobbetti M. Use of sourdough fermentation and pseudo-cereals and leguminous flours for the making of functional bread enriched of γ -aminobutyric acid (GABA). *International Journal of Food Microbiology*. 2010. Vol. 137(2–3). P. 236–245. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2009.12.010>
7. Simakova O., Korenets Yu., Yudina T., Nazarenko I., Goriainova Iu. Examining a possibility of using purple amaranth in the technology for products made of yeast dough. *Eastern European Journal of Enterprise technologies: Technology and equipment of food production*. 2018. Vol. 2, №11 (92). P. 57–64. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.127173>.



8. Mykhaylov V., Samokhvalova O., Kucheruk Z., Kasabova K., Simakova O., Goriainova Iu., Rogovaya A., Choni I. Influence of microbial polysaccharides on the formation of structure of protein-free and gluten-free flour-based products. *Eastern European Journal of Enterprise technologies: Technology and equipment of food production*. 2019. Vol. 6, № 11 (102). P. 23–32. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.184464>.
9. Ray B., Bhunia A. *Fundamental Food Microbiology*. 5th ed. Boca Raton: CRC Press, 2013. 663 p.
10. Сирохман І. В., Лозова Т. М. Наукові спрямування у поліпшенні споживних властивостей та якості борошняних кондитерських виробів. *Наук. праці НУХТ*. 2008. № 25. С. 40–43.

Дата першого надходження статті до видання: 10.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 06.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 25.05.2026

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



О. Сімакова, Р. Никифоров, С. Абдуллін, К. Соловійова

Криворізький національний університет

САНІТАРНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕДУРИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ МІКРОБІОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ У ПРОЦЕСІ ВИГОТОВЛЕННЯ БЕЗДРІЖДЖОВОГО ХЛІБУ

Анотація

Метою даної роботи є впровадження санітарно-технологічних процедур на етапах підготовки зерна до подрібнення, виготовлення борошна з неушкодженого зерна пшениці за допомогою дезінтеграційно-хвильового методу, а також виробництва на його основі хлібобулочних виробів шляхом механічного розпушування тіста без додавання пекарських дріжджів.

Для проведення дослідження було використано м'яке зерно пшениці 3-го класу (згідно ДСТУ 3768:2019) та борошно з цільнозмеленого зерна пшениці (згідно ГСТУ 46004-99). Рівень мікотоксинів, таких як афлатоксин В1, Т-2 токсин, фумонізін В1, охратоксин та зеараленон, визначався імуноферментним аналізом. Вміст гексахлору в зерні виявлявся за допомогою газової хроматографії. Очищене зерно подрібнювали методом дезінтеграційно-хвильового впливу з мінімальною потужністю надвисокочастотного поля (десяти частки мікровоата) на довжинах хвиль близько 8 мм, використовуючи стандартну конфігурацію генератора на діоді Ганна. Тісто для хліба, розпушеного механічним способом, готували шляхом змішування та збивання компонентів рецептури на напівпромисловій установці змішувально-збивально-формуєчного типу. Процес здійснювався при частоті обертання мішалок 16 с^{-1} , температурі $29 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ та тиску повітря 0,4 МПа протягом 1,5 хвилин. Випікання сформованих заготовок відбувалося в ротаційній печі RFS-9E при температурі $195 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ протягом 36–38 хвилин. Оцінка якості готового хліба проводилася відповідно до стандартів ДСТУ 7517:2014. Мікробіологічну чистоту хліба відстежували протягом 7 днів зберігання, аналізуючи кількість мезофільних аеробних та факультативно-анаеробних мікроорганізмів (МАФAM), наявність плісняви, дріжджів та бактерій групи кишкової палички (БГКП). Поява плісняви фіксувалася візуально, а розвиток картопляної хвороби хліба контролювався щодня згідно з рекомендованими методиками.

Представлені експериментальні дані демонструють результативність застосування комплексу санітарно-гігієнічних та технологічних заходів на етапах очищення та підготовки зерна до помелу, виробництва борошна з цільнозмеленого зерна та виготовлення на його основі хліба із застосуванням механічного розпушування тіста без дріжджів, згідно з розробленою інноваційною технологією. Покращення мікробіологічних показників борошна з цільнозмеленого зерна досягнуто завдяки стандартним методам підготовки зерна, дезінтеграційно-хвильовому помелу, а також додаванню концентрованого яблучного соку до рецептури, що сприяло підвищенню харчової цінності кінцевого продукту.

Ключові слова: бездріжджовий хліб, цільнозмелене зерно, пшеничне борошно, хлібобулочні вироби, тісто.

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-2-24>

УДК 664.7.047:621.929.7:519.87

М. В. Шевчук¹, PhD, доц.

ORCID: 0000-0002-0123-0348

Г. І. Дашивець², канд. техн. наук, доц.

ORCID: 0000-0003-2612-6077

¹Уманський національний університет садівництва²Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: shevchuk_m2011@ukr.net

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРИ ЕКСТРУЗІЙНІЙ ОБРОБЦІ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ

Анотація. У статті розглянуто особливості моделювання процесів, що відбуваються під час екструзійної обробки рослинної сировини. Встановлено, що ефективність екструзійного процесу значною мірою залежить від фізико-механічних, теплофізичних і технологічних характеристик матеріалу, зокрема вологості, олійності, вмісту оболонки та структурної неоднорідності сировини. Узагальнено підходи до математичного опису фазових і тепломасообмінних перетворень у матеріалі під дією тиску, температури та механічного зсуву. Наведено аналітичні залежності, що дають змогу враховувати вплив технологічних характеристик сировини на перебіг процесу.

Ключові слова: екструзійна обробка, математичне моделювання, рослинна сировина, вологість, олійність, лушпинність, тепло- і масообмін, технологічні характеристики, екструдер.

Постановка проблеми. Сучасні технології переробки рослинної сировини активно розвиваються у напрямі енергоощадних та інтенсивних процесів, серед яких особливе місце займає екструзійна обробка. Вона дозволяє одночасно здійснювати термомеханічну модифікацію сировини, підвищувати її засвоюваність, змінювати структурно-механічні властивості та формувати кінцевий продукт із заданими характеристиками. Однак складність фізико-хімічних перетворень, що відбуваються під час екструзії (зміна вологості, температури, тиску, в'язкопластичної поведінки матеріалу), ускладнює аналітичний опис і керування процесом. Наявні підходи до опису екструзійних процесів часто базуються на емпіричних залежностях або спрощених моделях, які не враховують повною мірою багатофакторний характер впливів. Це призводить до обмеженої точності прогнозування параметрів процесу та складності оптимізації режимів роботи екструдерів при переробці різних видів рослинної сировини. У зв'язку з цим виникає науково-прикладна задача розроблення та вдосконалення математичних моделей, які дозволяють адекватно описувати процеси екструзійної обробки з урахуванням реологічних властивостей сировини, тепломасообміну та енергетичних витрат. Особливо актуальним є створення універсальних підходів до моделювання, які забезпечують підвищення ефективності технологічного процесу, стабільність якості кінцевого продукту та зниження енергоспоживання.

Таким чином, проблема полягає у недостатній точності існуючих моделей екструзійної обробки рослинної сировини та необхідності розробки більш адекватних математичних описів для оптимізації та керування цим складним технологічним процесом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Екструзійна обробка є одним із найбільш ефективних способів інтенсифікації технологічних процесів у харчовій, кормовій і переробній промисловості [1–3]. Вона поєднує механічний, тепловий і баричний вплив на матеріал, унаслідок чого змінюються його фізичні, структурні та технологічні властивості [4–6]. Якість кінцевого продукту, стабільність роботи обладнання та енергоефективність процесу значною мірою визначаються властивостями вихідної сировини та умовами її обробки [7–9]. Однією



з важливих проблем є складність прогнозування поведінки сировини в робочій камері екструдера. Під час руху матеріалу уздовж шнека одночасно відбуваються його ущільнення, нагрівання, зневоднення, пластична деформація та структурні перетворення [10–14]. Через це процес екструзії є багатофакторним, а його аналітичний опис потребує врахування великої кількості взаємопов'язаних параметрів. Саме тому математичне моделювання процесів при екструзійній обробці є важливим інструментом для розроблення раціональних режимів роботи обладнання.

У сучасних дослідженнях екструзійні процеси розглядаються як складні багатофакторні системи, в яких одночасно відбуваються термомеханічні, гідродинамічні та структурні перетворення сировини. Зокрема, встановлено, що під час екструзії змінюються реологічні властивості рослинної маси, тиск у матриці та ступінь деструкції біополімерів, що суттєво впливає на якість кінцевого продукту [15–18].

Велика кількість робіт присвячена використанню нетрадиційної рослинної сировини (буряковий жом, виноградні вичавки, овочеві добавки) у поєднанні з зерновими компонентами, що дозволяє не лише розширити сировинну базу, а й покращити функціонально-технологічні властивості екструдатів. При цьому показано, що режимні параметри процесу (вологість, температура, швидкість обертання шнека) є визначальними для стабільності структури продукту.

Окремий напрям досліджень пов'язаний із математичним моделюванням екструзійних процесів. Сучасні підходи базуються на використанні регресійних моделей, методів планування експерименту та комп'ютерного моделювання для опису залежності між параметрами процесу та якістю продукту. Зокрема, отримано моделі оптимізації процесу екструдуювання рослинних сумішей, які дозволяють прогнозувати показники якості та енергетичні витрати [19].

Важливим напрямом є також дослідження, спрямовані на вивчення гідродинаміки та тепломасообміну в робочих зонах екструдера. Використання чисельного моделювання дозволяє описати складні потоки матеріалу в шнекових системах та матриці, що відкриває можливості для оптимізації конструктивних параметрів обладнання [20].

Таким чином, аналіз останніх досліджень показує, що, незважаючи на значний прогрес у вивченні екструзійних процесів, залишаються недостатньо розвиненими універсальні математичні моделі, які б комплексно враховували реологічні властивості рослинної сировини, тепломеханічні процеси та енергетичні характеристики [21, 22]. Це зумовлює необхідність подальших досліджень у напрямі створення більш точних і адаптивних моделей екструзійної обробки.

Формулювання мети статті. Метою роботи є узагальнення теоретичних підходів до моделювання процесів при екструзійній обробці рослинної сировини та визначення ролі її технологічних характеристик у формуванні тепломасообмінних і структурних перетворень.

Для досягнення поставленої мети необхідно: розглянути основні технологічні характеристики сировини, що впливають на процес екструзії; проаналізувати їхній вплив на перебіг тепломасообмінних процесів; подати узагальнені аналітичні залежності для опису фазових перетворень; обґрунтувати необхідність врахування морфологічних і фізико-хімічних властивостей сировини при математичному моделюванні екструзійної обробки.

Основна частина. Під час екструзійної обробки рослинна сировина піддається комплексному впливу температури, тиску, механічного стискання та зсувних деформацій. Унаслідок цього в матеріалі одночасно відбуваються нагрівання, перерозподіл вологи, часткове руйнування клітинної структури, ущільнення та пластичне формування продукту. Інтенсивність цих змін залежить від технологічних характеристик сировини, серед яких особливе значення мають олійність, вологість і вміст оболонки.



Для багатокомпонентної рослинної сировини важливим є співвідношення між окремими структурними частинами. Це може бути подано через залежність:

$$\frac{M_{\text{я}}}{M_{\text{с}}} = \frac{1}{1 - 0,9\text{Л}} \quad (1)$$

де $M_{\text{я}}$ – олійність ядра;

$M_{\text{с}}$ – загальна олійність сировини;

Л – лущинність або частка оболонки.

Це співвідношення показує, що зі зміною частки оболонки змінюється співвідношення між внутрішньою поживною частиною й зовнішнім захисним шаром, а отже – і загальні технологічні властивості матеріалу під час екструзії.

Для оцінювання фазових перетворень у процесі екструзійної обробки може бути використаний критерій, який пов'язує зміну стану окремих морфологічних частин матеріалу із загальною зміною його параметрів:

$$\varepsilon = \frac{\overline{\Delta G_{\text{я}}}}{\overline{\Delta G}} \quad (2)$$

де $\overline{\Delta G_{\text{я}}}$ – зміна маси або стану внутрішньої частини матеріалу;

$\overline{\Delta G}$ – загальна зміна параметрів сировини в процесі обробки.

Після перетворення цей критерій можна подати як:

$$\varepsilon = \frac{\overline{\Delta G_{\text{я}}}}{\overline{\Delta G}} \cdot \frac{\overline{\Delta W_{\text{я}}}}{\overline{\Delta W}} \quad (3)$$

де $\overline{\Delta W_{\text{я}}}$ і $\overline{\Delta W}$ характеризують зміну вологості окремих частин матеріалу та сировини в цілому.

З урахуванням морфологічних характеристик матеріалу критерій набуває вигляду:

$$\varepsilon = (0,95 - 0,86\text{Л}) \cdot \varepsilon_{\text{к}} \quad (4)$$

де $\varepsilon_{\text{к}}$ – кінетична складова, що відображає інтенсивність перетворення матеріалу в процесі екструзії.

Наведене співвідношення свідчить, що кінетика процесів при екструзійній обробці визначається не тільки режимними параметрами, а й структурно-технологічними особливостями сировини. Саме тому для адекватного моделювання потрібно враховувати сортові, морфологічні та фізико-хімічні властивості матеріалу.

Узагальнений критеріальний опис процесу може бути поданий у вигляді:

$$Fo \cdot \Theta \cdot Re^{1,4} \cdot Gu^{0,9} = 4,1 \cdot 10^3 (0,95 - 0,86\text{Л}) \left(\frac{W_1}{H_0} \right)^{-2,8} \cdot K_o^{0,9} \quad (5)$$

де Fo , Θ , Re , Gu , K_o – критерії та симплекси, що характеризують теплові, гідродинамічні й кінетичні умови процесу;

W_1 , H_0 – параметри вологості й теплового стану матеріалу.

Практичне значення такої моделі полягає в тому, що вона дозволяє враховувати вплив властивостей сировини на інтенсивність перебігу процесів у робочій камері екструдера. Це дає змогу прогнозувати тривалість обробки, рівень нагрівання, зміну вологості та формування структури продукту.

Аналіз показує, що зі збільшенням олійності та частки оболонки змінюється характер проходження процесу: може зростати тривалість термомеханічної обробки, змінюватися ступінь прогрівання та умови пластичного деформування. Водночас глибина структурних перетворень



залежить не лише від початкового складу матеріалу, а й від узгодженості режимів екструзії з властивостями конкретної сировини.

Отже, математичне моделювання процесів при екструзійній обробці має базуватися на комплексному врахуванні фізичних, технологічних і морфологічних характеристик матеріалу. Лише за такої умови можна отримати достатньо точний опис поведінки сировини в екструдері та обґрунтувати раціональні параметри роботи обладнання.

Висновки. У статті узагальнено теоретичні підходи до моделювання процесів при екструзійній обробці рослинної сировини. Встановлено, що технологічні характеристики матеріалу, зокрема вологість, олійність і частка оболонки, істотно впливають на перебіг тепломасообмінних, фазових і структурних перетворень у робочій зоні екструдера.

Показано, що для математичного опису процесу доцільно використовувати критеріальні залежності, які враховують морфологічні особливості сировини та її реакцію на термомеханічний вплив. Це дозволяє більш точно оцінювати умови протікання процесу та прогнозувати якість кінцевого продукту.

Практична цінність запропонованого підходу полягає у можливості використання математичних моделей для оптимізації режимів екструзійної обробки, підвищення стабільності роботи обладнання та вдосконалення технологій переробки рослинної сировини.

Список використаних джерел

1. Smith J. Centrifugal separation technologies in vegetable oil refining. *Journal of Food Engineering*. 2020. Vol. 285. Art. 110107.
2. Petrova N. Energy efficiency of centrifugal filtration systems. *Food Engineering Reviews*. 2021. Vol. 13, No. 4. P. 456–469.
3. Yamamoto H. Mathematical modeling of centrifugal separation processes. *Chemical Engineering Science*. 2020. Vol. 227. P. 115–128.
4. Ivanov D. Optimization of filter layer porosity in conical centrifuges. *Journal of Industrial Technology*. 2023. Vol. 61, No. 3. P. 78–91.
5. Janson H. *Castor oil production and processing*. New York : United Nations, 1974. 23 p.
6. Patel V. R., Dumancas G. G., Kasi Viswanath L. C., Maples R., Subong B. J. J. Castor oil: Properties, uses, and optimization of processing parameters in commercial production. *Lipid Insights*. 2016. Vol. 9. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.4137/LPI.S40233>.
7. Yeboah A. et al. Castor oil (*Ricinus communis*): a review on the chemical composition and physicochemical properties. *Food Science and Technology*. 2021. Vol. 41, suppl. 2. P. 399–413. DOI: <https://doi.org/10.1590/fst.19620>.
8. Ogunniyi D. S. Castor oil: a vital industrial raw material. *Bioresource Technology*. 2006. Vol. 97, No. 9. P. 1086–1091. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.03.028>.
9. Gupta M. *Practical guide to vegetable oil processing*. 2nd ed. Urbana, IL: AOCS Press; London : Academic Press, 2017. 508 p.
10. Журавель Д. П., Дідур В. В. Обґрунтування технологічної схеми детоксикації рицинової макухи для потреб кормовиробництва. *Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві* : матеріали XIII науково-технічної конференції (Україна, Київ, 01–17 жовтня 2025 р.). Київ, 2025. С. 76–80.
11. Журавель Д. П., Дідур В. В. Обґрунтування технологічного процесу збирання рицини. *Сучасні проблеми землеробської механіки* : матеріали XXVI міжнародної наукової конференції (Київ, 17–18 жовтня 2025 р.). Київ: НУБіП України, 2025. С. 147–150.
12. Дідур В. В., Журавель Д. П., Повар І. Ю., Петриченко Є. А. Теоретичні основи розрахунку конструкційно-технологічних параметрів конічної центрифуги для очищення рослинних олій. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2025. Т. 25, № 3. С. 118–124. DOI: <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-3-16>.
13. Журавель Д. П. Технології переробки насіння рицини дворазовим пресуванням. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі*: матеріали IV міжнародної науково-практичної конференції. Запоріжжя, 2022. С. 32–34.



14. Дідур В. В., Журавель Д. П., Повар І. Ю., Петриченко Є. А. Наукові основи очищення рослинних олій у конічних центрифугах. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2025. Т. 25, № 3. С. 125–130. DOI: <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-3-17>.

15. Журавель Д. П., Дідур В. В., Шевчук М. В. Обґрунтування триботехнічних властивостей біологічних олив для гідросистем сільськогосподарської техніки. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2025. Т. 15, № 2. С. 45–53. DOI: <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-6>.

16. Дідур В. В., Журавель Д. П., Колесніченко І. А., Петриченко Є. А. Моделювання теплової обробки насіння олійних культур високотемпературним теплоносієм. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2025. Т. 15, № 2. С. 37–44. DOI: <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-5>.

17. Дідур В. В. та ін. Моделювання тепломасоперенесення в поверхневих капілярно-пористих середовищах. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі* : матеріали VII міжнародної науково-практичної конференції (Запоріжжя, 2025). С. 46–49.

18. Дідур В. В., Журавель Д. П. Аналіз технологічного процесу механізованого збирання рицини. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі* : матеріали VII міжнародної науково-практичної конференції (Запоріжжя, 2025). С. 56–61.

19. Журавель Д. П., Дідур В. В. Механіко-технологічні основи глибокої переробки насіння рицини на енергетичну біосировину : монографія. Запоріжжя : ТДАТУ, 2025. 275 с.

20. Дідур В. В., Журавель Д. П. Аналіз технологій отримання олії з олійних культур. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2022. Т. 12, № 3. Ст. 18. DOI: <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2022-3-18>.

21. Журавель Д. П. Обґрунтування методу очищення біологічних олій в електричному полі. *Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві* : матеріали XIII науково-технічної конференції (Київ, 2024). С. 68–72.

22. Журавель Д. П., Дідур В. В. Моделювання процесу очищення рицинової олії в електричному полі. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі* : матеріали VI міжнародної науково-практичної конференції (Запоріжжя, 2024). С. 98–104.

Дата першого надходження статті до видання: 20.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 25.05.2026

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



M. Shevchuk¹, H. Dashyvets²

¹Uman National University of Horticulture

²Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University

MODELING OF PROCESSES IN EXTRUSION PROCESSING OF VEGETABLE RAW MATERIALS

Summary

The article considers the theoretical foundations of process modeling during extrusion treatment of plant raw materials. It is shown that the efficiency of extrusion depends on the physical, mechanical, thermophysical, and technological characteristics of the material, in particular moisture content, oil content, husk content, and structural heterogeneity. Generalized analytical relationships are presented to describe phase transformations and heat-and-mass transfer processes occurring under the influence of pressure, temperature, and mechanical shear. It is substantiated that mathematical modeling makes it possible to predict processing duration, heating intensity, moisture change, and other parameters determining the quality of the final product. The study confirms that taking into account the structural features of raw materials is necessary for improving the accuracy of calculations and optimizing extrusion treatment modes. Modern technologies for processing plant raw materials are actively developing in the direction of energy-saving and intensive processes, among which extrusion processing occupies a special place. It allows simultaneously to carry out thermomechanical modification of raw materials, increase its digestibility, change



structural and mechanical properties and form a final product with specified characteristics. However, the complexity of physicochemical transformations occurring during extrusion (changes in moisture, temperature, pressure, viscoplastic behavior of the material) complicates the analytical description and control of the process. Existing approaches to describing extrusion processes are often based on empirical dependencies or simplified models that do not fully take into account the multifactorial nature of the influences. This leads to limited accuracy in predicting process parameters and the complexity of optimizing extruder operating modes when processing different types of plant raw materials. In this regard, the scientific and applied task of developing and improving mathematical models that allow adequately describing extrusion processing processes taking into account the rheological properties of raw materials, heat and mass transfer and energy costs arises. The creation of universal approaches to modeling that ensure increased efficiency of the technological process, stable quality of the final product and reduced energy consumption is especially relevant. Thus, the problem lies in the insufficient accuracy of existing models of extrusion processing of plant raw materials and the need to develop more adequate mathematical descriptions for optimizing and controlling this complex technological process.

Keywords: extrusion treatment, mathematical modeling, plant raw materials, moisture content, oil content, husk content, heat and mass transfer, technological characteristics, extruder.

ПРАЦІ
Таврійського державного агротехнологічного університету

Наукове фахове видання

Випуск 26, том 2

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: 25.05.2026. Дата друку: 01.06.2026.
Формат 60x84/8. Гарнітура Times New Roman.
Папір офсет. Цифровий друк. Ум. друк. арк. 25,11. Замов. № 0526/436. 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