

Міністерство освіти і науки України
Ministry of Education and Science of Ukraine

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ
SCIENCE JOURNAL

**ТЕХНІЧНИЙ СЕРВІС АГРОПРОМИСЛОВОГО,
ЛІСОВОГО ТА ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСІВ**

2025, № 26

**TECHNICAL SERVICE OF AGRICULTURE,
FORESTRY AND TRANSPORT SYSTEMS**
2025, № 26

Харків – 2025 – Kharkiv

**НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ «ТЕХНІЧНИЙ СЕРВІС АГРОПРОМИСЛОВОГО,
ЛІСОВОГО ТА ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСІВ»**

**SCIENCE JOURNAL «TECHNICAL SERVICE OF AGRICULTURE,
FORESTRY AND TRANSPORT SYSTEMS»**

Науковий журнал «Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів» містить оглядові статті та результати досліджень у відповідності із рубриками:

- Технічний сервіс машин агропромислового комплексу.
- Технічний сервіс машин лісового та транспортного комплексів.
- Технології та засоби діагностування.
- Проблеми використання паливوماстильних матеріалів та альтернативних видів палив.
- Техніка і технології тваринництва.
- Проблеми надійності.
- Проблеми відновлення деталей машин.
- Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження.
- Питання сприяння розвитку науки і техніки.
- Інноваційні методи та технології у підготовці фахівців.

Науковий журнал призначений для виробничників, науково-педагогічних працівників, наукових співробітників, аспірантів, докторантів і студентів, які спеціалізуються у відповідних або суміжних галузях науки та напрямках виробництва.

Засновник: Державний біотехнологічний університет. Наказом Міністерства освіти і науки України №886 від 02.07.2020 року науковий журнал включено реєстру наукових фахових видань України, категорія «Б» з спеціальності 133 «Галузеве машинобудування».

Науковий журнал виходить 2 рази на рік.
Мови видання: українська, англійська.

Затверджено до друку рішенням Вченої ради Державного біотехнологічного університету (протокол № 6 від 28.05.2025).

ISSN 2311-441X

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-26>

© Державний біотехнологічний університет, 2025.

Science Journal "Technical service of agriculture, forestry and transport systems" comprising review articles and research results, researches in accordance with sections:

- Technical service of machines of the agro-industrial complex.
- Technical service of machines of forest and transport complexes.
- Technology and means of diagnostics.
- Problems of using fuel-lubricating materials and alternative types of fuels.
- Engineering and technology of livestock.
- Problems of reliability.
- Problems of restoration of parts of machinery.
- The problems of energy supply and energy efficiency.
- The issue of promoting science and machinery.
- Innovative methods and technologies in training of specialists.

The Science Journal is designed for manufacturers, scientific and pedagogical workers, research workers, graduate students, doctoral students and students who specialize in relevant or related fields of science and production areas.

Founder: State Biotechnological University. By order of the Ministry of Education and Science of Ukraine No. 886 dated July 2, 2020, the Science Journal is included in the register of scientific and specialized publications of Ukraine, category "B" from specialty 133 "Industrial Mechanical Engineering".

The Science Journal is published 2 times a year.
Language: Ukrainian and English.

Approved for publication decision of the Academic council of State Biotechnological University (report № 6 from 28.05.2025).

ISSN 2311-441X

© State Biotechnological University, 2025.

Редакційна колегія:

Головний редактор:

Войтов В. А., д. т. н., проф. (Україна, Харків).

Заступник головного редактора:

Науменко О. А., к. т. н., проф. (Україна, Харків).

Технічний редактор:

Кісь-Коркіщенко Л. В., к. т. н., доц. (Україна, Харків).

Члени редакційної колегії:

Grigore Marian, д. т. н., проф. (Молдова, Кишинев).

Andrzej Tomporowski, д. т. н., проф. (Польща, Бидгощ)

Jerzy Grudzinski, д. т. н., проф. (Польща, Люблін).

Michael Schüßler, д. т. н., проф. (Німеччина, Мюнхен).

Rainhard Neudorfer, д. т. н., проф. (Німеччина, Мюнхен).

Serhiy Kharchenko, д. т. н., проф. (Польща, Люблін).

Антощенко Р. В., д. т. н., проф. (Україна, Харків).

Калінін Є. І., д. т. н., проф. (Україна, Харків).

Козаченко О. В., д. т. н., проф. (Україна, Харків).

Кравцов А. Г., к. т. н., доц. (Україна, Харків).

Роговський І. Л., д. т. н., проф. (Україна, Київ).

Тришевський О. І., д. т. н., проф. (Україна, Харків).

Черновол М. І., д. т. н., проф. (Україна, Кропивницький).

Шевченко С. А., д. т. н., доц. (Україна, Харків).

Адреса редакційної колегії:

Державний біотехнологічний університет,
вулиця Алчевських, 44, місто Харків,
Україна, 61000.

Тел.: +38 057 700 3888.

Сайт: <https://biotechuniv.edu.ua>.

E-mail: gurnal_tc@ukr.net.

Editorial Board:

Chief Editor:

V. Vojtov, Dr.Sc., Prof., (Ukraine, Kharkiv).

Deputy of Chief Editor:

O. Naumenko, Ph.D., Prof., (Ukraine, Kharkiv).

Technical Editor:

L. Kis-Korkishchenko, Ph.D., Assoc. of Prof. (Ukraine, Kharkiv).

Members of the Editorial Board:

G. Marian, Dr.Sc., Prof. (Moldova, Chisinau).

A. Tomporowski, Dr.Sc., Prof. (Poland, Bydgoszcz).

J. Grudzinski, Dr.Sc., Prof. (Poland, Lublin).

M. Schüßler, Dr.Sc., Prof. (Germany, Munich).

R. Neudorfer, Dr.Sc., Prof. (Germany, Munich).

S. Kharchenko, Dr.Sc., Prof. (Poland, Lublin).

R. Antoshchenkov, Dr.Sc., Prof. (Ukraine, Kharkiv).

Ye. Kalinin, Dr.Sc., Prof. (Ukraine, Kharkiv).

O. Kozachenko, Dr.Sc., Prof. (Ukraine, Kharkiv).

A. Kravtsov, Ph.D., Assoc. of Prof. (Ukraine, Kharkiv).

I. Rogovskii, Dr.Sc., Prof. (Ukraine, Kyiv).

O. Trishevsky, Dr.Sc., Prof. (Ukraine, Kharkiv).

M. Chernovol, Dr.Sc., Prof. (Ukraine, Kropyvnytskyi).

S. Shevchenko, Dr.Sc., Assoc. of Prof. (Ukraine, Kharkiv).

Address of the Editorial Board:

State Biotechnological University, 44
Alchevskih Street, Kharkiv, Ukraine,
61000.

Phone: +38 057 700 3888.

Website: <https://biotechuniv.edu.ua>.

E-mail: gurnal_tc@ukr.net.

ЗМІСТ

1. Гадецька С.В., Дубницький В.Ю., Кушнерук Ю.І., Ходирєв О.І., Черепньов І.А. Комплексне вирішення логістичної задачі забезпечення життєдіяльності населення в умовах надзвичайних ситуацій	8-24
2. Кириченко Р.В., Лубченко Є.В., Козій О.Б., Колпаченко А.О. Огляд конструкцій посівних машин для Mini-Till та No-Till технологій у системах ресурсозберігаючого землеробства	25-35
3. Цимбалюк Ю.І. Кінематика малогабаритної трелювальної системи тракторією у вигляді дуги кола	36-44
4. Сиромятников Ю.М., Сиромятніков П.С., Харченко О.М., Бєлих О.В. Огляд сучасних підходів до вдосконалення технологій витоПЛення бджолиного воску: технічні рішення та інженерні перспективи.....	45-88
5. Суска А.А., Д'яконов В.І., Шевченко С.А., Скрипник О.С. Теоретичні засади забезпечення технологічних властивостей будівельних матеріалів для дерев'яного житлового будівництва.....	89-101
6. Пахучий А.М., Дьяконов С.О. Аналіз систем копіювання поверхні поля в конструкціях зернозбиральних сільськогосподарських машинах	102-110
7. Єсіпов О.В., Поляшенко С.О., Сорокін С.П. Перспективи використання біогазових установок в Україні	111-118
8. Козаченко О.В., Бакум М.В., Піх Є.О., Михайлов А.Д., Крекот М.М. Результати дослідження процесу віброфрикційної сепарації насіння коріандра	119-127
9. Лебедєв С.А., Лебедєв А.Т., Шевченко І.О. Технологічна адаптація тракторів загального призначення імпорного виробництва в аграрному секторі України	128-136
10. Мигаль В.Д., Шевченко І.О. Стан розвитку тягових електродвигунів підвищеної надійності.....	137-148
11. Шевченко І.О., Макаренко М.Г., Блезнюк О.В. Прогнозування технічного стану автомобільних трансмісій на основі інтегрованого аналізу вібраційних і акустичних характеристик із застосуванням передових методів штучного інтелекту та моделювання перехідних процесів	149-162
12. Козаченко О.В., Волковський О.М. Результати експериментальних досліджень пружного стояка дискатора з регулятором жорсткості	163-176

13. **Ляшенко С.О., Фесенко А.М., Кісь В.М.**
Інтеграція систем екологічного моніторингу та безпеки праці
в умовах енергетичних підприємств..... 177-185
14. **Ляшенко С.О., Фесенко А.М.**
Застосування адаптивного підходу в системі керування технологічним
процесом випарювання в цукровому заводі за допомогою
статичної моделі. 186-200
15. **Артьомов М.П., Анікєєв О.І., Пастушенко А.С., Калюжний О.Д.,
Циганенко М.О., Пушкарєнко О.Ю.**
Аналіз динаміки навантаження глибокорозпушувача в системі
грунтообробки..... 201-212
16. **Саган О.Я.**
Моделювання швидкості сходження сипкого матеріалу
з обертового конусного диску в умовах надлишкового тиску..... 213-221
17. **Кусков М.А.**
Експериментальні дослідження посівного машинно-тракторного агрегату
у складі трактора та сівалки Vega-8 W Profi..... 222-234
18. **Хмельовський О.В.**
Аналітична модель параметрів фільтра-глушника вакуумного насосу 235-242
19. **Загурський А.О.**
Оптимізація системи логістичного сервісу компанії 243-253

CONTENTS

1. **Gadetska S.V., Dubnitskiy V.Y., Kushneruk Y.I., Khodyrev O.I., Cherepnov I.A.**
Comprehensive solution of logistics problem of ensuring the life of population in emergency situations..... 8-24
2. **Kyrychenko R.V., Lubchenko E.V., Koziy O.B., Kolpachenko A.O.**
Review of designs of seeding machines for Mini-Till and No-Till technologies in resource-saving farming systems 25-35
3. **Tsybalyuk Yu.I.**
Kinematics of small-sized skidding system with trajectory in form of arc of circle..... 36-44
4. **Syromyatnikov Yu.M., Syromiatnikov P.S., Kharchenko O. M., Bielykh O.V.**
Review of modern approaches to improving beeswax melting technologies: technical solutions and engineering perspectives 45-88
5. **Suska A.A., Dyakonov V.I., Shevchenko S.A., Skrypnyk O.S.**
Theoretical basis for ensuring technological properties of construction materials for wooden residential construction..... 89-101
6. **Pakhuchyi A.M., Diakonov S.O.**
Analysis of field surface copying systems in designs of grain harvesting agricultural machines..... 102-110
7. **Iesipov O.V., Polyashenko S.O., Sorokin S.P.**
Prospects of use of biogas plants in Ukraine 111-118
8. **Kozachenko O.V., Bakum M.V., Mikhailov A.D., Krekot M.M., Abduyev M.M., Koziy O.B.**
Results of research into process of vibrofrictional separation of coriander seeds 119-127
9. **Lebedev S.A., Lebedev A.T., Shevchenko I.O.**
Technological adaptation of general-purpose tractors of imported production in agricultural sector of Ukraine..... 128-136
10. **Mygal V.D., Shevchenko I.O.**
State of development of traction electric motors of increased reliability..... 137-148
11. **Shevchenko I.O., Makarenko M.G., Bleznyuk O.V.**
Forecasting the technical condition of automobile transmissions based on integrated analysis of vibration and acoustic characterizing using advanced methods of artificial intelligence and modeling of transient processes 149-162
12. **Kozachenko O.V., Volkovsky O.M.**
Results of experimental studies of elastic riser of discator with stiffness regulator.. 163-176
13. **Liashenko S.O., Fesenko A.M., Kis V.M.**
Integration of environmental monitoring and occupational safety systems in context of energy enterprises..... 177-185

14. **Liashenko S.O., Fesenko A.M.**
Application of adaptive approach in control system of evaporation process
at sugar factory using static model 186-200
15. **Artiomov M.P., Anikeev O.I., Pastushenko A.S., Kalyuzhnyi O.D.,
Tsyganenko M.O., Pushkarenko O.Y.**
Assessment of load dynamics of subsoiler in tillage system..... 201-212
16. **Sagan O.Ya.**
Modeling the rate of descent of bulk material from rotating conical disk
under conditions of excess pressure 213-221
17. **Kuskov M.A.**
Experimental studies of sowing machine-tractor unit consisting of tractor
and Vega-8 W Profi seeder..... 222-234
18. **Khmelovskyi O.V.**
Analytical model of parameters of vacuum pump filter..... 235-242
19. **Zagurskiy A.O.**
Optimization of the company's logistics service system 243-253

Гадецька С. В.¹,
Дубницький В. Ю.²,
Кушнерук Ю. І.³,
Ходирєв О. І.²,
Черепньов І. А.⁴

¹Харківський національний
автомобільно-дорожній
університет,

м. Харків, Україна

²Харківський національний
університет імені

В. Н. Каразіна,

м. Харків, Україна

³Харківський національний
університет Повітряних Сил
імені Івана Кожедуба,

м. Харків, Україна

⁴Державний
біотехнологічний
університет,

м. Харків, Україна

E-mail: svgadetska@ukr.net

kyshneryk_ui@ukr.net

dubnitskiy@gmail.com

khodyrevmjk3758@gmail.com

voenpred314@ukr.net

КОМПЛЕКСНЕ ВИРІШЕННЯ ЛОГІСТИЧНОЇ ЗАДАЧІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ НАСЕЛЕННЯ В УМОВАХ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-26-8-24>

УДК 613.2+519.8

*Гадецька С.В., Дубницький В.Ю., Кушнерук Ю.І., Ходирєв О.І., Черепньов І.А.
Комплексне вирішення логістичної задачі забезпечення життєдіяльності
населення в умовах надзвичайних ситуацій.*

Анотація. В роботі розглянуто актуальну проблему своєчасного та ефективного забезпечення продовольством населення та персоналу Державної служби надзвичайних ситуацій які перебувають на територіях, потерпілих від надзвичайних ситуацій. На підставі аналізу ряду публікацій показано, що велика частина смертей в процесі природних катастроф викликана не прямими вражаючими чинниками, а голодом і епідеміями, які виникають на відповідній території. Також відомі численні факти про негативні наслідки для здоров'я найуразливіших категорій населення (діти, літні люди, особи, які страждають на хронічні захворювання та ін.) тривалого, більше двадцяти одного дня, харчування високоенергетичними фруктовими пастами, печивом, а також стандартними армійськими харчовими раціонами, що містять консерви і сублімовані продукти. На прикладі США і Японії наведено випадки виявлення значних запасів продовольства на складах магазинів, які не були використані в процесі ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій. Для запобігання цього явища запропоновано

використовувати централізоване приготування і харчування населення із використанням армійських польових кухонь. Для їх використання необхідно мати достатню кількість продуктів та рецептуру для приготування гарячих страв. В узагальненому вигляді ця задача отримала назву задачі лінійного програмування про дієту. Наведено чисельний приклад її розв'язання. Такий підхід надає можливість для виконання нормативних розрахунків, необхідних для визначення обсягу запасів продуктів на випадок надзвичайних ситуацій. Розроблена дієта використовує лише місцеві та загальнодоступні продукти. Оскільки в умовах надзвичайних ситуацій рішення приймають в умовах неповної інформації, то для оптимізації логістичних процесів використано методи стохастичного лінійного програмування. Для розв'язання задачі дієти прийнято, що розподіл параметрів задачі рівномірний. Для оптимізації за критерієм витрат пального, необхідного для доставки продуктів споживання, була розв'язана транспортна задача лінійного програмування в детермінованому та стохастичному варіантах.

Ключові слова: надзвичайні ситуації, забезпечення продуктами харчування в умовах надзвичайних ситуацій, лінійне програмування, стохастичне лінійне програмування, задача дієти, транспортна задача.

Gadetska S.V., Dubnitskiy V.Y., Kushneruk Y.I., Khodyrev O.I., Cherepnov I.A.
Comprehensive solution of logistics problem of ensuring the life of population in emergency situations.

Abstract. The work considers the urgent problem of timely and effective provision of food and staff of the State Emergency Service in the territories that are victims of emergencies. On the basis of an analysis of a number of publications, it is shown that most deaths in the process of natural catastrophes are caused not by direct striking factors, but by hunger and epidemics that occur in the respective territory. There are also many facts about the negative effects on the health of the most vulnerable categories of the population (children, elderly, people suffering from chronic diseases, etc.) of long, more than twenty -one days, nutrition with high -energy fruit pastes, cookies, and standard army diet. The example of the US and Japan shows cases of detection of significant food reserves in stores warehouses that have not been used in the process of eliminating the consequences of emergencies. To prevent this phenomenon, it is proposed to use centralized preparation and nutrition of the population using army field kitchens. To use them, you need to have enough products and recipe for hot dishes. Generally, this task was called linear programming problem. A numerical example of its solution is given. This approach provides an opportunity to make regulatory calculations necessary to determine the amount of inventories of products in case of emergencies. The developed diet uses only local and public products. Since, in emergency situations, decisions are made in conditions of incomplete information, the methods of stochastic linear programming were used to optimize logistics processes. To solve the problem of the diet, it is accepted that the distribution of the parameters of the problem is uniform. To optimize the fuel costs required for the delivery of consumption products, a linear programming transportation problem was solved in deterministic and stochastic variants.

Key words: emergency situations, food provision in emergency foods, linear programming, stochastic linear programming, diet task, transport problem.

Постановка проблеми

Статистика надзвичайних ситуацій (НС) свідчить про те, що починаючи з 1970 року спостерігається вельми тривожна тенденція збільшення середньорічного числа стихійних лих, викликаних небезпечними природними явищами, що відмічене в роботі

[1]. Порівняння показників кількості НС 2021 і 2022 років дозволяє зробити висновок про те, що в кількісному виразі НС, ініційовані кліматичними змінами, набагато перевищували аналогічні показники катастроф техногенного характеру. За інформацією Всесвітньої метеорологічної організації за останні 50 років екстремальні погодні явища привели до 2 мільйонів смертей і економічних втрат у розмірі більше 4 мільярдів доларів США. За період з 1970 по 2021 рік відбулося близько 12 000 стихійних лих [2]. На рис. 1 представлені дані по глобальній смертності, викликаній цими лихами [3].

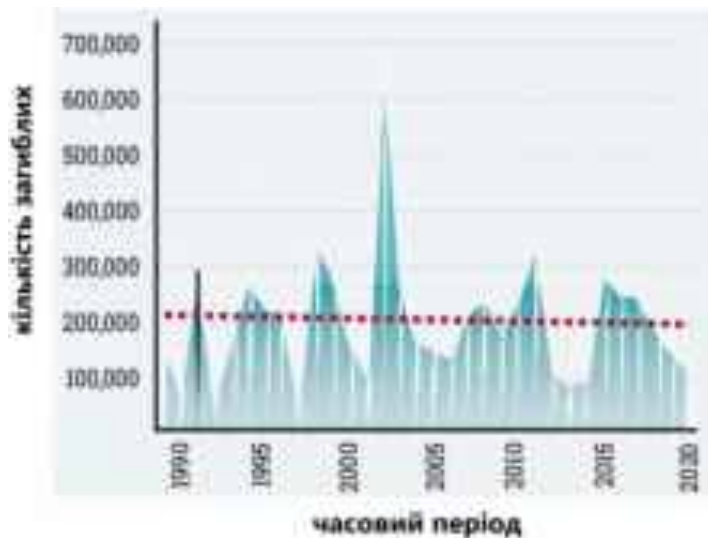


Рис. 1. Глобальна смертність, пов'язана зі стихійними лихами за 1989-2020 роки.

Нерідкі випадки, коли віддалені негативні наслідки НС є більш смертоносними, ніж прямі вражаючі чинники. Найбільш яскравим прикладом такої катастрофи, яка відбулася відносно недавно за історичними мірками, служить прорив дамби Баньцяо в Китаї 8 серпня 1975 року. Повені, викликані проливними дощами, привели безпосередньо до загибелі 26 000 чоловік і залишили близько 10 мільйонів чоловік без належного житла. Голод і хвороби, викликані цією повинню, привели до загибелі ще приблизно 100 000 чоловік [4]. Незалежно від типу природного катаклізму безпека харчових продуктів завжди є серйозною проблемою при таких інцидентах. Запаси продовольства і води, необхідні для життєдіяльності, повинні бути забезпечені до того, як відбудеться цей інцидент. Під час або після стихійних лих продукти харчування в постраждалих районах можуть бути забруднені мікробіологічними та іншими агентами. В результаті населення відповідних територій голодуватиме або піддаватиметься ризику захворювань харчового походження [5]. Часті й інтенсивні стихійні лиха представляють серйозну загрозу для виживання людини і суспільства, а також ставлять під загрозу можливості державних органів в області реагування на НС і порятунку людей. У цих умовах захист людського життя є пріоритетом при реагуванні на ці події. Екстрене постачання продовольства є основним механізмом реагування, який може забезпечити виживання людей і задоволення основних потреб постраждалого населення у разі стихійного лиха [6]. За даними ООН, представленими в доповіді у 2022 році, майбутнє людства, поза сумнівом, пов'язане з урбанізацією. Ми є свідками того, що протягом наступних трьох десятиліть урбанізація в світі продовжуватиметься – з 56% в 2021 році до 68% в 2050 році. Це приведе до збільшення числа міських жителів на 2,2 мільярда чоловік в основному в Африці й Азії [7]. Існують численні дані, які доводять підвищену уразливість більшості міських співтовариств з погляду

забезпечення продовольством в умовах НС. Зокрема, в роботі [8] на підставі аналізу літературних джерел сформульовані наступні основні тенденції в міських співтовариствах, що підвищують уразливість у разі стихійного лиха:

1. Жителі міст у масових масштабах вживають в їжу свіжі фрукти й овочі місцевого походження. Як результат, велика частина домашніх продуктів зберігається в холодильниках.

2. Городяни часто харчуються поза межами будинку. Внаслідок цього домашні запаси продуктів порівняно невеликі.

3. Дуже часто в їжу використовують напівфабрикати. Внаслідок цього велика частина домашніх продуктів зберігається в морозильних камерах, тому в наявності є обмежений простір для зберігання продуктів.

З цього випливає, що в половині випадків, для зберігання запасу продуктів потрібний холодильник і (або) морозильна камера, що у свою чергу припускає централізоване і регулярне електропостачання. В роботі [9] наведено результати загальнонаціонального опитування, метою якого було дізнатися, наскільки споживачі обізнані з рекомендованими методами зберігання продуктів під час тривалих відключень електроенергії й інших НС. Тільки 15% респондентів повідомили, що вони повністю готові забезпечити збереження продуктів харчування під час тривалого відключення електроенергії. Стихійні лиха, наприклад, землетруси, лісові пожежі, урагани й інші події, які можуть привести до довготривалої відсутності електроенергії, можуть поставити під загрозу безпеку харчових продуктів і викликати підвищений ризик захворювань харчового походження. Крім того, слід врахувати й економічний аспект. Далеко не всі сім'ї здатні виділити необхідну суму грошей для придбання набору продуктів тривалого зберігання. Дослідження, проведені в США в період 2006-2010 років, показали, що більше 80% населення повідомили про наявність в їх будинках запасів продовольства, яких вистачило б на рекомендовані три дні. Дозволити собі закласти продукти харчування на 8 днів могли переважно в домогосподарствах із середнім і високим соціально-економічним статусом [10]. Безумовно, проведення евакуації, аварійно-рятувальних та інших невідкладних робіт і забезпечення продовольством населення в зоні НС є функцією держави і здійснюється спеціалізованими службами, а у разі потреби залучається армія і поліція. Нажаль, досить часто виникає деякий часовий інтервал, протягом якого все населення постраждалої території або деяка її частина не отримує своєчасної допомоги, у тому числі і продовольчої. Наведемо декілька прикладів.

1. Японія, землетруси 1995 і 2011 рр. [11, 12]:

– великий землетрус Хансин-авадзі (17 січня 1995 року). Значна частина населення навіть через місяць не була забезпечена достатньою кількістю харчових пайків;

– великий східно-японський землетрус (11 березня 2011 року). Навіть після завершення основних робіт по відновленню міських комунікацій доставка і розподіл продовольства здійснювалися вкрай незадовільно.

2. США, 23 грудня 2014 року. Торнадо в штат Міссісіпі [13]. Звернення президента з обіцянкою надання допомоги було оприлюднене лише через 15 днів. Проте, навіть у разі своєчасного розподілу продовольства серед населення був відсутній єдиний підхід до вибору продуктів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У роботі [14] приведено огляд різних підходів до вибору продуктів харчування, які використовують в умовах НС. Як правило – це спеціальні фруктові пасти і печиво з

підвищеним вмістом цукру і збагачені вітамінами або стандартні армійські харчові раціони, що містять консерви, концентрати і сублімовані продукти. Традиційні консерви і харчові концентрати дуже часто багаті сіллю і цукром, але бідні клітковиною, що при тривалому вживанні можуть викликати серйозні розлади здоров'я у літніх людей, дітей, а також у людей, хворих діабетом і гіпертонією. Сублімовані продукти, які входять до складу армійських раціонів коштують більше, ніж звичайні продукти. Наприклад, значна частина населення Японії не має можливості їх купувати [1]. Не дивлячись на це, в роботі [14] приводиться наступна думка фахівців у сфері гігієни харчування. Вони пропонують ввести в повсякденне вживання населенням продукти тривалого зберігання для того, щоб знизити їх ціну, збільшити виробництво для формування як державних запасів продовольства, так і запасів домогосподарств. Проте, як показало опитування осіб, які вижили на території, що постраждала від землетрусу, їм хронічно не вистачало звичайних продуктів харчування. Результат опиту приведено на діаграмі (рис. 2).

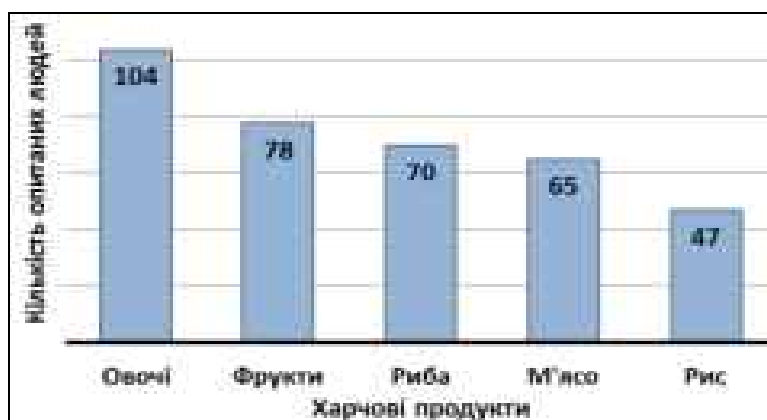


Рис. 2. Харчові продукти, яких не вистачало в раціоні населення в зоні НС (результат опитування за даними [14]).

Як правило, вражаючі фактори НС спричиняють руйнування і порушення комунікацій, а тому дуже часто виникають проблеми з доставкою продовольства на постраждалі території. При цьому немає ніякої гарантії, що склади зберігання з польовими армійськими раціонами опиняться в зоні доступності у необхідній кількості. В [15] наведено дані про те, що на території США і Японії після ліквідації наслідків НС і проведення всебічного аналізу проведених аварійно-рятувальних та інших невідкладних робіт, було виявлено парадоксальні факти наявності продуктів у мережі магазинів і на їхніх складах, які з незрозумілих причин залишилися незатребуваними. Тому в цій ситуації необхідно організовувати пункти централізованого розподілу харчів. Існують два способи вирішення цієї задачі. Перший полягає у використанні заздалегідь розфасованих і придатних для вживання наборів продуктів. До недоліку цього способу слід віднести те, що його використання вимагає деяких навичок для застосування. Якщо учасники рятувальних робіт можуть бути навчені цьому в процесі їх професійної підготовки, то громадяни, що опинилися в епіцентрі НС і знаходяться в стресовому стані, просто не зможуть ними скористатися. Крім того, в перші години проведення рятувальних робіт кількість рятувальників та постраждалих буде безперервно змінюватись, тому неминуче виникнення нерівномірного розподілу продовольчих комплектів. Другий спосіб полягає у використанні польових кухонь для приготування їжі на об'єктах в зоні НС. Для цього необхідно мати достатню кількість продуктів та рецептуру для приготування гарячих страв.

В узагальненому вигляді ця задача отримала назву задачі про дієту. У сучасній науковій літературі, наприклад в роботі [16], задача про дієту має такий вигляд.

Припустимо, що в наявності є m продуктів $p_1, p_2, \dots, p_j, \dots, p_m$. Щодобове вживання продукту p_j дорівнює величині x_j . Щодобовою дієтою будемо називати багатовимірний вектор $X = (x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_m)$. Зрозуміло, що замість доби може бути обраний будь який проміжок часу. Заздалегідь відома кількість поживних речовин кожного з продуктів, до складу яких входять білки, жири, вуглеводи, перелік мікроелементів та вітамінів. Припустимо, що величина a_{ij} визначає вміст i -ої поживної речовини ($i = 1, 2, \dots, n$) в одиниці продукту p_j . Для наочності подамо умови задачі у вигляді табл. 1. В цій таблиці величина a_{ij} визначає кількість i -ої поживної речовини у складі j -го продукту в одиницях виміру, які задовольняють фізичному змісту задачі, c_j – узагальнена вартість одиниці продукту p_j в одиницях виміру, які задовольняють фізичному змісту задачі. Наприклад, грошові, енергетичні, або вагові одиниці виміру.

Таблиця 1

Умови задачі про дієту в загальному вигляді

Поживні речовини	Продукти					
	p_1	p_2	$\dots$	p_j	$\dots$	p_m
a_1	a_{11}	a_{12}	$\dots$	a_{1j}	$\dots$	a_{1m}
a_2	a_{21}	a_{22}	$\dots$	a_{2j}	$\dots$	a_{2m}
$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$
a_i	a_{i1}	a_{i2}	$\dots$	a_{ij}	$\dots$	a_{im}
$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$
a_n	a_{n1}	a_{n2}	$\dots$	a_{nj}	$\dots$	a_{nm}
Узагальнена вартість	c_1	c_2	$\dots$	c_j	$\dots$	c_m

Тоді загальний вміст i -ої поживної речовини в дієті дорівнює величині:

$$a_i = \sum_{j=1}^m a_{ij} x_j, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

Визначимо мінімальну щодобову потребу у вживанні i -ої поживної речовини як b_i . Звідси буде мати місце нерівність:

$$\sum_{j=1}^m a_{ij} x_j \geq b_i, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

Обмеження на щодобове вживання кожного продукту мають вигляд:

$$A_j \leq x_j \leq B_j, \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (3)$$

Вартість усієї щодобової дієти дорівнює величині:

$$L = \sum_{j=1}^m c_j x_j. \quad (4)$$

Оптимальною за критерієм узагальненої вартості буде така дієта, яка залежно від конкретних вимог замовника результатів відповідних обчислень мінімізує або максимізує цільову функцію (4) за умов виконання обмежень (1)...(3).

В умовах НС велике значення має не стільки раціонально складена дієта, скільки вирішення проблем логістики, що виникають під час доставки продуктів харчування на постраждалу територію.

Одним з методів оптимізації вирішення цих проблем може бути транспортна задача лінійного програмування. Її розв'язання детально розглянуте в [17]. У [11, 12, 13]

приведені приклади того, як в умовах невизначеності в оцінці ситуації після перших годин і днів НС виникають проблеми, пов'язані із забезпеченням нормальної їжі. Тому важливою є оптимальна організація процесу доставки продуктів від пунктів їх зберігання до основних епіцентрів НС, як правило, особливо в умовах невизначеності оцінки ситуації, що виникла.

Формулювання мети досліджень

Метою даного дослідження є розгляд актуальної проблеми своєчасного та ефективного забезпечення продовольством населення та персоналу ДСНС які перебувають на територіях, потерпілих від надзвичайних ситуацій (НС).

Результати досліджень

Відповідно до табл. 1 в табл. 2 наведено перелік продуктів, які були включені до раціону згідно з роботою [16], а також види та кількість поживних речовин, що входять до їх складу та їх верхні й нижні межі. Одиницею масштабу обрано масу в 100 г., одиницею вартості – одну копійку. Слід ще раз підкреслити, що це, на погляд авторів, не впливає на зміст методики розв'язання задачі. Інші позначення наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Перелік продуктів, включених до раціону військовослужбовців *)

Поживні речовини та їх коди	Продукти та їх коди						
	Хліб жит., обойний x_1 , 100 г	Хліб пшен., x_2 , 100 г	Борошно пшеничне 2-го гатунку, x_3 , 100 г	Крупа різна, x_4 , 100 г	Макарони- вермішель, x_5 , 100 г	М'ясо, x_6 , 100 г	Риба, x_7 , 100 г
Білки, a_{1j} , г	4,5	4,8	7	7,5	17,5	15	19
Жири, a_{2j} , г	0,5	0,5	0,8	1,1	0,2	1,7	3
Вуглеводи, a_{3j} , г	37	55	71	69,2	72	0	0
Вітамін А, a_{4j} , г	0	0	0	0	0	0,0007	0
Вітамін В1, a_{5j} , г	0,0002	7E-05	0,0004	0,0003	0	0,0002	0
Вітамін С, a_{6j} , г	0	0	0	0	0	0,0009	0
Калорійність, a_{7j} , ккал	175	250	330	326	330	75	106
Вартість, c_j , коп. /100г	10	17	11	21	32	53	13
Верхня межа, B_j , 100г	8,4	4,2	0,28	1,96	0,42	2,1	1,4
Нижня межа, A_j , 100г	6	3	0,2	1,4	0,3	1,5	1
Вуглеводи, a_{3j} , г	22	72	0	94	14	4,1	5,7
Вітамін А, a_{4j} , г	0,0003	0	0	0	0	0	0,00 6
Вітамін В1, a_{5j} , г	0,001	0	0	0	0,0001	0,0000 5	0,00 01
Вітамін С, a_{6j} , г	0	0	0	0	0,01	0,02	0,004

Продовження таблиці 2

Поживні речовини та їх коди	Продукти та їх коди						
	Борошно соєве, x_8 , 100г	Сало, x_9 , 100г	Олія, x_{10} , 100г	Цукор, x_{11} , 100г	Картопля, x_{12} , 100г	Капуста свіжа або квашена, x_{13} , 100г	Морква, x_{14} , 100г
Калорійність, a_{7j} , ккал	330	770	880	400	65	22	27
Вартість, c_j , коп. /100г	66	19	50	38	7	8	8
Верхня межа, B_j , 100г	0,84	0,42	0,28	0,49	7	2,38	0,63
Нижня межа, A_j , 100г	0,6	0,3	0,2	0,35	5	1,7	0,45

Закінчення таблиці 2

Поживні речовини та їх коди	Продукти та їх коди				Мінімальне добове споживання
	Буряк, x_{15} , 100г	Цибуля ріпчаста, x_{16} , 100г	Коріння, зелень, огірки, x_{17} , 100г	Томатна паста, x_{18} , 100г	
Білки, a_{1j} , г	0,6	0,8	0,8	4	95
Жири, a_{2j} , г	0,1	0	0	0	60
Вуглеводи, a_{3j} , г	6,4	4,3	0,6	9	475
Вітамін А, a_{4j} , г	0,00001	0,00002	0	0,002	0,004
Вітамін В1, a_{5j} , г	0,00002	0,00002	3E-05	0,00007	0,0005
Вітамін С, a_{6j} , г	0,008	0,008	0,005	0,07	0,04
Калорійність, a_{7j} , ккал	29	35	17	98	4200
Вартість, c_j , коп. /100г	6	12	6	35	-
Верхня межа, B_j , 100г	0,56	0,42	0,49	0,084	-
Нижня межа, A_j , 100г	0,4	0,3	0,35	0,06	-

*) Таблицю складено згідно з роботою [16].

Припустимо, що відомі наступні харчові продукти: хліб житній, обойний; хліб пшеничний; борошно пшеничне 2-го ґатунку; крупа різна; макарони-вермішель; м'ясо; риба; соєве борошно; сало; олія; цукор; картопля; капуста свіжа або квашена; морква; буряк; цибуля; коріння, зелень, огірки; томатна паста, які занумеровані числами 1,2,...,18 відповідно, $j = \overline{1,8}$. Подальші розрахунки виконано для забезпечення життєдіяльності k людей. В нашому випадку $k=1000$. Такий підхід надає можливість виконання нормативних розрахунків, необхідних для визначення обсягу запасів продуктів на випадок НС. Перелік життєво необхідних поживних речовин та їх калорійність наведено в табл. 2. Вони мають номери відповідно як 1, 2, ..., 7, тому, $i = \overline{1,7}$. Також відома кількість поживних речовин в 100 г кожного продукту a_{ij}^0 ; $i = \overline{1,7}$; $j = \overline{1,18}$ та щодобова мінімальна потреба в кожній поживній речовині b_i^0 ; $i = \overline{1,7}$. Узагальнену вартість одиниці кожного продукту визначимо як c_j^0 , $j = \overline{1,18}$.

Також заздалегідь відомі нижні a_{ij}^{min} ; $j = \overline{1,18}$ та верхні a_{ij}^{max} ; $j = \overline{1,18}$ границі щодо обмежень маси кожного продукту та обмеження щодо сумарної маси всіх продуктів M^0 .

Необхідно скласти дієту, тобто визначити кількості кожного продукту $x_1, x_2, \dots, x_{18}$, що забезпечувала б не менше мінімальної щодобової потреби в кожній

поживній речовині за критерієм максимуму сумарної калорійності дієти при обмеженнях на маси продуктів, якщо кількість осіб, що забезпечуються, дорівнює k .

Математична модель задачі про дієту має наступний вигляд:

$$L = \sum_{j=1}^{18} c_j x_j \rightarrow \max; \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^{18} a_{ij} x_j \geq b_i; i = \overline{1,6}; \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^{18} x_j \leq M; \quad (7)$$

$$a_j^s \leq x_j \leq a_j^l : j = \overline{1,18}. \quad (8)$$

де:

$$c_j = ka_{7j}; \quad a_{ij} = ka_{ij}^0; \quad b_i = kb_i^0; \quad a_j^s = ka_j^{0s}; \quad a_j^l = ka_j^{0l}; \quad M = kM^0; \quad i = \overline{1,6}; \quad j = \overline{1,18}. \quad (9)$$

Зауважимо, що значення калорійності обраних продуктів увійшли в коефіцієнти цільової функції, звідси кількість обмежень у співвідношенні (6) дорівнює 6.

Таблиця 3

Вміст продуктів відповідно до розв'язання задачі про щоденну дієту за критерієм максимуму сумарної калорійності для $k = 1000^{*)}$

Продукти	Обмеження		Оптимізація
	Верхня границя, $z, 10^3$	Нижня границя, $z, 10^3$	Оптимальний план, $x_j, z, 10^3$
$x1$	840	600	640,4
$x2$	420	300	420
$x3$	28	20	28
$x4$	196	140	196
$x5$	42	30	42
$x6$	210	150	210
$x7$	140	100	140
$x8$	84	60	84
$x9$	42	30	42
$x10$	28	20	28
$x11$	49	35	43,6
$x12$	700	50	500
$x13$	238	170	170
$x14$	63	45	45
$x14$	56	40	40
$x16$	42	30	30
$x17$	49	35	35
$x18$	8,4	6	6
Усього	3235,4	1861	2700

^{*)} Код продуктів співпадає з кодом, який наведено у табл. 2.

Критерій оптимізації (5) у такому разі набуде вигляду:

$$L = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^{18} c_j x_j \rightarrow \max. \quad (10)$$

Оптимальна розрахункова калорійність такої дієти на одного споживача $L = 4776,4$ ккал.

Для порівняння відзначимо, що калорійність приведеної в [18] дієти, також призначеної для застосування в екстремальних умовах (військові навчання в тропіках) дорівнює 3600 ккал. Слід зазначити, що запропонована в даній роботі дієта використовує лише місцеві і загальнодоступні продукти.

Оскільки в умовах НС рішення приймаються в умовах неповної інформації, то для оптимізації логістичних процесів доцільне застосування методів стохастичного програмування [7, 19].

За змістом нашої задачі будемо вважати, що параметри a_{ij} є детерміновані, решта параметрів c_j , b_i , α_i , β_i взагалі випадкові величини.

Задачу (1) – (4) з випадковими параметрами зазвичай називають задачею стохастичного програмування. Оскільки параметри c_j , b_i , α_i , β_i є випадковими величинами, співвідношення (1) – (4) треба розглядати з ймовірнісним змістом. В [7] запропоновано метод зведення задачі лінійного стохастичного програмування до задачі детермінованого лінійного програмування. А саме, цільову функцію Z визначимо шляхом заміни коефіцієнтів цільової функції c_j на їх математичні сподівання:

$$Z = \sum_{j=1}^{18} \bar{c}_j x_j. \quad (11)$$

де $\bar{c}_j$ – математичне сподівання випадкової величини c_j .

Розглянемо тепер обмеження. В задачі стохастичного програмування у нашому випадку найчастіше розглядають наступний варіант обмежень, наприклад для співвідношення (6), [17]:

$$Pr \left[\sum_{j=1}^{18} a_{ij} x_j \geq b_i \right] \geq \alpha_i; i = \overline{1,6}, \quad (12)$$

де α_i – задані рівні ймовірностей; $\alpha_i \geq 0,5$; $i = \overline{1,6}$.

Для одержання розв'язку співвідношень (12) необхідні відомості про закон розподілу даних випадкових величин. В [17] рекомендовано для цього використовувати закон рівномірного розподілу ймовірностей:

$$F(u) = \begin{cases} \frac{u - u^s}{u^l - u^s}; & \text{якщо } u \in [u^s, u^l]; \\ 0; & \text{якщо } u \notin [u^s, u^l] \end{cases}. \quad (13)$$

У цьому випадку квантиль співвідношення (13) для ймовірності p набуде вигляду:

$$u = F^{-1}(p) = u^s + p(u^l - u^s). \quad (14)$$

У нашому випадку в [19] рекомендовано при відсутності інформації про закони розподілу випадкових величин застосовувати рівномірний розподіл, тому, що він має найбільшу ентропію на множині можливих законів розподілу випадкових величин. Такий підхід дозволяє отримати детермінований аналог задачі стохастичного лінійного програмування у вигляді задачі лінійного програмування. В табл. 4 показано відповідні співвідношення задачі визначення оптимальної дієти в детермінованому варіанті й у варіанті детермінованого аналогу стохастичного лінійного програмування.

У нашому випадку на випадкові параметри задачі накладено такі обмеження:

$$\alpha_j^1 \in [\alpha_j^{11}, \alpha_j^{12}]; \alpha_j^2 \in [\alpha_j^{21}, \alpha_j^{22}]; \alpha_j^{11} < \alpha_j^{12} < \alpha_j^{21} < \alpha_j^{22}. \quad (15)$$

Відповідно до прийнятого на території України порядку існує ряд нормативно-правових актів (НПА), які регулюють порядок розробки планів реагування на НС на всіх рівнях ієрархії країни. До числа вищевказаних НПА, перш за все, відносяться:

- Кодекс цивільного захисту України (ст. 130);
- Постанова Кабінету Міністрів України від 14 березня 2018 р. № 223 «Про затвердження Плану реагування на надзвичайні ситуації державного рівня»;
- Постанова Кабінету Міністрів України від 30 вересня 2015 р. № 775 «Про затвердження Порядку створення та використання матеріальних резервів (крім державних) для запобігання виникненню надзвичайних ситуацій і ліквідації їх наслідків»;
- Наказ ДСНС України № НС-324 від 10.06.2022 р. «Про затвердження методичних рекомендацій з розроблення планів реагування на надзвичайні ситуації територіальної громади, району у м.м. Києві та Севастополі».

Таблиця 4

Математичні моделі задачі визначення оптимальної дієти

Задача лінійного програмування	Задача стохастичного лінійного програмування
$Q = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^n c_j x_j \rightarrow \max$	$Q = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^n c_j x_j \rightarrow \max$
$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq b_i, i = \overline{1,6}$	$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq b_i^l + p(b_i^l - b_i^r), i = \overline{1,6}$
$\sum_{j=1}^n x_j \leq M$	$\sum_{j=1}^n x_j \leq M^l - p(M^l - M^r)$
$a_j^l \leq x_j \leq a_j^r, j = \overline{1,18}$	$a_j^l + p(a_j^l - a_j^r) \leq x_j \leq a_j^l - p(a_j^l - a_j^r), j = \overline{1,18}$

Реалізація цих планів здійснюється по ряду напрямків, у тому числі й організацією основних видів забезпечення під час проведення аварійно-рятувальних та інших невідкладних робіт і ліквідації НС. У цьому документі (незалежно від території на яку він поширюється) є ряд обов'язкових розділів, в яких визначається: НС, які гіпотетично можуть статися на конкретній території й можливі негативні наслідки (у тому числі й руйнування мостів, доріг та інших комунікацій), кількість людей, які можуть опинитися в зоні НС, а також наявність і матеріальних резервів (у тому числі й продовольчих), які слід використовувати в процесі проведення евакуації та аварійно-рятувальних та інших невідкладних робіт. Безумовно, місце розміщення матеріальних резервів відповідного рівня є конфіденційною інформацією. На підставі вищевказаних даних необхідно вирішити логістичну задачу з оптимізації доставки продовольства у постраждалих від НС райони.

Згідно з Постановою Кабінету Міністрів України №775 від 30 вересня 2015 р. в усіх територіальних громадах України необхідно створити «План реагування на надзвичайні ситуації». У цьому плані в розділі «Матеріально-технічне забезпечення» передбачено, що для забезпечення їжею під час НС слід використовувати як підприємства із зберігання продовольства (елеватори, бази хлібопродуктів, холодильники), підприємства харчової та легкої промисловості, їхні бази і склади (склади першого типу) так і підприємства громадського харчування (їдальні, ресторани, кафе, склади, бази), хлібозаводи (склади другого типу). Відмінність між цими типами в тому, що в складах першого типу зберігається, як правило, заздалегідь відома кількість споживчих продуктів, в складах другого типу кількість продуктів споживання є випадковою величиною. Також випадковою величиною буде кількість продовольства,

необхідна для кожного місця його централізованого розподілу. Розгляд правових питань, пов'язаних з використанням ресурсів підприємств різної форми власності, виходить за рамки даного повідомлення.

Для оптимізації процесу доставки продуктів харчування від місць їх зберігання до місць їх розподілу використана транспортна задача лінійного програмування [17]. Можливість використання такої моделі покажемо на такому прикладі. Припустимо, що необхідно забезпечити їжею 26 000 осіб [4]. Тоді мінімальна маса продуктів споживання, необхідна для забезпечення їх щоденного харчування протягом п'яти діб, становить 242 т., оптимальна маса продуктів споживання становить 351 т.

Прийmemo, що задано Π_i ($i = \overline{1, m}$) міст зберігання продуктів харчування. В кожному з них знаходиться π_i ($i = \overline{1, m}$) продуктів харчування. Одиниці їх виміру залежать від змісту задачі. Також прийmemo що задано A_j ($j = \overline{1, n}$) місць їх споживання. Розташування цих місць визначають служби ДСНС після вивчення ситуації в місцях виникнення НС. У кожному з них необхідно забезпечити наявність λ_j ($j = \overline{1, n}$) кількості продуктів харчування. Припустимо, що відома τ_{ij} певна вартість перевезення одиниці вантажу з пункту Π_i у пункт A_j . Під час проведення аварійно-рятувальних робіт одним з найважливіших ресурсів буде паливо. В даному випадку метою розв'язання задачі буде визначення такої кількості вантажу x_{ij} ($i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}$), що перевозиться з пункту Π_i ($i = \overline{1, m}$) в пункт споживання A_j ($j = \overline{1, n}$), при якому загальні витрати пального будуть мінімальними при забезпеченні місць споживання продуктами харчування не менше потрібного. Для цього необхідно розв'язати так звану транспортну задачу, яка визначена співвідношеннями:

$$F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \tau_{ij} x_{ij}; \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \geq \lambda_j; \quad j = \overline{1, n}; \quad (17)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq \pi_i; \quad i = \overline{1, m}; \quad (18)$$

$$x_{ij} \geq 0; \quad i = \overline{1, m}; \quad j = \overline{1, n}, \quad (19)$$

Відповідно до наведеного раніше розділення складів на типи прийmemo, що $\Pi_i^{(1)}$ ($i = \overline{1, w}$) – склади першого типу, $\Pi_i^{(2)}$ ($i = \overline{w+1, m}$) – склади другого типу. Звідси співвідношення (18) не змінюються для продуктів харчування зі складів першого типу. Для складів другої групи кількість продуктів харчування π_i – рівномірно розподілена на проміжку $[\pi_i^l; \pi_i^u]$ випадкова величина, і аналогічно співвідношенням, приведеним в табл. 4, отримаємо детермінований аналог співвідношення (18) для рівня значущості p у вигляді:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq \pi_i^l - p(\pi_i^l - \pi_i^u); \quad i = \overline{w+1, m}, \quad (20)$$

де:

$$\pi_i \in [\pi_i^l; \pi_i^u]; \quad \pi_i^l < \pi_i^u; \quad i = \overline{w+1, m}. \quad (21)$$

Аналогічно, кількість продуктів харчування для всіх споживачів λ_j також буде рівномірно розподіленою вже на проміжку $[\lambda_j^l; \lambda_j^u]$ випадковою величиною. Звідси, отримаємо співвідношення (17) у вигляді:

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \geq \lambda_j^l + p(\lambda_j^l - \lambda_j^u); \quad j = \overline{1, n}, \quad (22)$$

де:

$$\lambda_j \in [\lambda_j^l; \lambda_j^u]; \lambda_j^l < \lambda_j^u; j = \overline{1, n}. \quad (23)$$

Таким чином, детермінований аналог стохастичної транспортної задачі (16) ... (19) може бути представлений такою задачею лінійного програмування:

$$F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \bar{r}_{ij} x_{ij} \rightarrow \min; \quad (24)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \geq \lambda_j^l + p(\lambda_j^l - \lambda_j^u); j = \overline{1, n}; \quad (25)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq \pi_i, i = \overline{1, w}; \quad (26)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq \pi_i^l - p(\pi_i^l - \pi_i^u); i = \overline{w+1, m}; \quad (27)$$

$$x_{ij} \geq 0; i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}, \quad (28)$$

і яка має розв'язок, якщо виконується співвідношення:

$$\sum_{i=1}^m \pi_i + (1-p) \sum_{i=w+1}^m \pi_i^l + p \sum_{i=w+1}^m \pi_i^u \geq (1-p) \sum_{j=1}^n \lambda_j^l + p \sum_{j=1}^n \lambda_j^u. \quad (29)$$

Розглянемо випадок, коли запасів продуктів харчування недостатньо для даного періоду їх розподілу і не всі споживачі отримають продукти споживання у повному обсязі.

Звідси, задача (16)...(19) має бути розглянута у вигляді:

$$F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \bar{r}_{ij} x_{ij}; \quad (30)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \leq \lambda_j^l; j = \overline{1, n}; \quad (31)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = \pi_i; i = \overline{1, m}; \quad (32)$$

$$x_{ij} \geq 0; i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}. \quad (33)$$

Детермінований аналог для співвідношення (31) наступний:

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \leq \lambda_j^l - p(\lambda_j^l - \lambda_j^u); j = \overline{1, n}. \quad (34)$$

Щодо співвідношення (32) для складів другої групи, на наш погляд, при плануванні розподілу харчових продуктів слід орієнтуватись на гарантований їх запас, тобто $\pi_i = \pi_i^u; i = \overline{w+1, m}$.

Таким чином, детермінований аналог стохастичної транспортної задачі (30) ... (33) має вигляд:

$$F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \bar{r}_{ij} x_{ij} \rightarrow \min; \quad (35)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \leq \lambda_j^l - p(\lambda_j^l - \lambda_j^u); j = \overline{1, n}; \quad (36)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = \pi_i, i = \overline{1, w}; \quad (37)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = \pi_i^u; i = \overline{w+1, m}; \quad (38)$$

$$x_{ij} \geq 0; i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}. \quad (39)$$

Обговорення

Оскільки розв'язок задачі (35)...(39) може мати окремі нульові значення (тобто окремі споживачі нічого не отримують), необхідно здійснити поставку кожному із споживачів хоча б на мінімальному рівні $\lambda_j^{\min}; j = \overline{1, n}$, що забезпечить життя людей:

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \geq \lambda_j^{\min}; j = \overline{1, n}. \quad (40)$$

У цьому випадку отримаємо наступну математичну модель транспортної задачі для детермінованого аналогу:

$$F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \bar{r}_{ij} x_{ij} \rightarrow \min; \quad (41)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \leq \lambda_j^l - p(\lambda_j^l - \lambda_j^u); j = \overline{1, n}; \quad (42)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = \pi_i, i = \overline{1, w}; \quad (43)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = \pi_i^u; i = \overline{w+1, m}; \quad (44)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \geq \lambda_j^{\min}; j = \overline{1, n}. \quad (45)$$

$$x_{ij} \geq 0; i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}. \quad (46)$$

Задача (k21)...(k26) має розв'язок, якщо виконується співвідношення:

$$\sum_{i=1}^m \pi_i + \sum_{i=m+1}^n \pi_i^f \geq \sum_{j=1}^n \lambda_j^{\min}. \quad (47)$$

Запропоновані в даному повідомленні методики надають можливість визначити оптимальні раціони, необхідні для забезпечення життєдіяльності як особового складу ДСНС, так і осіб, що постраждали в результаті НС, а також створити план перевезення продуктів харчування, який забезпечує мінімальні витрати пального.

Висновки

1. Як правило, зокрема в економічно розвинених країнах і таких, що володіють розгалуженою високопрофесійною рятувальною службою, існує період від декількох днів до місяців, коли спостерігається дефіцит продовольства на всій території або деяких її районах, що постраждала від НС.

2. Найуразливішим з погляду забезпечення продуктами харчування в умовах НС є міське населення.

3. Тривале вживання населення, потерпілого від НС регіонів в їжу спеціалізованих високоенергетичних продуктів і стандартних армійських раціонів призводить до значного погіршення здоров'я осіб, що відносяться до категорії найуразливіших. Це викликає необхідність організації пунктів централізованого приготування і годування населення гарячою їжею.

4. При складанні й реалізації планів ліквідації НС слід використовувати не тільки продовольчі резерви, які знаходяться на спецзберіганні в складах ДСНС, але й запаси продуктів харчування що є на складах і сховищах торгової мережі.

5. Для розв'язання задач забезпечення продуктами харчування використано наступні задачі лінійного програмування: задача дієти та транспортна задача.

6. Оскільки в умовах НС рішення приймають в умовах неповної інформації, то для оптимізації логістичних процесів використано методи стохастичного лінійного програмування. Для розв'язання задачі дієти прийнято, що розподіл параметрів задачі рівномірний. Це дало можливість визначити необхідну кількість продуктів із заздалегідь визначеним рівнем забезпеченості.

Список використаних джерел

1. Чумаченко С. М., Канаяма Рене, Винник-Чаплинський М. О., Черепньов І. А. Продовольчі запаси домогосподарств як фактор виживання в надзвичайних ситуаціях. обґрунтування підбору продуктів харчування. Молодь і технічний прогрес в АПВ: зб. матеріалів Міжнар. наук.-практ. конф. 23-24 листопада 2023 р. Харків: ДБТУ, 2023. С. 301-302.

2. Extreme weather caused two million deaths, cost \$4 trillion over last 50 years. United Nations: веб-сайт. URL: <https://news.un.org/en/story/2023/05/1136897> (дата звернення: 03.02.2025).

3. Our World At Risk: Transforming Governance for a Resilient Future. United Nations Office for Disaster Risk Reduction: веб-сайт. URL: <https://www.undrr.org/gar/gar2022-our-world-risk-gar> (дата звернення: 03.02.2025).

4. Yang L., Liu M., Smith J. A., Tian F. Typhoon Nina and the August 1975 Flood over Central China. Journal of Hydrometeorology. 2017. № 18(2). P. 451-472. doi:10.1175/jhm-d-16-0152.1.

5. Marzban A., Emem P. The Importance of Food Safety in Disasters – A Glance at the Recent Flood in Iran (July 2022). *Novelty in Clinical Medicine*. 2022. № 1(4). P. 204-205. doi.org/10.22034/NCM.2022.353717.1054.
6. Liu S., Li Y., Fu S., Liu X., Liu T., Fan H., Cao C. Establishing a Multidisciplinary Framework for an Emergency Food Supply System Using a Modified Delphi Approach. *Foods*. 2022. № 11. 1054. doi.org/10.3390/foods11071054.
7. World Cities Report 2022. Envisaging the Future of Cities. Un-habitat: веб-сайт. URL: <https://unhabitat.org/wcr/2022/> (дата звернення: 03.02.2025).
8. Wien M, Sabatї J. Food selection criteria for disaster response planning in urban societies. *Nutrition Journal*. 2015. № 14(1), pp.14:47. doi: 10.1186/s12937-015-0033-0.
9. Kosa K., Cates S., Goodwin S., Coppings R., Speller-Henderson L. Most Americans are not prepared to ensure food safety during power outages and other emergencies. *Food Prot Trends*. 2011. Vol. 31, № 7. P. 428-436. URL: https://www.researchgate.net/publication/267218792_Most_Americans_are_Not_Prepared_to_Ensure_Food_Safety_during_Power_Outages_and_Other_Emergencies/
10. Golem D., Hallman W., Cuїte C., Bellows A., Byrd-Bredbenner C. Food Supplies of Immigrant and Minority Households. *Topics in Clinical Nutrition*. 2016. Vol. 31, № 3, P. 213-221. doi:10.1097/tin.0000000000000074.
11. Takashi Nakazawa, Shigeru Beppu. Shifting from Emergency Food to Disaster Preparation Food to Help Disaster Survivors. *Quarterly Review*. 2012. № 44. P. 36-52.
12. Miho Nozue, Kazuko Ishikawa-Takata, Nobuko Sarukura, Kazuko Sako, Nobuyo Tsuboyama-Kasaoka. Stockpiles and food availability in feeding facilities after the Great East Japan Earthquake. *Asia Pac J Clin Nutr*. 2014. № 23(2), pp. 321-330. doi: 10.6133/apjcn.2014.23.2.14.
13. Devon L Golem, William Hallman, Cara Cuїte, Carol Byrd-Bredbenner. Food Supplies of Immigrant and Minority Households: How Prepared Are They for Disaster Emergency Conditions? *Topics in Clinical Nutrition*. 2016. Vol. 31, № 3, pp. 213-221. doi: 10.1097/TIN.0000000000000074.
14. Денисенко С. А., Попко С. О., Черепньов І. А. Підходи до формування вимог до характеристик продуктів харчування в надзвичайних ситуаціях. Безпека людини у сучасних умовах: зб. доп. XV Міжнародної науково-методичної конференції Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” та Міжнародної наукової конференції Європейської Асоціації наук з безпеки (EAS) «Безпека людини у сучасних умовах», 7-8 грудня 2023 р. Харків: НТУ «ХПІ», 2023. С. 65-67.
15. Попко С. О., Черняк Ю. Д., Шубний В. В., Пісня Л. А., Черепньов І. А. Використання запасів комерційної торговельної мережі для вирішення проблем постачання в умовах катастроф. Молодь і технічний прогрес в АПВ: матеріали Міжнар. наук-практ. конф., 26-27 лист. 2024 р. Харків: ДБТУ, 2024. С. 376-380.
16. Гадецька С. В., Дубницький В. Ю., Кушнерук Ю. І., Філатова Л. Д., Черепньов І. А. Багатокритеріальна (векторна) оптимізація раціону військовослужбовців, розташованих в стаціонарних і польових умовах. Системи озброєння і військова техніка. 2019. № 2(58). С. 152-167. doi: 10.30748/soivt.2019.58.18. URL: https://www.researchgate.net/publication/230873347_Stochastic_Programming_Handbook_in_Operations_Research_and_Management_Science
17. Зайченко Ю. П. Дослідження операцій. Підручник. Київ: Видавничий дім «Слово», 2006. 816 с.
18. Christine K. Booth; Ross F. Coad; Christopher H. Forbes-Ewan; Gary F. Thomson; Philip J. Niro. The Physiological and Psychological Effects of Combat Ration

Feeding during a 12-Day Training Exercise in the Tropics. *MILITARY MEDICINE*. 2003, (168(1). P. 63-70. URL: <https://doi.org/10.1093/milmed/168.1.63/>

19. Ruszczyński A., Shapiro A. *Stochastic Programming*. Handbooks in Operations Research and Management Science Elsevier Science, 1st edition. Amsterdam. 2003. 700 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/230873347_Stochastic_Programming_Handbook_in_Operations_Research_and_Management_Science.

References

1. Chumachenko, S. M., Kanayama, Rene, Vynnyk-Chaplinsky, M. O. and Cherepnyov, I. A. (2023), Household food reserves as a survival factor in emergency situations. justification for the selection of food products. Youth and technical progress in the APV, collection of materials of the International Scientific-Practical Conference, November 23-24, 2023, DBTU, Kharkiv, pp. 301-302.

2. Extreme weather caused two million deaths, cost \$4 trillion over last 50 years. United Nations: веб-сайт. URL: <https://news.un.org/en/story/2023/05/1136897> (accessed: 03.02.2025).

3. Our World At Risk: Transforming Governance for a Resilient Future. United Nations Office for Disaster Risk Reduction: веб-сайт. URL: <https://www.undrr.org/gar/gar2022-our-world-risk-gar> (accessed: 03.02.2025).

4. Yang, L., Liu, M., Smith J. A. and Tian F., (2017), Typhoon Nina and the August 1975 Flood over Central China, *Journal of Hydrometeorology*, No.18(2), pp. 451-472. doi:10.1175/jhm-d-16-0152.1.

5. Marzban, A. and Emem, P., (2022), [The Importance of Food Safety in Disasters – A Glance at the Recent Flood in Iran (July 2022)], *Novelty in Clinical Medicine*, No.1(4) pp. 204-205. doi.org/10.22034/NCM.2022.353717.1054.

6. Liu, S., Li, Y., Fu, S., Liu, X., Liu, T., Fan H. and Cao C. (2022), [Establishing a Multidisciplinary Framework for an Emergency Food Supply System Using a Modified Delphi Approach] *Foods*, No.11, 1054. doi.org/10.3390/foods11071054.

7. World Cities Report (2022), Envisaging the Future of Cities. Un-habitat: веб-сайт. URL: <https://unhabitat.org/wcr/2022/> (accessed: 03.02.2025).

8. Wien M, and Sabatň J. (2015), Food selection criteria for disaster response planning in urban societies, *Nutrition Journal*. No.14(1) pp. 14:47. doi: 10.1186/s12937-015-0033-0.

9. Kosa, K., Cates S, Goodwin, S., Coppings R. and Speller-Henderson L. (2011), [Most Americans are not prepared to ensure food safety during power outages and other emergencies] *Food Prot Trends.*, Vol. 31, No.7, pp. 428-436. URL: https://www.researchgate.net/publication/267218792_Most_Americans_are_Not_Prepared_to_Ensure_Food_Safety_during_Power_Outages_and_Other_Emergencies.

10. Golem, D., Hallman, W., Cuite, C., Bellows A. and Byrd-Bredbenner C., (2016), [Food Supplies of Immigrant and Minority Households], *Topics in Clinical Nutrition*. Vol. 31, No.3, pp. 13-221. doi:10.1097/tin.0000000000000074

11. Takashi Nakazawa and Shigeru Beppu. (2012), [Shifting from Emergency Food to Disaster Preparation Food to Help Disaster Survivors], *Quarterly Review*, No.44, pp. 36-52.

12. Miho, Nozue, Kazuko, Ishikawa-Takata, Nobuko, Sarukura, Kazuko, Sako and Nobuyo, Tsuboyama-Kasaoka. (2014), Stockpiles and food availability in feeding facilities after the Great East Japan Earthquake. *Asia Pac J Clin Nutr*. No.23(2), pp. 321-330. doi: 10.6133/apjcn.2014.23.2.14.

13. Devon, L, Golem, William Hallman, Cara Cuite and Carol Byrd-Bredbenner, (2016), Food Supplies of Immigrant and Minority Households: How Prepared Are They for

Disaster Emergency Conditions?, Topics in Clinical Nutrition. No.3(31), pp. 213-221. doi: 10.1097/TIN.0000000000000074.

14. Denisenko, S. A., Popko, S. O., Cherepnev, I. A. (2023), Approaches to the formation of requirements for the characteristics of food products in emergency situations. Human safety in modern conditions: collection of proceedings of the 15th International Scientific and Methodological Conference of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" and the International Scientific Conference of the European Association of Security Sciences (EAS) "HUMAN SAFETY IN MODERN CONDITIONS", December 7-8, Kharkiv NTU "KhPI" Kharkiv, pp. 65-67.

15. Popko, S. O., Chernyak Yu. D., Shubnyi, V. V., Pisnya L. A. and Cherepnyov I. A. (2024), Using commercial trade network reserves to solve supply problems in disaster conditions Youth and technical progress in the APV: materials of the International Scientific and Practical. Conference, November 26-27, DBTU, Kharkiv, pp. 376-380.

16. Gadetska, S., Dubnitskiy, V., Kushneruk, Y., Filatova, L. and Cherepnev, I. (2019), Multi-criteria (vector) optimization of military rations under presidial and field conditions, SYSTEMS OF ARM AND MILITARY EQUIPMENTS, No.2 (58), pp. 152-166. doi: 10.30748/soivt.2019.58.18.

17. Zaichenko Yu. P. (2006). Operations research. Textbook, Word Publishing House, Kyiv, 2006, 816 p. URL: <https://science.kpi.ua/konk-pidr-2004/pidruchnik-doslidzhennya-operatsij-avtor-zajchenko-yu-p>.

18. Christine K. Booth; Ross F. Coad; Christopher H. Forbes-Ewan; Gary F. Thomson; Philip J. Niro. The Physiological and Psychological Effects of Combat Ration Feeding during a 12-Day Training Exercise in the Tropics. MILITARY MEDICINE. 2003, (168(1), pp. 63-70. URL: <https://doi.org/10.1093/milmed/168.1.63>.

19. Ruszczyński A., Shapiro A. Stochastic Programming. Handbooks in Operations Research and Management Science Elsevier Science, 1st edition. Amsterdam. 2003. 700 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/230873347_Stochastic_Programming_Handbook_in_Operations_Research_and_Management_Science

Кириченко Р. В.,
Лубченко Є. В.,
Козій О. Б.,
Колпаченко А. О.

Державний біотехнологічний
університет,
м. Харків, Україна
E-mail:
kirichenkoromeo1971@gmail.com

ОГЛЯД КОНСТРУКЦІЙ ПОСІВНИХ
МАШИН ДЛЯ MINI-TILL ТА NO-TILL
ТЕХНОЛОГІЙ У СИСТЕМАХ
РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧОГО
ЗЕМЛЕРОБСТВА

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-26-25-35>

УДК 631.331

Кириченко Р.В., Лубченко Є.В., Козій О.Б., Колпаченко А.О. **Огляд конструкцій посівних машин для Mini-Till та No-Till технологій у системах ресурсозберігаючого землеробства.**

Анотація. Розглянуто актуальні питання підвищення ефективності сівби зернових культур в умовах впровадження ресурсозберігаючих технологій землеробства Mini-Till і No-Till. Проведено огляд сучасних посівних машин, конструктивних особливостей сівалок різних виробників, а також техніко-технологічних рішень, спрямованих на підвищення якості сівби. Проаналізовано конструктарські рішення, що застосовуються в посівних машинах провідних вітчизняних та закордонних виробників, зокрема конструкції сошників, загортачів, притискних механізмів і систем копіювання. Наведені ефективні реалізації технічних рішень, які забезпечують якісну сівбу на полях із великою кількістю пожнивних решток та за зміненою структурою ґрунту. Результати досліджень дають можливість сформулювати уявлення про перспективні напрямки вдосконалення посівних машин та підвищення ефективності її використання в системах сталого землеробства.

Ключові слова: ресурсозберігаючі технології, Mini-Till, No-Till, посівні машини, сівалки, сошники, зернові культури, пожнивні рештки.

Kyrychenko R.V., Lubchenko E.V., Koziy O.B., Kolpachenko A.O. **Review of designs of seeding machines for Mini-Till and No-Till technologies in resource-saving farming systems.**

Abstract. The current issues of increasing the efficiency of sowing grain crops in the context of the implementation of resource-saving agricultural technologies mini-till and no-till are considered. A review of modern sowing machines, design features of seeders from different manufacturers, as well as technical and technological solutions aimed at improving the quality of sowing is conducted. Design solutions used in sowing machines from leading domestic and foreign manufacturers are analyzed, in particular the designs of openers, wrappers, clamping mechanisms and copying systems. Effective implementations of technical solutions that ensure high-quality sowing in fields with a large amount of crop residues and with a changed soil structure are presented. The research results provide an opportunity to form an idea of promising areas for improving seeding machines and increasing the efficiency of their use in sustainable farming systems.

Key words: resource-saving technologies, Mini-till, No-till, seeders, seed drills, openers, grain crops, crop residues.

Постановка проблеми

Одним із пріоритетних напрямів розвитку аграрного сектору є впровадження ресурсозберігаючих технологій обробітку ґрунту та посіву, що здатні забезпечити підвищення ефективності виробництва сільськогосподарської продукції при одночасному збереженні природних ресурсів [1, 2]. Особливої актуальності ці питання набувають в умовах кліматичних змін, деградації ґрунтів, підвищення вартості енергоресурсів та необхідності дотримання принципів сталого розвитку.

Традиційні технології вирощування зернових культур, які передбачають багаторазовий обробіток ґрунту з використанням плуга, забезпечують високу якість підготовки посівного ложа, однак мають ряд недоліків. Серед них – висока енергоємність, порушення структури ґрунту, зменшення вмісту гумусу, активізація ерозійних процесів, зниження біологічної активності ґрунтової мікрофлори [3-7]. У зв'язку з цим широке розповсюдження отримують технології мінімального Mini-Till та нульового No-Till обробітку ґрунту, які дозволяють значно зменшити антропогенне навантаження на агроценози та покращити екологічний стан земельних ресурсів [8].

Проте впровадження до зазначених технологій сівби супроводжується низкою технічних, агрономічних і організаційних проблем. Однією із головних задач є забезпечення якісного та рівномірного висіву насіння в умовах залишкової стерні та рослинних решток, їх нерівномірного розподілу як по поверхні поля так і по глибині, зміненої щільності й вологості ґрунту. Сівалки, які використовуються у традиційних умовах, не в повній мірі забезпечують необхідну якість висіву за технологіями Mini-Till і No-Till. Це вимагає вдосконалення конструкцій сошників, зароблюючих органів, систем регулювання глибини та тиску на ґрунт посівних машин.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Поява нових конструкцій сівалок значною мірою зумовлена впровадженням сучасних технологій вирощування сільськогосподарських культур, зокрема ґрунтозахисної, мінімальної та нульової, а також прагненням до підвищення точності сівби, універсалізації посівної техніки та використання більш потужних тракторів [9].

Основні напрями розвитку посівних машин включають: збільшення ширини захвату, інтеграцію з комбінованими агрегатами для обробітку ґрунту, а також розробку універсальних посівних комплексів, здатних ефективно функціонувати за умов традиційного, мінімального та нульового обробітку ґрунту [10]. Виробники пропонують широкий спектр технічних рішень, що дозволяють досягати високої якості сходів за умови максимальної продуктивності та мінімальних витрат ресурсів, адаптуючи техніку до умов конкретного господарства.

Останні дослідження та публікації, які присвячені вивченню використання посівних машин у сучасному аграрному виробництві, охоплюють широкий спектр тем і вирізняються інноваційним підходом до розв'язання актуальних завдань. Один із провідних напрямів таких досліджень є аналіз ефективності застосування сучасних посівних машин у системах ресурсозберігаючого землеробства [11–15].

Формулювання мети досліджень

Метою даного дослідження є описовий аналіз конструкцій посівних машин, що використовуються в умовах ресурсозберігаючих технологій обробітку ґрунту Mini-Till

та No-Till, з урахуванням їх агротехнічних вимог, конструктивних особливостей та ефективності функціонування.

Результати досліджень

Для сівби зернових культур за умов ресурсозберігаючих технологій (Mini-Till, No-Till) на сьогодні розроблено та активно застосовується значна кількість різноманітних посівних машин і комплексів як вітчизняного, так і зарубіжного виробництва.

Посівний комплекс вітчизняного виробництва «Златник» (рис. 1) призначений для висіву зернових культур як за традиційною, так і за мінімальною технологією обробки ґрунту. Це забезпечується наявністю висівного блоку, оснащеного посиленими дводисковими сошниками. Крім того, агрегат може комплектуватися хвилястими дисками, встановленими перед кожним сошником, що дозволяє ефективно працювати на полях із великою кількістю пожнивних залишків, а також здійснювати посів за технологією No-Till.



Рис. 1. Посівний комплекс «Златник»

Роздільно-агрегатна компоновка посівного комплексу забезпечує можливість тривалої безперервної роботи без частих зупинок на обслуговування чи заправку, що сприяє підвищенню продуктивності. Важкий дводисковий сошник із радіальним зміщенням дисків, у поєднанні з хвилястим диском, встановленим перед ним, забезпечує якісну заробку насіння та добрив на задану глибину в умовах різної щільності та вологості ґрунту. Глибина ходу дискових сошників регулюється за допомогою спеціального механізму. Збільшення зусилля на пружині дозволяє сошнику ефективно занурюватися у щільніший ґрунтовий фон, забезпечуючи стабільну глибину сівби.

Посівний комплекс АПК-9,0 Partner (рис. 2), розроблений КБ «Українська аграрна техніка», є багатофункціональним агрегатом, придатним для роботи за технологіями ресурсозбереження.

Завдяки своїй конструкції, що включає культиваторні лапи, пружинні борони, гумові прикочувальні колеса та шпигельні знаряддя, даний комплекс здатен виконувати повний комплекс операцій за один прохід по полю. Цей комплекс забезпечує: розпушення ґрунту, підрізання бур'янів, формування твердого посівного ложа на заданій глибині з одночасним суцільним розсіюванням насіння та добрив під культиваторними лапами; точне дозування насіннєвого та мінерального матеріалу за допомогою висівних і тукових апаратів; вибісування бур'янів та вирівнювання поверхні ґрунту пружинними боронами; прикочування насіння гумовими колесами; мульчування

верхнього шару ґрунту та збереження вологи шпригельними знаряддями. Така комплексність конструкції забезпечує високу ефективність сівби та адаптивність до різних умов технологій Mini-Till і No-Till.



Рис. 2. Посівний комплекс АПК-9,0 Partner

Посівні комплекси Alcor 7,5 та Alcor 10 (рис. 3), розроблені АТ «Elvortі» (Україна), призначені для смугового посіву зернових, зернобобових та інших культур за умов мінімального або традиційного обробітку ґрунту. Робоча ширина захвату становить відповідно 7,3 і 9,8 м.



Рис. 3. Посівний комплекс ALCOR 10 виробництва АТ Elvortі

Використання комплексів Alcor у технології Mini-Till дозволяє виключити виконання трудомістких і енергозатратних проміжних операцій, таких як оранка та передпосівна культивування. Завдяки застосуванню стрічкових лап можливе здійснення сівби по стерні з висотою пожнивних залишків до 150 мм, при цьому взаємне перекриття лап становить 75 мм, що забезпечує суцільне оброблення ґрунту у смугі сівби. Гумові прикочувальні котки забезпечують щільне прилягання насіння до вологого ущільненого посівного ложа, що сприяє дружним сходам і підвищенню ефективності використання вологи.

Пневматична однодискова сівалка Orion 9,6, розроблена АТ «Elvortі» (рис. 4), призначена для посіву зернових, зернобобових та інших культур у межах традиційної, мінімальної (Mini-Till) і нульової (No-Till) технологій обробітку ґрунту. Робоча ширина захвату сівалки становить 9,6 м, що забезпечує високу продуктивність.

Особливістю конструкції сівалки є оснащення посівних секцій радіальною підвіскою, яка дозволяє ефективно копіювати рельєф поля та забезпечує рівномірну заробку насіння на задану глибину навіть на нерівних ділянках. Завдяки поєднанню однодискових сошників і ефективної системи притискання, сівалка здатна якісно

працювати на полях із великою кількістю пожнивних залишків, що є характерним для ресурсозберігаючих технологій.



Рис. 4. Сівалка пневматична однодискова Orion 9,6

Механічні зернові сівалки Alfa 6 Mini-Till та Alfa 4 Mini-Till виробництва АТ «Elvorti» (рис. 5) призначені для рядкового посіву зернових і зернобобових культур із одночасним внесенням мінеральних добрив та коткуванням ґрунту в зоні засіяного рядка. Застосування даних агрегатів забезпечує високу якість сівби відповідно до вимог ресурсозберігаючих технологій, зокрема Mini-Till.



Рис. 5. Сівалка механічна зернова Alfa 6 Mini-Till

Сівалки оснащені дводисковими сошниками зі зміщеними дисками, що забезпечує стабільну роботу агрегатів за наявності значної кількості пожнивних решток на поверхні поля. Завдяки застосуванню технології обробки сталей із вмістом бору, ресурс роботи сошників збільшено на 100 %, що сприяє підвищенню надійності техніки в польових умовах.

Вдосконалена система притискання CoultSystem із прикочувальним котком забезпечує тиск сошника до 130 кг за рахунок гідравлічного клапана та пружин підвищеної жорсткості. Це дозволяє стабільно витримувати задану глибину заробки насіння та добрив і забезпечує високу якість посіву при мінімальному обробітку ґрунту.

Сівалка Semeato PD-17 (рис. 6) – універсальна зернова сівалка бразильського виробництва, призначена для рядкового посіву зернових колосових культур та широкорядного посіву просапних культур із одночасним внесенням мінеральних добрив. Конструкція сівалки дозволяє здійснювати змішаний та сумісний посів, що підвищує її адаптивність до різноманітних агротехнологій. Робоча ширина захвату становить 2,9 м, при міжрядді 17 см сівалка оснащена 17 сошниками. Сівалка Semeato

PD-17 здатна працювати на різних агрофонах: після оранки, дискування або безпосередньо по стерні.



вигляд спереду



вигляд ззаду

Рис. 6. Сівалка Semeato

Подвійна рама і паралелограмна підвіска посівної секції забезпечують високоточне копіювання мікрорельєфу поля та безперешкодне проходження через значну кількість пожнивних залишків. Шахове розташування посівних секцій та їх зміщення відносно коліс регулювання глибини сприяють якісному посіву на зволжених ґрунтах.

Сошники сівалки мають мінімальний кут між дисками 7° , що забезпечує мінімальне порушення ґрунтової структури при здатності ефективно розрізати рослинні решки. Значна маса агрегату 3500 кг дозволяє створювати тиск до 250 кг/см^2 на сошник, що гарантує стабільну глибину заробки насіння. V-подібні прикочувальні колеса ущільнюють насіння під кутом до зони проростання, забезпечуючи надійний контакт із ґрунтом, а також мають систему регулювання кута атаки для адаптації до різних ґрунтових умов.

Сівалка Amazone Primera DMC 6000-2C (рис. 7), виробництва компанії Amazone-Werke (Німеччина), призначена для проведення мульчованого та прямого посіву зернових культур. Основною особливістю цієї сівалки є використання долотоподібних сошників з гострим кутом входження в ґрунт та паралелограмною підвіскою, що забезпечує точне дотримання глибини висіву та формування стабільної посівної борозни. Сошники розташовані в 4 ряди на поздовжніх траверсах, з відстанню між рядами 18,75 см, утворюючи наскрізний «тунель» довжиною 75 см, що сприяє ефективному проходу через мульчу та рослинні залишки.



Рис. 7. Сівалка Amazone Primera DMC 6000-2C

Задній подвійний коток сівалки забезпечує ущільнення ґрунту в посівній борозні, що оптимізує контакт насіння з ґрунтом, покращуючи умови для проростання. Механізм запобіжної системи Revomat дозволяє надійно проводити посів навіть на кам'янистих ґрунтах, що підвищує універсальність агрегату.

Заробляється насіння за допомогою рамкових котків, оснащених відбивними дисками та рамками, виготовленими з високоміцного матеріалу, що забезпечує високу зносостійкість. Рамки виконують роль опорних елементів, утримуючи долото та гарантуючи рівномірну глибину посіву. У процесі утворення борозни долотом частина ґрунту відкидається, а обидва диски повертають цей ґрунт назад у посівну борозну, що дозволяє створити оптимальні умови для укріплення насіння. Глибина посіву регулюється централізовано для кожної групи сошників за допомогою регулювальної рукоятки, що дає можливість точного налаштування під різні умови обробки ґрунту та культури.

Комбінована сівалка Omega OO FL фірми Bednar (Чехія) (рис. 8) призначена для посіву зернових культур за традиційною технологією, по стерні та за мінімальною технологією обробки ґрунту з великою кількістю пожнивних залишків на поверхні. Сівалка оснащена переднім гумовим пневматичним котком Frontpack, діаметр коліс якого становить 710 мм. Коток вирівнює поверхню поля, включаючи борозни, а також забезпечує стійкість агрегата на одному рівні, що сприяє покращенню прохідності сівалки при роботі на полях з великою кількістю пожнивних залишків.



Рис. 8. Комбінована сівалка Omega OO FL

Основною особливістю сівалки є наявність двох рядів дисків, які подрібнюють рослинні рештки та змішують їх з ґрунтом, створюючи аерацію перед ущільненням котком і висівом насіння. Глибина руху дисків регулюється гідравлічно, що дозволяє точно налаштовувати роботу сівалки відповідно до умов поля. Спеціальний рифлений диск діаметром 460×5 мм має покращений подрібнюючий і перемішуючий ефект порівняно з стандартними дисками завдяки великій кількості гострих кромek і профільній формі, що дозволяє краще змішувати рослинні залишки з ґрунтом.

Диски розташовані по два на одній стійці, що збільшує прохідність між стійками з відстанню 49 см, дозволяючи ефективно працювати навіть в умовах великої кількості рослинних залишків на поверхні поля.

Сівалка також може бути оснащена Turbo-колтерами – гострими дисками, розміщеними за дисковою секцією. Ці колтери працюють у тому ж міжрядді з сошниками, подрібнюючи і перемішуючи рештки стерні з ґрунтом перед висівом

насіння. Дводисковий сошник зі зміщеними дисками ефективно подрібнює рештки і формує вільну борозну для рівномірного розміщення насіння. Після цього насіння заробляється у добре структурований ґрунт, а прикочувальний коток забезпечує надійне ущільнення.

Посівний комплекс MegaSeed (Німеччина) (рис. 9) є причіпною рядковою сівалкою з ґрунтообробною приставкою, призначеною для сівби зернових культур за традиційною та ресурсозберігаючою технологіями. Комплекс випускається з робочою шириною захвату 3; 4; 4,5 та 6 м. Відстань між рядками становить 12,5 см. Залежно від типу встановлених робочих органів, сівалка може ефективно використовуватися як при сівбі за класичною технологією, так і для мульчувального чи прямого посіву.



Рис. 9. Посівний комплекс «MegaSeed»

Сівба здійснюється по мульчуючому шару ґрунту, сформованому в результаті попереднього подрібнення та заробки рослинних решток. При невеликій щільності ґрунтів агрегат може використовуватися для прямого посіву без попереднього обробітку з використанням відповідних мульчуючих робочих органів.

Залежно від стану поля та обраної технології, посівний комплекс MegaSeed може бути оснащений різними ґрунтообробними елементами: дворядною дисково-ножовою бороною; комбінацією борін з S-подібними вібраційними зубами у два ряди; дворядним зубчастим котком; або багаторядними мульчуючими дисковими робочими органами у поєднанні з котками різного типу – зубчастим (Ø 660 мм), мульчувальним (Ø 640 мм) чи гумовим (Ø 640 мм). Така комплектація дозволяє адаптувати сівалку до різних агрофонів.

Глибина заробки насіння регулюється механізмом прикочувальних котків залежно від типу ґрунту та культури. Прикочувальні котки забезпечують рівномірне ущільнення та стабільну глибину загортання насіння. Завдяки широким еластичним шинам котки не занурюються в легкі ґрунти та не забиваються при підвищеній вологості.

Сівалка оснащена вирізними дисковими сошниками на шарикопідшипниках, які формують борозенки для розміщення насіння. Високий тиск на сошники до 800 Н забезпечує стабільну роботу та рівномірну глибину посіву на різних типах ґрунтів. У разі потреби навантаження на сошники може бути знижено. Пружинний загортач, який розташований ззаду, завдяки зміні кута атаки, дозволяє працювати на полях з високим вмістом залишків рослин, при цьому не забиваючись.

Посівний комплекс MegaSeed з дисконожовими боронами та мульчуючими дисками є ефективним рішенням для сівби в умовах значної кількості пожнивних залишків з інтенсивним їх заробкою у ґрунт.

Обговорення

Вибір сівалки визначається агротехнічними вимогами і способом системи обробітку ґрунту. Виходячі з цього, необхідним є застосування відповідної сошникової групи – одного з основних конструктивних елементів сівалки, який визначає її технологічне призначення та забезпечує стабільність і якість висіву. Конструкція сошників обумовлює адаптацію посівних машин до умов сівби за традиційною, мінімальною або нульовою технологією обробітку ґрунту, забезпечуючи ефективну заробку. Аналіз конструкцій посівних машин свідчить, що сівба зернових культур за ресурсозберігаючою технологією може виконуватись із застосуванням трьох основних типів сошників: лапових, долотоподібних та дискових.

Великі сільськогосподарські підприємства мають змогу інвестувати у придбання сучасних вітчизняних та імпорتنих посівних машин, оснащених робочими органами, що забезпечують ефективний висів зернових культур за умов ресурсозберігаючих технологій. Однак проведений аналіз конструкцій таких сівалок засвідчив, що вони характеризуються складною будовою, високою матеріалоемністю та значною вартістю, що істотно обмежує можливості їхнього придбання і використання дрібними та середніми фермерськими господарствами.

З урахуванням конструктивних рішень сучасних посівних машин та ґрунтово-кліматичних умов вирощування зернових культур в Україні, модернізація існуючих сівалок шляхом оснащення їх удосконаленими зароблюючими робочими органами дозволить підвищити ефективність технологічного процесу сівби.

Висновки

1. Застосування технологій Mini-Till та No-Till у вирощуванні зернових культур повністю відповідає сучасним вимогам ресурсозбереження, екологічної безпеки та адаптації агровиробництва до кліматичних змін. Впровадження цих технологій дає змогу суттєво знизити енергетичні та матеріальні витрати на обробіток ґрунту, мінімізувати прояви водної та вігрової ерозії, а також забезпечити ефективне збереження вологи, що є особливо актуальним для посушливих регіонів.

2. Аналіз конструкцій сучасних посівних машин, призначених для ресурсозберігаючих технологій вирощування зернових культур, засвідчив, що основними тенденціями їх розвитку є універсальність застосування, адаптивність до різних типів ґрунтів та агрофонів, а також здатність забезпечувати стабільну глибину заробки насіння.

3. Важливою конструкційною особливістю сівалок є наявність елементів, що сприяють ефективному проходженню посівного агрегату по полю з великою кількістю рослинних решпок. До таких рішень належать шахове розташування сошників, дводискові сошники з підвищеним тиском на ґрунт, використання Turbo-дисків і мультучючих робочих органів.

4. Отримані результати можуть бути використані для подальших розробок посівних машин, здатних адаптуватися до різних агрокліматичних умов і типів ґрунтів з метою забезпечення якісного висіву за мінімальних витрат ресурсів.

Список використаних джерел

1. Інноваційні ресурсозберігаючі технології: ефективність в умовах різного фінансового стану агроформувань: монографія, за ред. професора Г.Є. Мазнева. Харків: Вид-во «Майдан», 2015. 592 с.

2. Blanco-Canqui, H., Lal, R. Principles of Soil Conservation and Management. Springer Science. 2008. 617 p.
3. Лозовіцький П.С. Основи землеробства та рослинництва Книга 1. Землеробство: Посібник для вищих учбових закладів. К. 2010. 268 с.
4. Derpsch, R., Friedrich, T. Sustainable Crop Production Intensification: The Role of Conservation Agriculture. FAO, Rome. 2019.
5. Reicosky, D.C. Conservation tillage and carbon cycling: Impacts on soil and climate. Soil & Tillage Research, Vol. 180, 2018. pp. 2–13.
6. Сайко В.Ф., Малієнко А.М. Системи обробітку ґрунту в Україні. К.: ВД «ЕМКО», 2007. 44 с.
7. Циліорик О.І. Система мульчувального обробітку ґрунту в Північному Степу: монографія. Дніпро: Новий Світ. 2000, 2019. 298 с.
8. Медведєв В.В. Нульовий обробіток ґрунту в європейських країнах. Харків: ТОВ «ЕДЕНА», 2010. 202 с.
9. Данилюк Т. Обґрунтування технології обробітку ґрунту та посіву. Зб. наук. праць УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України. 2011. Вип. 15(29). С. 486-488.
10. Грушецький С.М., Кириченко Р.В., Омелянов О.М. Аналіз та перспективи технологічних і конструктивних особливостей посівних машин. Техніка, енергетика, транспорт АПК. - 2022. - № 2 (117). С. 25-33. - DOI 10.37128/2520-6168-2022-2-3.
11. Гевко Б.М., Ляшук О.Л., Павельчук Ю.Ф., Пришляк В.М. Технологічні основи проектування та виготовлення посівних машин: монографія. Тернопіль: Вид. ТНТУ імені Івана Пулюя, 2014. 238 с.
12. Думич В., Сало Я. Дослідження нових зернових сівалок українських виробників. Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України. 2020. Вип. 26 (40). С. 162-169.
13. Сало В., Лещенко С., Лузан П., Сало Л. Машини для сівби, садіння та догляду за посівами: навч. посіб. Кропивницький: Лисенко В.Ф., 2022. 220 с.
14. Кириченко Р.В., Лубченко Є.В., Калашник В.В. Технологічні умови сівби зернових культур за ресурсозберігаючою технологією Mini-Till. Молодь і технічний прогрес в АПВ: матеріали Міжнарод. наук.-практ. конф. Х.: ДБТУ. 2023. С. 145-146.
15. Кириченко Р.В., Бурлака С.А. Шляхи удосконалення конструкцій сівалок для точного землеробства. Вібрації в техніці та технологіях. - 2023. - № 4 (111). С. 37-46. - DOI 10.37128/2306-8744-2023-4-6.

References

1. Innovative Resource-Saving Technologies: Efficiency under Different Financial Conditions of Agricultural Enterprises: Monograph / ed. by Prof. H.Ye. Mazniev. Kharkiv: «Maidan», 2015. 592 p.
2. Blanco-Canqui, H., Lal, R. Principles of Soil Conservation and Management. – Springer Science. 2008. 617 p.
3. Lozovytskyi P.S. Fundamentals of Agriculture and Crop Production. Book 1. Agriculture: Textbook for Higher Education Institutions. Kyiv, 2010. 268 p.
4. Derpsch, R., Friedrich, T. Sustainable Crop Production Intensification: The Role of Conservation Agriculture. – FAO, Rome. 2019.
5. Reicosky, D.C. Conservation tillage and carbon cycling: Impacts on soil and climate. // Soil & Tillage Research, Vol. 180, 2018. pp. 2–13.

6. Saiko V.F., Malienko A.M. Soil Tillage Systems in Ukraine. Kyiv: VD «EMKO», 2007. 44 p.
7. Tsiliuryk O.I. Mulching Tillage System in the Northern Steppe: Monograph. Dnipro: Novyi Svit – 2000, 2019. 298 p.
8. Medvedev V.V. Zero Tillage in European Countries. Kharkiv: EDEMA LLC, 2010. 202 p.
9. Danyliuk T. Substantiation of Soil Tillage and Sowing Technology. Collection of Scientific Works of the Ukrainian Research Institute of Forecasting and Testing of Machinery and Technologies for Agricultural Production named after L. Pohorilyi. Technical and Technological Aspects of Development and Testing of New Machinery and Technologies for Agriculture of Ukraine. 2011. Issue 15(29). P. 486–488.
10. Hrushetskyi S.M., Kyrychenko R.V., Omelianov O.M. Analysis and Prospects of Technological and Design Features of Seeding Machines. Machinery, Energy, Transport in Agro-Industrial Complex. 2022. No. 2 (117). P. 25–33. DOI: 10.37128/2520-6168-2022-2-3.
11. Hevko B.M., Liashuk O.L., Pavelchuk Yu.F., Pryshliak V.M. Technological Foundations of Design and Manufacturing of Seeding Machines: Monograph. Ternopil: Ternopil Ivan Puluj National Technical University, 2014. 238 p.
12. Dumych V., Salo Ya. Research on New Grain Drills by Ukrainian Manufacturers. Technical and Technological Aspects of Development and Testing of New Machinery and Technologies for Agriculture of Ukraine. 2020. Issue 26 (40). P. 162–169.
13. Salo V., Leshchenko S., Luzan P., Salo L. Machines for Sowing, Planting, and Crop Care: Textbook. Kropyvnytskyi: Lysenko V.F., 2022. 220 p.
14. Kyrychenko R.V., Lubchenko Y.V., Kalashnyk V.V. Technological Conditions for Sowing Grain Crops Using Resource-Saving MINI-TILL Technology. Youth and Technical Progress in the Agro-Industrial Complex: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Kharkiv: DBTU. 2023. P. 145–146.
15. Kyrychenko R.V., Burlaka S.A. Ways of Improving Seeder Designs for Precision Farming. Vibrations in Engineering and Technologies. 2023. No. 4 (111). P. 37–46. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-4-6.

Цимбалюк Ю. І.

Національний
лісотехнічний університет
України, м. Львів, Україна

E-mail:

yu.tsymbalyuk@nltu.edu.ua

КІНЕМАТИКА МАЛОГАБАРИТНОЇ ТРЕЛЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ТРАЄКТОРІЄЮ У ВИГЛЯДІ ДУГИ КОЛА

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-26-36-44>

УДК 630*375:[514.85+629.3.012]

Цимбалюк Ю.І. Кінематика малогабаритної трелювальної системи траєкторією у вигляді дуги кола.

Анотація. Дослідження стосується процесу трелювання деревної сировини під час проведення рубок формування та оздоровлення лісових насаджень із застосуванням міні трелювальних засобів, до прикладу, міні скідерів повідкового типу. Вибрано умови трелювання одиничного круглого лісоматеріалу в напівзавантаженому стані в рівнинних умовах. Мета дослідження полягає в математичному описі кінематики кінцевих точок міні трелювальної системи під час її руху траєкторією у вигляді дуги кола. Теоретичне дослідження виконувалося шляхом математичного моделювання з використанням основних положень теоретичної механіки та фізичних особливостей предмету праці. Враховано спосіб трелювання та маневрові можливості трелювального засобу. Математична модель передбачає врахування основних параметрів лісового насадження, зокрема схеми розміщення дерев та їх середнього діаметру у відземковій частині. Результатом виконаного дослідження є отримані рівняння та математичні залежності, які дозволяють будувати траєкторію переміщення кінцевої точки трелювальної системи за умови відомого рівняння траєкторії руху її початкової точки.

Ключові слова: круглий лісоматеріал, міні трелювальна система, трелювальний засіб, міні скідер, кінематика трелювальної системи.

Tsymbalyuk Yu.I. Kinematics of small-sized skidding system with trajectory in form of arc of circle.

Abstract. The study concerns the process of skidding of wood raw materials during felling, formation and rehabilitation of forest stands using mini skidding devices, for example, mini skidders of the leash type. The conditions for skidding of a single round timber in a half-loaded state in flat conditions were selected. The purpose of the study is to mathematically describe the kinematics of the endpoints of the mini skidding system during its movement along a trajectory in the form of an arc of a circle. The theoretical study was carried out by mathematical modeling using the basic principles of theoretical mechanics and the physical characteristics of the subject of work. The skidding method and maneuverability of the skidding device were taken into account. The mathematical model assumes consideration of the main parameters of the forest stand, in particular the layout of trees and their average diameter in the clearing part. The result of the research is the obtained equations and mathematical dependencies, which allow building the trajectory of movement of the end point of the skidding system, provided that the equation of the trajectory of movement of its starting point is known.

Key words: *round timber, mini skidding system, skidding tool, mini skidder, skidding system kinematics.*

Постановка проблеми

Більше половини річних об'ємів лісозаготівлі в Україні приходить на деревину, яка отримується внаслідок виконання заходів з формування і оздоровлення лісових насаджень [1]. При цьому весь комплекс лісосічних робіт приходить виконувати під наметом лісового насадження, включно із трелюванням деревини. Як показують дослідження, під час трелювання круглих лісоматеріалів в лісовому насадженні, відбуваються механічні пошкодження стовбурів дерев, які залишаються на площі. В основному, такі пошкодження наносяться саме задньою частиною вантажу, під час повороту трелювальної системи.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Усвідомлення того, що трелювання деревини спричиняє досить негативний вплив на лісове середовище, актуалізує пошук шляхів мінімізації негативних наслідків зазначеної операції основних лісосічних робіт. Так, зокрема, відбувається заміна потужної трелювальної техніки, трелювальними машинами та агрегатами невеликої потужності, особливо під час освоєння лісових площ з невеликими запасами деревини. Дослідження, які виконуються в цьому напрямку підтверджують вищі показники екологічності у випадку використання міні трелювальної техніки та механізованих трелювальних засобів.

Так, зокрема дослідження [2], стосується перспективи застосування колісного міні-скідера на операції трелювання деревини під час виконання рубки прорідження та відновлювальної рубки. Метою даного дослідження було отримання таких важливих даних як продуктивність, енерговитрати, а також викиди парникових газів під час роботи міні-скідера. Отримані результати показали, що такі механізовані трелювальні засоби, здатні повною мірою замінити, використовувані до цього колісні сільськогосподарські та лісгосподарські трактори, особливо в контексті дрібного лісового господарства. Зокрема, їх перевагою є суттєве зменшення споживання енергії та викидів парникових газів в атмосферу. При цьому встановлена продуктивність колісного міні-скідера, в залежності від виду рубки, коливається в проміжку від 3,2м³/год до 4,95м³/год.

Дослідження [3], також стосується енерговитрат та видів відпрацьованих газів під час виконання механізованих операцій лісосічних робіт. Спектр досліджуваної лісозаготівельної техніки включав як бензиномоторні пили так і техніку із дизельними двигунами. При цьому виконувався аналіз екологічності різних видів пального, включно із біопальним та два типи мастильних олив на мінеральній та рослинній основах. В результаті встановлено, що найбільше шкідливих викидів продукується внаслідок використання дизельного пального екологічного класу 3.

Під час трелювання деревини у вигляді круглих лісоматеріалів певної довжини в лісовому насадженні, зокрема під час виконання рубок із наявністю дерев, які залишаються на площі, відбуваються різні механічні пошкодження стовбурів ростучих дерев. Це в подальшому сприяє розвитку хвороб та часто загибелі дерев. Цій проблематиці присвячена праця [4], де автор досліджує запропоноване обладнання до лебідки, яке дозволяє зменшувати кількість пошкоджених дерев на площі під час трелювання стовбурної деревини. Зокрема, таке обладнання дозволяє скоротити частоту пошкоджень із 50% до 36%.

Пошкодженню дерев, що залишаються на площі, внаслідок виконання лісосічних робіт, стосується і дослідження [5]. Тут ця проблематика піднімається в більш широкому плані. Зокрема, звертається увага, що під час зрізання дерев і їх падінні, також відбуваються механічні пошкодження різної тяжкості, стовбурів залишених на площі дерев в межах 12-14%. У випадку використання гусеничних тракторів для трелювання деревини, цей відсоток зростає до 20%. При цьому відбувається порушення лісових ґрунтів на площі ділянки, що в сумарному обсязі становить 58%, а більш серйозне пошкодження поверхні ґрунту, включно із руйнуванням поверхневого шару, складає 42%. Авторами відмічається, що застосування гусеничної трелювальної техніки, призводить до більшого руйнування як лісового ґрунту так і дерев на площі.

Під час виконання вибірових рубок відбувається пошкодження ростучих на площі дерев не тільки внаслідок зрізання вибраних дерев, але і під час трелювання деревини [6]. Тобто, відбувається так зване вторинне пошкодження дерев. Особливо інтенсивно пошкоджуються дерева, як зазначають автори, обабіч трелювального шляху в місці його повороту. При цьому зазначається, що за меншої інтенсивності рубки, кількість пошкоджених дерев зростає. Авторами запропонована імітаційна модель, що дозволяє планувати трелювальні шляхи на площі лісосіки з метою зменшення пошкодження дерев під час трелювання деревини.

Дослідження [7] стосується пошуку альтернативних технологій трелювання деревини в заміну нинішнього використання гусеничної техніки. Автором пропонується використовувати в приватних лісових господарствах міні трелювальний трактор з гумовими шинами на заміну шкідливим гусеничним трелювальним машинам. Показано, що таке нововведення дозволяє скоротити витрати на трелювання деревини від 30% до 50%. Тобто, в грошовому еквіваленті, витрати зменшилися із 19...47 євро/м³ до 13...23 євро/м³. При середній відстані трелювання в межах 130м. Така заміна трелювальної техніки виявилася корисною як з точки зору навколишнього середовища, так і з точки зору безпеки праці.

Формулювання мети досліджень

У випадку застосування на трелюванні деревини міні скідерів, що вільно переміщуються між деревами в насадженні, наближено, довжина трелювальної системи визначатиметься довжиною лісоматеріалу. Таке припущення впливає з того, що міні скідер майже повністю знаходиться під передньою частиною лісоматеріалу, наприклад, при трелюванні в напів або повністю завантаженому стані. Під час виконання поворотів чи маневрування між деревами, оператор вибирає траєкторію руху для передньої точки міні трелювальної системи, по якій і переміщується механізований трелювальний засіб (міні скідер), до прикладу, повідкового типу. Однак при таких поворотах, оператор не може передбачити траєкторію переміщення її кінцевої точки, якою є задня частина лісоматеріалу що вільно ковзає по опорній поверхні. Якщо довжина лісоматеріалу є значною, то зазвичай його задня частина стикається із стовбурами дерев обабіч вибраної смуги трелювання завдаючи механічних пошкоджень різної тяжкості.

Виходячи із зазначеного, метою даного дослідження є математичне обґрунтування повороту міні трелювальної системи, який найчастіше виконується у вигляді дуги кола з отриманням рівняння, що описує траєкторію кінцевої точки трелювальної системи, яку наближено приймаємо як довжину лісоматеріалу. Це дозволить моделювати кінематику трелювальної системи під час її повороту, враховуючи, зокрема, середню відстань між деревами на площі.

Очевидно, що задачі такого характеру, доцільно розв'язувати із застосуванням математичного апарату та основних законів фізики і теоретичної механіки. Таким чином, міні трелювальну систему розглядатимемо, як нерозтяжний стержень певної довжини, що виконує плоско паралельний рух в прямокутній системі координат. Інерційними силами при цьому нехтуємо. Також, виходимо з того, що рівняння кінематики передньої частини стержня відоме, а задньої частини, що вільно ковзає по площині слід отримати.

Результати досліджень

Якщо вважати, що поворот міні трелювальної системи зазвичай виконується траєкторією у вигляді дуги кола, то слід розглядати два можливих при цьому випадки. Перший випадок, стосується умов повороту за яких радіус дуги кола є більший за загальну довжину трелювальної системи. І відповідно, другий випадок має стосуватися умов, коли загальна довжина трелювальної системи є більша за радіус дуги кола.

Для математичного опису першого випадку, прийmemo, що початкова точка міні трелювальної системи (т. M_1), знаходиться на механізованому трелювальному засобі, що виконує поворот дугою кола (рис. 1):

$$x = l + R \cdot \sin \omega t, \quad y = R - R \cdot \cos \omega t + \frac{d+b_0}{2}, \quad (1)$$

$$\dot{x} = R\omega \cdot \cos \omega t, \quad \dot{y} = R\omega \cdot \sin \omega t, \quad (2)$$

Використовуючи рівняння кінематики круглого лісоматеріалу [8, 9], запишемо:

$$l\dot{\alpha} = R\omega \cdot (\sin \omega t \cdot \cos \alpha - \cos \omega t \cdot \sin \alpha) = R\omega \cdot \sin(\omega t - \alpha) \quad (3)$$

Якщо припустити, що кутова швидкість $\omega = \text{const}$ то можна записати (3) як:

$$l \cdot (\omega t - \alpha) - l\omega = -R\omega \cdot \sin(\omega t - \alpha), \quad (4)$$

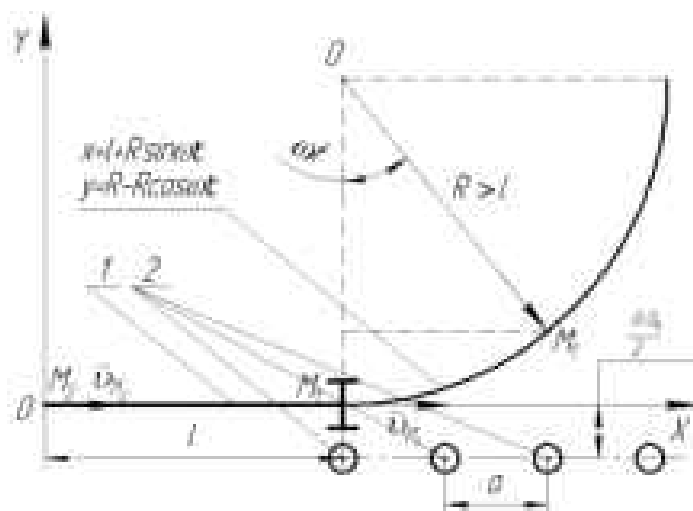


Рис. 1. Розрахункова схема повороту міні трелювальної системи дугою кола для випадку коли $l \leq R$: 1 – міні трелювальна система; 2 – дерева

$$l \cdot (\omega t - \alpha) = \omega R (-\sin(\omega t - \alpha) + \frac{l}{R}). \quad (5)$$

Позначимо $\omega t - \alpha = z$ і виконаємо спрощення:

$$\frac{dz}{n \cdot \sin z} = \frac{\omega R}{l} dt = \frac{\omega}{n} dt \quad (6)$$

В результаті інтегрування рівняння (6) за умови $\frac{l}{R} = n \leq 1$, отримаємо:

$$\frac{1}{\sqrt{1-n^2}} \cdot \ln \frac{n \cdot \operatorname{tg} \frac{z}{2} + 1 - \sqrt{1-n^2}}{n \cdot \operatorname{tg} \frac{z}{2} + 1 + \sqrt{1-n^2}} = \frac{\omega t}{n} + \ln C_3 \quad (7)$$

$$\ln \frac{n \cdot \operatorname{tg} \frac{z}{2} + (1 - \sqrt{1-n^2})}{n \cdot \operatorname{tg} \frac{z}{2} + (1 + \sqrt{1-n^2})} = \frac{\sqrt{1-n^2} \cdot \omega t}{n} + \sqrt{1-n^2} \cdot \ln C_3 \quad (8)$$

Щоб визначити C_3 , приймаємо умову, що $t = 0$; $z = 0$.

$$\ln \frac{1 - \sqrt{1-n^2}}{1 + \sqrt{1-n^2}} = \sqrt{1-n^2} \cdot \ln C_3; \quad (9)$$

$$\ln C_3 = \frac{1}{\sqrt{1-n^2}} \cdot \ln \frac{1 - \sqrt{1-n^2}}{1 + \sqrt{1-n^2}} \quad (10)$$

Тоді рівність (8) можна звести до вигляду:

$$\ln \frac{n \cdot \operatorname{tg} \frac{z}{2} + (1 - \sqrt{1-n^2})}{n \cdot \operatorname{tg} \frac{z}{2} + (1 + \sqrt{1-n^2})} = \ln e^{\frac{\sqrt{1-n^2}}{n} \cdot \omega t} + \ln \frac{1 - \sqrt{1-n^2}}{1 + \sqrt{1-n^2}} \quad (11)$$

Використаємо позначення $\frac{1 - \sqrt{1-n^2}}{1 + \sqrt{1-n^2}} = A$. Тоді із (11), отримаємо:

$$\frac{n \cdot \operatorname{tg} \frac{z}{2} + (1 - \sqrt{1-n^2})}{n \cdot \operatorname{tg} \frac{z}{2} + (1 + \sqrt{1-n^2})} = e^{A \cdot \frac{\sqrt{1-n^2}}{n} \cdot \omega t} \quad (12)$$

Якщо позначити $A \cdot \frac{\sqrt{1-n^2}}{n} \cdot \omega = \gamma$, можна записати:

$$\begin{aligned} n \cdot \operatorname{tg} \frac{z}{2} + (1 - \sqrt{1-n^2}) &= (n \cdot \operatorname{tg} \frac{z}{2} + (1 + \sqrt{1-n^2})) \cdot e^\gamma, \\ n \cdot (e^\gamma - 1) \cdot \operatorname{tg} \frac{z}{2} &= \left[(1 - \sqrt{1-n^2}) - (1 + \sqrt{1-n^2}) \cdot e^\gamma \right] = \\ &= (1 - e^\gamma) - \sqrt{1-n^2} \cdot (1 + e^\gamma) \end{aligned} \quad (13)$$

Звідки

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \frac{z}{2} &= \frac{1}{n \cdot (e^\gamma - 1)} \cdot \left[(1 - e^\gamma) - \sqrt{1-n^2} \cdot (1 + e^\gamma) \right] \\ \operatorname{tg} \frac{z}{2} &= \frac{-1 + \sqrt{1-n^2} \cdot \frac{1 + e^\gamma}{1 - e^\gamma}}{n} \end{aligned}$$

$$z = 2 \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{1-n^2} \cdot \frac{1+e^\gamma}{1-e^\gamma} - 1}{n} = \omega t - \alpha \quad (14)$$

Таким чином, в будь-який момент руху, коли $t \geq 0$ буде:

$$\alpha = \omega t - 2 \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{1-n^2} \cdot \frac{1+e^\gamma}{1-e^\gamma} - 1}{n}, \quad (15)$$

де $\gamma = \frac{\sqrt{1-n^2}}{n} \cdot \frac{1-\sqrt{1-n^2}}{1+\sqrt{1-n^2}} \cdot \omega$, $n = \frac{l}{R} \leq 1$

Використовуючи (15) для умови $n = \frac{l}{R} \leq 1$, та задаючи значення $0 \leq \varphi \leq 2\pi$,

можна отримати відповідні значення кута α , який дозволяє розраховувати координати кінцевої точки M_2 міні трелювальної системи для побудови її траєкторії.

У випадку коли виникає необхідність виконувати поворот міні трелювальної системи траєкторією у вигляді дуги кола, радіус R якої менший довжини l трелювальної системи (рис. 2), то кінематику початкової точки M_1 , можна виразити рівняннями:

$$\begin{cases} x = R \cdot \sin \omega t + x_0, \\ y = R - R \cdot \cos \omega t + \frac{d+b_0}{2}. \end{cases} \quad (16)$$

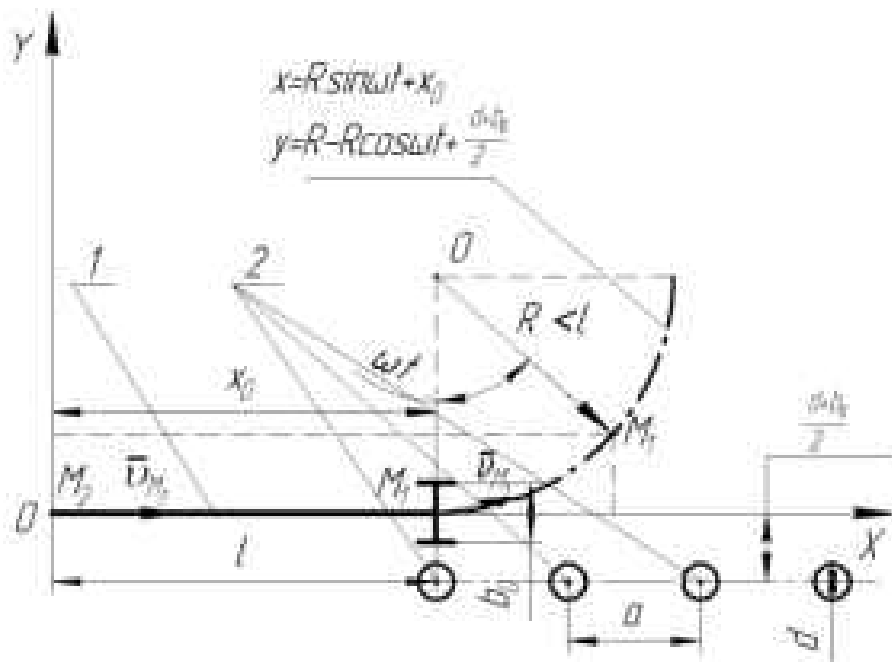


Рис. 2. Розрахункова схема кінематики міні трелювальної системи дугою кола за умови коли $l \geq R$: 1 – міні трелювальна система; 2 – дерева

Відповідно буде:

$$\begin{cases} \dot{x} = R\omega \cdot \cos \omega t, \\ \dot{y} = R\omega \cdot \sin \omega t. \end{cases} \quad (17)$$

Аналогічно, використовуючи отримане рівняння кінематики [8], [9], буде:

$$l\dot{\alpha} = R\omega \cdot \sin(\omega t - \alpha) \quad (18)$$

Позначимо $\omega t - \alpha = z$, і тоді $\dot{\alpha} = \omega - \dot{z}$. Відповідно із (18), отримаємо:

$$l\dot{z} = l\omega - R\omega \cdot \sin z = \omega \cdot (l - R \cdot \sin z), \quad (19)$$

звідки

$$\frac{dz}{l - R \cdot \sin z} = \frac{\omega}{l} dt. \quad (20)$$

Якщо позначити $\frac{R}{l} = k$, то отримаємо

$$\frac{dz}{1 - k \cdot \sin z} = \omega dt. \quad (21)$$

Після інтегрування рівняння (21), можна записати:

$$\frac{2}{\sqrt{1-k^2}} \cdot \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \frac{z}{2} - k}{\sqrt{1-k^2}} = \omega t + C, \quad (22)$$

де $k \leq 1$ відповідно до умови $R \leq l$ (рис. 2)

Сталу інтегрування C , слід знаходити для початкових умов, коли: $t = 0$, $\alpha = 0$, $z = 0$.

$$C = -\frac{2}{\sqrt{1-k^2}} \cdot \operatorname{arctg} \frac{k}{\sqrt{1-k^2}}. \quad (23)$$

Із рівності (22) можна отримати:

$$\operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \frac{z}{2} - k}{\sqrt{1-k^2}} + \operatorname{arctg} \frac{k}{\sqrt{1-k^2}} = \frac{\sqrt{1-k^2} \cdot \omega t}{2}. \quad (24)$$

Після перетворень, рівність набуде такого вигляду:

$$\operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \frac{z}{2} - k}{\sqrt{1-k^2}} + \operatorname{arctg} \frac{k}{\sqrt{1-k^2}} = \operatorname{arctg} \frac{\frac{1}{\sqrt{1-k^2}} \cdot \operatorname{tg} \frac{z}{2}}{\frac{k \cdot (\operatorname{tg} \frac{z}{2} - k)}{1 - \frac{\operatorname{tg}^2 \frac{z}{2}}{(\sqrt{1-k^2})^2}}} = \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{1-k^2} \cdot \operatorname{tg} \frac{z}{2}}{1 - k \cdot \operatorname{tg} \frac{z}{2}}, \quad (25)$$

Обговорення

Із рівності (24):

$$\operatorname{arctg} \frac{\sqrt{1-k^2} \cdot \operatorname{tg} \frac{z}{2}}{1 - k \cdot \operatorname{tg} \frac{z}{2}} = \frac{\sqrt{1-k^2} \cdot \omega t}{2}, \quad (26)$$

Звідки

$$\frac{\sqrt{1-k^2} \cdot \operatorname{tg} \frac{z}{2}}{1-k \cdot \operatorname{tg} \frac{z}{2}} = \operatorname{tg} \frac{\sqrt{1-k^2} \cdot \omega t}{2}, \quad (27)$$

і тоді

$$\operatorname{tg} \frac{z}{2} = \frac{\operatorname{tg} \frac{\sqrt{1-k^2} \cdot \omega t}{2}}{\sqrt{1-k^2} + k \cdot \operatorname{tg} \frac{\sqrt{1-k^2} \cdot \omega t}{2}} = \frac{1}{k} \cdot \frac{\operatorname{tg} \frac{\sqrt{1-k^2} \cdot \omega t}{2}}{\sqrt{\frac{1-k^2}{k^2} + \operatorname{tg} \frac{\sqrt{1-k^2} \cdot \omega t}{2}}}. \quad (28)$$

Для даного випадку, коли $l \geq R$, слід зазначити, що вихід міні трелювальної системи з колової траєкторії на прямолінійну, потрібно виконувати в точці де дотична до колової дуги, складатиме з віссю OX кут β для якого $\operatorname{tg} \beta = \frac{\dot{y}}{\dot{x}} = \operatorname{tg} \omega t = \operatorname{tg} \varphi$, а отже $\beta = \varphi$. При цьому, координати точки виходу на прямолінійну траєкторію, виражатимуться: $x = R \cdot \sin \varphi + x_0$, $y = R \cdot (1 - \cos \varphi) + \frac{d+b_0}{2}$.

Висновки

1. Отримані в даному дослідження математичні залежності, дозволяють будувати траєкторії кінематики крайніх точок міні трелювальної системи під час її повороту кривою у вигляді дуги кола;
2. Коли переміщення міні трелювальної системи відбувається дугою кола за умови $R \leq l$, то максимальний кут дуги повороту складатиме 90° ; якщо кут повороту матиме більше 90° , переміщення кінцевої точки міні трелювальної системи відбуватиметься не по дузі, а відповідно і подальший рух по такій коловій дузі буде неможливий;
3. Кінематику коловою дугою за умови $l = R$ не розглядається через відсутність стабілізації процесу.

Список використаних джерел

1. Державний комітет лісового господарства України. Лісове господарство України. К.: «Видавничий дім «ЕКО – інформ», 2010. 64с.
2. Dinko Vusić, Marijan Šušnjar, Enrico Marchi, Raffaello Spina, Željko Zečić, Rodolfo Picchio. Skidding operations in thinning and shelterwood cut of mixed stands – Work productivity, energy inputs and emissions. *Ekological Engineering*. Volume 61, Part A, December 2013, Pages 216-223. <https://doi.org/10.1016/j.2013.09.052>
3. Dimitris Athanassiadis. Energy consumption and exhaust emissions in mechanized timber harvesting operations in Sweden. *Science of the Total Environment*. Volume 225, Issues 1-3, 8 June 2000, Pages 135-143. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00463-0](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00463-0)
4. Rodolfo Picchio, Natascia Magagnotti, Alessandro Sirna, Raffaele Spinelli. Improved winching technique to reduce logging damage. *Ekological Engineering*. Volume 47, October 2012, Pages 83-86. <https://doi.org/10.1016/j.2012.06.037>
5. Raffaele Spinelli, Natascia Magagnotti, Carla Nati. Benchmarking the impact of traditional small-scale logging systems used in Mediterranean forestry. *Forest Ecology and*

Management. Volume 260, Issues 11, 15 November 2010, Pages 1997-2001. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.08.048>

6. R.E. Gullison, J.J. Hardner. The effects of road design and harvest intensity on forest damage caused by selective logging: empirical results and a simulation model from the Bosque Chimanes, Bolivia. *Forest Ecology and Management*. Volume 59, Issues 1-2, June 1993, Pages 1-14. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(93\)90067-W](https://doi.org/10.1016/0378-1127(93)90067-W)

7. Raffaella Spinelli, Natascia Magagnotti, Rub. An alternative skidding technology to the current use of crawler tractors in Alpine logging operations. *Journal of Cleaner Production*. Volume 31, August 2012, Pages 73-79. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.02.033>

8. Цимбалюк Ю. І. Математичне обґрунтування процесу транспортування круглого лісоматеріалу під наметом лісу. Науковий вісник НЛТУ України: зб. наук.-техн. праць. Львів: РВВ НЛТУ України, 2009. Вип. 19.5 С. 288–296.

9. Цимбалюк Ю. І., Думанський О. І. Чисельна реалізація математичної моделі транспортування круглого лісоматеріалу під наметом лісу. Науковий вісник НЛТУ України: зб. наук.-техн. праць. Львів: РВВ НЛТУ України, 2011. Вип. 21.18. С. 305–310.

References

1. State Committee of Forestry of Ukraine. *Forestry of Ukraine*. Kyiv: "Publishing House "EKO – Inform", 2010. 64p.

2./Dinko Vusić, Marijan Šušnjar, Enrico Marchi, Raffaello Spina, Željko Zečić, Rodolfo Picchio. Skidding operations in thinning and shelterwood cut of mixed stands – Work productivity, energy inputs and emissions. *Ekological Engineering*. Volume 61, Part A, December 2013, Pages 216-223. <https://doi.org/10.1016/j.2013.09.052>

3. Dimitris Athanassiadis. Energy consumption and exhaust emissions in mechanized timber harvesting operations in Sweden. *Science of the Total Environment*. Volume 225, Issues 1-3, 8 June 2000, Pages 135-143. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00463-0](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00463-0)

4. Rodolfo Picchio, Natascia Magagnotti, Alessandro Sirna, Raffaella Spinelli. Improved winching technique to reduce logging damage. *Ekological Engineering*. Volume 47, October 2012, Pages 83-86. <https://doi.org/10.1016/j.2012.06.037>

5. Raffaella Spinelli, Natascia Magagnotti, Carla Nati. Benchmarking the impact of traditional small-scale logging systems used in Mediterranean forestry. *Forest Ecology and Management*. Volume 260, Issues 11, 15 November 2010, Pages 1997-2001. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.08.048>

6. R.E. Gullison, J.J. Hardner. The effects of road design and harvest intensity on forest damage caused by selective logging: empirical results and a simulation model from the Bosque Chimanes, Bolivia. *Forest Ecology and Management*. Volume 59, Issues 1-2, June 1993, Pages 1-14. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(93\)90067-W](https://doi.org/10.1016/0378-1127(93)90067-W)

7. Raffaella Spinelli, Natascia Magagnotti, Rub. An alternative skidding technology to the current use of crawler tractors in Alpine logging operations. *Journal of Cleaner Production*. Volume 31, August 2012, Pages 73-79. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.02.033>

8. Ju.I. Tsybalyuk. Mathematical substantiation of round wood transporting process under the flouts canopy. *Scientific Bulletin of the NLTU of Ukraine: Collection of Scientific and Technical Works*. Lviv: RVV NUFWT of Ukraine, L'viv, 2009. Issue 19.5. Pp. 288–296.

9. Ju.I. Tsybalyuk, O.I. Dumansky Numerical computation of mathematical model of logging of round wood under canopy of the trees. *Scientific Bulletin of the NLTU of Ukraine: Collection of Scientific and Technical Works*. Lviv: RVV NUFWT of Ukraine, L'viv, 2011. Issue 21.18. Pp. 305–310.

Сиромятников Ю. М.,
Сиромятніков П. С.,
Харченко О. М.,
Бєлих О. В.

Державний
біотехнологічний
університет, м. Харків,
Україна
E-mail:
Gara176@btu.kharkov.ua
Ukridu@gmail.com
bdzhoiyarukraine@gmail.com
sashafincol@gmail.com

**ОГЛЯД СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ
ДО ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ
ВИТОПЛЕННЯ БДЖОЛИНОГО ВОСКУ:
ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ТА ІНЖЕНЕРНІ
ПЕРСПЕКТИВИ**

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-26-45-88>

УДК 631.3:636:620.9

Сиромятников Ю.М., Сиромятніков П.С., Харченко О.М., Бєлих О.В. Огляд сучасних підходів до вдосконалення технологій витоплення бджолиного воску: технічні рішення та інженерні перспективи.

Анотація. У статті представлено систематизований огляд сучасних технологій витоплення бджолиного воску з акцентом на конструктивні особливості обладнання, інженерні інновації та енергетичну ефективність. Розглянуто класифікацію традиційних і промислових методів витоплення воску, детально описано технічні рішення щодо модернізації парових, відцентрових і комбінованих установок. Проаналізовано новітні підходи до очищення воску, його застосування в енергетиці, інженерії та агропромисловому виробництві. Значну увагу приділено соціально-економічним аспектам впровадження нових технологій у практику бджільництва, кластерній моделі переробки сировини, підготовці кваліфікованих кадрів і розвитку інженерно-освітніх програм. Наведено графічні моделі й аналітичні таблиці з кількісними показниками ефективності технічних рішень. Отримані результати демонструють перспективність технічної модернізації як засобу підвищення продуктивності, зменшення втрат воску та формування нової інфраструктури для сталого розвитку бджільництва.

Ключові слова: бджолиний віск, витоплення, парова воскотопка, відцентрова установка, очищення, енергетика, інженерні рішення, кластерна модель, механізація пасіки.

Syromyatnikov Yu.M., Syromiatnikov P.S., Kharchenko O. M., Bielykh O.V. Review of modern approaches to improving beeswax melting technologies: technical solutions and engineering perspectives.

Abstract. The article presents a systematic review of modern technologies for beeswax extraction with a focus on equipment design, engineering innovations, and energy efficiency. The classification of traditional and industrial methods of wax melting is provided, and technical solutions for the modernization of steam, centrifugal, and combined units are described in detail. Novel approaches to beeswax purification, as well as its applications in energy, engineering, and agri-industrial production, are thoroughly analyzed. Special

attention is given to the socio-economic aspects of technology implementation in beekeeping practices, including the cluster model of raw material processing, training of qualified personnel, and the development of engineering and educational programs. Graphical models and analytical tables are provided to illustrate the efficiency indicators of various technical solutions. The results demonstrate the high potential of technical modernization as a means to increase productivity, reduce wax losses, and create new infrastructure for the sustainable development of beekeeping.

Key words: beeswax, wax extraction, steam wax melter, centrifugal unit, purification, energy applications, engineering solutions, cluster model, beekeeping mechanization.

Постановка проблеми

Бджолиний віск є одним із найцінніших побічних продуктів галузі бджільництва, що знаходить застосування у виробництві вошини, косметичних препаратів, харчових пакувальних матеріалів, фармацевтичних форм, технічних мастил, матеріалів для 3D-друку, а також у системах зберігання теплової енергії на основі фазових переходів. Водночас процеси його отримання і переробки на більшості пасік досі базуються на малопродуктивних, морально застарілих або недостатньо адаптованих технологіях. Це зумовлює істотні втрати воскової сировини, підвищене енергоспоживання, нестабільну якість готового продукту та ризики мікробіологічного забруднення.

Згідно з сучасними дослідженнями, при використанні традиційних методів витоплення (варіння, сонячні воскотопки) втрати воску можуть досягати 25–30%, а частка домішок у готовому продукті перевищує 10%. Такі показники суттєво знижують економічну рентабельність пасіки, унеможливають повторне використання воску для виготовлення вошини й обмежують перспективи його застосування в промисловості. На цьому тлі зростає потреба в технічній модернізації обладнання для переробки воскової сировини та впровадженні інженерних рішень, що враховують вимоги до енергоефективності, санітарних стандартів і масштабованості.

Окрім технічних аспектів, актуальними є також питання організації переробки воску в умовах кооперації, адаптації обладнання до потреб малих господарств, а також підготовки фахівців, здатних обслуговувати й удосконалювати технологічні системи. Брак стандартних рішень, а також обмежена кількість навчальних програм з інженерії бджільництва посилює розрив між науковими розробками і практичними потребами виробників.

Таким чином, актуальність дослідження обумовлена необхідністю всебічного аналізу сучасних методів витоплення воску, визначення конструктивних і теплотехнічних переваг модернізованого обладнання, оцінки ефективності технологій очищення та обґрунтування перспектив їх впровадження в контексті технічної, економічної та освітньої трансформації бджільництва.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Проблематика переробки бджолиного воску дедалі активніше розглядається у наукових колах, що пов'язано зі зростанням потреби в ефективному та екологічно безпечному використанні біологічної сировини. Серед пріоритетних напрямів досліджень – удосконалення процесів екстракції та очищення воску, розробка енергоощадних установок для його витоплення, створення нових матеріалів на основі воскових сполук.

Одним із важливих напрямів сучасної переробки бджолиного воску є отримання біологічно активних компонентів, зокрема полікозанолів – суміші високомолекулярних первинних спиртів, які проявляють фармакологічну активність. У дослідженні Venturelli et al. [1] запропоновано інноваційну стратегію їх екстракції із застосуванням мікрохвильової активації. Перевагою цього методу є здатність забезпечити швидко і контрольоване нагрівання, що скорочує тривалість процесу, зменшує теплові втрати й забезпечує збереження хімічної стабільності цільових сполук. Автори відзначають високу ефективність цього підходу для фармацевтичного та косметичного застосування, оскільки отримані полікозанолі мають високу біоактивність і чистоту. Цей підхід демонструє потенціал використання інноваційної техніки для глибокої переробки воскової сировини з метою створення цінних функціональних інгредієнтів.

Питання фізико-хімічного аналізу та стандартизації бджолиного воску було предметом дослідження Naik і Pargunde [2], які провели комплексну оцінку зразків воску, зібраних на ринку Мумбаї (Індія), що знаходиться поблизу природних осередків Західних Гат. У роботі підкреслено значення стандартних показників, таких як температура плавлення, кислотне та ефірне число, щільність, вміст домішок, колір і запах. Автори наголосили на важливості уніфікації методів оцінювання якості воску для забезпечення його придатності до подальшої промислової переробки. Було відзначено варіативність властивостей залежно від регіону, флористичного складу нектароносів та умов збору, що потребує врахування в стандартизації процесів обробки.

Дослідження безпечності воску з огляду на вміст агрохімікатів продовжує залишатися на передньому плані. У нещодавній публікації Mu et al. [3] було застосовано технологію екстракції з використанням глибоких евтектичних розчинників у поєднанні з високоефективною рідинною хроматографією UHPLC-MS/MS для одночасного виявлення кількох неонікотинοїдних пестицидів у зразках воску. Ця методика дозволяє досягати високої точності, чутливості й відтворюваності аналізу, що має ключове значення для забезпечення безпечного використання воску в харчових і фармацевтичних цілях. Автори вказують на широкі перспективи впровадження подібних підходів у лабораторний контроль якості воскової сировини, особливо у країнах з активним аграрним виробництвом.

Іншою цікавою технічною розробкою є використання бджолиного воску в мікрофлюїдних системах, як це описано у роботі Nunut, Whulanza та Kassegne [4]. У дослідженні випробувано методику друку воскових структур для створення паперових мікрофлюїдних платформ, що мають застосування у біомедичних діагностичних системах. Таке застосування відкриває нові перспективи для використання воску у високотехнологічному машинобудуванні – зокрема, як функціонального матеріалу з термо- та гідрофобними властивостями.

У контексті медико-біологічних досліджень заслуговує уваги робота Cho et al. [5], у якій досліджено вплив тривалого споживання спиртів бджолиного воску (Beeswax Alcohol, Raydel®) на метаболічні порушення у гіперліпідемічних зебрафішах. Результати показали значне покращення ліпідного профілю, зниження окисного стресу та зменшення ушкодження органів. Це свідчить про потенціал воскових фракцій як функціональних добавок у дієтичному харчуванні, а також демонструє нові біомедичні горизонти використання компонентів бджолиного воску.

Продовжуючи вивчення фізико-хімічних властивостей воскової сировини, Shegaw [6] у своєму дослідженні проаналізував зразки воску, зібрані в районах Kafa Zone, Ефіопія. Було виявлено істотну варіабельність таких параметрів, як вміст вологи, щільність, кислотне число та температура плавлення, залежно від місця збору. Автор акцентував увагу на необхідності стандартизації методик відбору, очищення та

зберігання воску. Результати мають практичну цінність для покращення системи контролю якості в країнах, що розвиваються, де значна частка воску виробляється у кустарних умовах.

Потенціал бджолиного воску як інженерного матеріалу знайшов підтвердження у дослідженні Naderizadeh et al. [7], де описано створення надгідрофобного покриття на основі емульсій «віск-вода». Автори довели, що такі матеріали не лише виявляють водовідштовхувальні властивості, але й здатні акумулювати приховану теплоту завдяки фазовим переходам у структурі воску. Такий підхід відкриває нові горизонти у сфері енергозберігаючих технологій та теплоізоляційних покриттів для будівельної та авіаційної галузі. Воскові емульсії можуть слугувати дешевою та біосумісною альтернативою синтетичним полімерам у виробництві інтелектуальних покриттів.

У контексті антимікробних властивостей бджолиного воску Felicioli et al. [8] дослідили етилові екстракти органічного воску підвиду *Apis mellifera ligustica*. Було виявлено, що воскові витяжки мають виражену антибактеріальну активність проти низки патогенних штамів, таких як *Staphylococcus aureus* і *Escherichia coli*. Крім того, вивчено леткі сполуки, присутні у воску, що свідчить про його потенціал як натурального консерванту для харчових продуктів. Дослідження підкреслює перспективність використання воску не лише як технічної сировини, а й як біологічно активного агента у фармацевтичній та харчовій промисловості.

У публікації Giampieri et al. [9] розглянуто побічні продукти переробки воску як потенційне джерело біологічно активних речовин. Автори виявили, що залишкові фракції воску містять широкий спектр флавоноїдів, фенольних кислот, стеролів та інших вторинних метаболітів із антиоксидантними властивостями. Такий підхід дозволяє розширити економічну доцільність процесу воскової переробки за рахунок повного використання сировини, що особливо важливо для кластерних переробних підприємств, орієнтованих на безвідходне виробництво. Крім того, дослідження доводить, що воскова сировина може бути не лише технічним ресурсом, але й джерелом високододаної вартості для біомедичних застосувань.

Останнє у цьому блоці дослідження – публікація Hakim et al. [10], яка присвячена впливу лецитину на властивості воскового покриття. Автори показали, що додавання лецитину, виділеного з рослинних олій, сприяє покращенню емульгуючих властивостей воскової маси, що особливо важливо для створення харчових і упаковкових покриттів. Було також встановлено, що подібні композиції краще прилягають до поверхонь, мають покращену термостабільність і знижують втрати вологи з продуктів. Такі результати є особливо актуальними в контексті розробки біорозкладних упаковок із харчовим допуском, що набувають все більшого поширення.

Із розширенням практики локального виробництва воску важливим є вивчення його якості залежно від способу вилучення. У статті, опублікованій в *World Journal of Food Science and Technology* [11], розглянуто демонстраційні заходи з використання технологій сирої екстракції бджолиного воску в окрузі Ілу Гелан (Оромія, Ефіопія). Виявлено, що місцеві методи, попри низьку собівартість, часто супроводжуються значними втратами воску через відсутність фільтрації, недостатню температурну обробку та неконтрольоване охолодження. Автори підкреслюють важливість запровадження елементарної технічної підготовки пасічників щодо основ термічного балансу, фільтрації та зберігання, що здатне значно підвищити вихід і якість продукції без кардинальної модернізації.

Поглиблений аналіз якості воску відповідно до джерела походження та способу очищення було проведено Meseret [12]. Дослідження базувалося на порівнянні зразків воску з різних регіонів та методів його витоплення (сонячні, парові, водяні установки). Результати показали, що парові воскотопки забезпечують найменший рівень домішок,

нижчий показник кислотного числа та кращу термічну стабільність воску. Окрему увагу було приділено впливу повторного використання сировини, зокрема мерви, на кінцеві властивості продукту. Автор рекомендує використовувати паровий метод як пріоритетний у регіонах, де доступ до енергоресурсів обмежений, але можлива проста модернізація обладнання.

У дослідженні Schaeffer et al. [13] зроблено спробу комплексного оцінювання рівня забруднення воску залишками пестицидів та інших ксенобіотиків. За допомогою високоефективної хроматографії було проаналізовано зразки воску з різних країн Європи. Виявлено, що навіть після переробки та очищення значна частка воску зберігає сліди неонікотиніоїдів, антрацену та фталатів. Автори роблять висновок про необхідність розробки стандартизованих протоколів глибокого очищення воску, особливо при його подальшому використанні в харчових або фармацевтичних продуктах. Запропоновано комбіноване застосування фільтрації, сорбентів і багатоетапної термічної обробки.

Ще одне актуальне дослідження представлено Tu et al. [14], які запропонували нову методику визначення бісфенолів у бджолиному воску на основі методу «sugaring-out assisted liquid-liquid extraction». Цей підхід дозволяє швидко й ефективно екстрагувати гідрофобні забруднювачі з воску з мінімальним використанням органічних розчинників. Метод має потенціал для впровадження в рутинний лабораторний контроль, оскільки поєднує високу селективність, короткий час обробки та відносну дешевизну реагентів. Дослідники наголошують на необхідності впровадження подібних методик на рівні лабораторій ветеринарної та санітарної експертизи для захисту споживача.

І на завершення цього блоку варто згадати дослідження Tran et al. [15], де вивчався вплив способів варіння та положення стільників у вулику на фізико-хімічні властивості отриманого воску. У результаті дослідження встановлено, що воскова сировина з нижніх частин стільників має вищу щільність, темніший колір і більше включень домішок. Водночас оптимізація режимів варіння (температури, тривалості та кількості води) дозволяє досягти кращого виходу воску з високими показниками чистоти. Отримані результати рекомендовано враховувати при моделюванні технологічних схем переробки воскової сировини.

У рамках системного підходу до організації виробництва, дослідження Shegaw та Edimew [16] охопило не лише технологічні, але й економічні та маркетингові аспекти обробки бджолиного воску в зоні Kafa (Ефіопія). Автори підкреслили існування значного розриву між обсягами виробництва та реальним використанням воску на внутрішньому ринку. Основною причиною є відсутність обладнання для якісного очищення, слабка кооперація між пасічниками та низький рівень технічної обізнаності. Запропоновано створення об'єднаних переробних пунктів із використанням централізованих парових установок і базових систем фільтрації. Такий підхід дозволяє не лише підвищити якість воску, але й покращити загальну економічну ефективність галузі.

Цікавим є дослідження Špaldoňová et al. [17], в якому порівнюються методи визначення домішок у воску, зокрема парафіну, із застосуванням різних аналітичних підходів – газової хроматографії з мас-спектрометрією (GC/MS), Фур'є-інфрачервоної спектроскопії з відбитим випромінюванням (FTIR-ATR) та спектроскопії Рамана. Результати показали, що FTIR та Raman забезпечують швидко та неdestructивну ідентифікацію парафіну, в той час як GC/MS дозволяє підтвердити кількісний вміст. Така багаторівнева методика є особливо корисною для контролю автентичності воску в умовах масової фальсифікації, яка є характерною проблемою світового ринку.

Щодо інженерних підходів до створення функціональних матеріалів на основі воску, варто відзначити роботу Brito-Pereira et al. [18], де розроблено багатофункціональні композити з воску з термозціплювальними властивостями та можливістю повторного використання. В основі інноваційного матеріалу – поєднання бджолиного воску з полімерними матрицями, які забезпечують гнучкість, міцність і стабільність. Компоненти композиту здатні регенерувати свою структуру після незначних пошкоджень під дією тепла. Ці матеріали мають потенційне застосування в біомедичних імплантатах, екологічному пакуванні та смарт-матеріалах.

Окрему увагу в літературі приділено методам очищення воску від пестицидних залишків. У статті Calatayud-Vernich et al. [19] досліджено очищення воску шляхом екстракції органічними розчинниками з наступною фільтрацією. Метод продемонстрував високу ефективність у видаленні залишків неонікотиноїдів та хлорорганічних сполук. Основною перевагою є відносна простота технологічної реалізації – процес не потребує складного обладнання, що робить його доступним для кооперативних пасічних господарств. Разом із тим, автори застерігають про необхідність регламентованого поводження з розчинниками з екологічної точки зору.

У пілотному дослідженні Luna et al. [20] було реалізовано промислову методику очищення бджолиного воску від пестицидів за допомогою екстракції метанолом. Особливістю цього підходу є масштабування до рівня середніх виробничих потужностей, що дозволило оцінити не лише ефективність видалення забруднень, але й витрати ресурсів, цикл обробки та повторне використання розчинника. Було доведено, що якість очищеного воску відповідає вимогам до харчового використання. Розробка відкриває можливість централізованого очищення воску в рамках кластерних моделей з повторною сертифікацією готового продукту.

Продовжуючи тему регіональних підходів до удосконалення технологій, Biyena [21] у своєму дослідженні докладно описує практичні результати демонстраційної апробації сирової технології екстракції бджолиного воску в районі Ілу Гелан (Ефіопія). Було здійснено порівняння між традиційними методами витоплення (в основному ручне варіння) та адаптованими паровими установками місцевого виробництва. Аналіз засвідчив, що модернізовані пристрої не тільки зменшують втрати сировини, але й дозволяють отримати чистіший продукт. Особливо підкреслено позитивний ефект від зменшення енергоспоживання та підвищення ергономіки праці. Автор пропонує запровадження програми з розповсюдження таких пристроїв у межах державних програм підтримки пасіництва.

Робота Hosseini, Mousavi і McClements [22] присвячена створенню супергідрофобних плівок і покриттів на основі бджолиного воску для зберігання фруктів. У ході дослідження автори синтезували багатошарові покриття шляхом нанесення воску у поєднанні з натуральними полімерними компонентами. Було встановлено, що такі плівки здатні ефективно знижувати втрату вологи, уповільнювати дихання плодів і запобігати мікробіологічному псуванню. Покриття виявились не лише екологічно чистими, а й економічно доцільними для широкого застосування в післязбиральній обробці фруктової продукції, що робить їх актуальними для аграрних господарств із розвиненою системою зберігання.

Особливу увагу в роботі Kryński та Kowaluk [24] приділено застосуванню бджолиного воску як гідрофобізуючої добавки в деревинно-волокнистих плитах (MDF). Автори показали, що додавання навіть невеликої кількості воску дозволяє суттєво покращити вологостійкість матеріалу, зменшити деформацію при коливаннях температури й вологості, а також підвищити термічну стабільність кінцевого продукту. Методика обробки поверхні MDF-плит воском розглядається як доступна альтернатива

дорогим синтетичним полімерним покриттям, з перевагами в плані екологічності, біодеградації та вартості.

Gupta і Anjali [25] у своїй публікації здійснили огляд властивостей, складу, потенційного фальсифікування та терапевтичного значення бджолиного воску. Було показано, що натуральний віск відзначається унікальними реологічними характеристиками, високою біосумісністю та низькою алергенністю, що робить його перспективним компонентом у фармакології та косметології. Автори наголошують, що незважаючи на високу цінність натурального продукту, практика фальсифікації воску парафіном або іншими добавками є широко розповсюдженою. У цьому контексті особливо актуальними є методи автентифікації, включаючи спектроскопію, хроматографію й аналіз ізотопного складу.

Ще одним цікавим прикладом технічного застосування бджолиного воску є розробка твердих чорнил для сенсорних систем, описана Moreira et al. [26]. У статті представлено композити на основі бджолиного воску, графіту та графену, які використовуються для друку на паперових сенсорах, призначених для визначення галактози. Отримані матеріали виявилися термостабільними, з доброю провідністю та сумісними з біоаналітичними методами. Віск у цій системі відіграє роль формуютьовувального компонента, що дозволяє створювати мікроструктури з високою роздільною здатністю. Такий підхід відкриває нові горизонти використання воску в галузі біосенсорики, гнучкої електроніки та «лабораторій на чипі».

У продовження досліджень, пов'язаних із застосуванням бджолиного воску в сенсорних технологіях, Moreira et al. [26] представили новітні тверді чорнила, створені на основі комбінації бджолиного воску, графіту та графену. Ці чорнила використовувались для нанесення на паперові платформи, що слугували основою для сенсорів визначення галактози. Завдяки високій термостійкості та електропровідності композиту, автори досягли значної стабільності сигналу, що має важливе значення для медичної діагностики та контролю харчових продуктів. Віск у цьому контексті виконує не лише функцію матриці, а й покращує адгезію та еластичність шару, що забезпечує довговічність пристрою. Такі розробки є кроком до створення дешевих та екологічних біосенсорів нового покоління.

Tran et al. [27] дослідили фізико-хімічні властивості бджолиного воску залежно від методу його термічної обробки та положення вуликових стільників, з яких він був зібраний. Автори провели експерименти з різними температурними режимами варіння й визначили, що воскова сировина, зібрана з нижніх ярусів стільників, має тенденцію до підвищеного вмісту домішок, більшої щільності й темнішого кольору. Рекомендовано використовувати багатоступеневе фільтрування й сортування воску до витоПЛення, що дозволить отримувати продукт вищої якості. Встановлено, що контрольована термообробка з попереднім очищенням позитивно впливає на структурні властивості воску, зокрема – зменшує вміст золи та покращує гомогенність плавлення.

У дослідженні Al-Rajhi, El Serey і Elsheikha [28] представлено інженерне рішення щодо використання сонячної енергії для розплавлення бджолиного воску. Конструкція установки включає параболический концентратор, що фокусує сонячне випромінювання на резервуар з восковою сировиною. Результати показали, що цей метод є ефективним у регіонах з високою інсоляцією, дозволяючи уникнути використання традиційних енергоносіїв. Перевагами технології є повна автономність, екологічність і низькі експлуатаційні витрати. Автори відзначають, що система може бути адаптована для використання як у польових умовах, так і для стаціонарних пасічних господарств, зокрема в рамках малих кооперативів.

У великому огляді Luo et al. [29] наведено сучасні технології переробки продуктів бджільництва, включаючи віск. Автори детально описали стадії підготовки, очищення, фільтрації, термообробки та формування блоків воску. Особливу увагу приділено новим розробкам у галузі вакуумного плавлення, фільтрації за допомогою активованого вугілля та мембранних технологій. Дослідники також підкреслюють важливість впровадження автоматизованих систем для великих виробництв, де контроль температури та часу є критичними для досягнення високої якості кінцевого продукту. Стаття містить порівняльний аналіз методів за критеріями ефективності, енергоємності та відповідності харчовим стандартам.

Цікавий приклад впровадження бджолиного воску у складні харчові системи продемонстровано Zhang et al. [30], які розробили нову гелеву емульсію на основі овалбуміну, де структура олійної фази була модифікована додаванням воску. Метою було покращення стабільності та функціональних властивостей харчової емульсії, зокрема – при виробництві біоактивних добавок. Автори довели, що віск сприяє стабілізації мікроструктури емульсії, підвищує в'язкість та сприяє рівномірному розподілу активних речовин. Такий підхід може бути використаний при розробці нових харчових продуктів зі спрямованими функціональними властивостями – зокрема в галузі спортивного харчування або функціональних десертів.

Tu et al. [31] продовжили розробку високочутливих методів детекції забруднень у бджолиному воску, сконцентрувавшись на визначенні бісфенолів – органічних сполук, які мають естрогеноподібну активність і широко використовуються в пластиковій промисловості. Методика, запропонована авторами, базується на рідинно-рідинній екстракції з ефектом “випадиння цукру” (sugaring-out-assisted LLE), що значно знижує потребу в органічних розчинниках і дозволяє ізолювати мікродомішки з високою селективністю. Воскі, забруднені бісфенолами, можуть бути потенційно небезпечними при використанні у фармацевтиці, косметології та харчових пакуваннях. Це дослідження підкреслює важливість інтеграції сучасних аналітичних процедур до нормативної практики контролю якості воску.

Sousa et al. [32] дослідили нову галузь використання бджолиного воску – у дорожньому будівництві як добавки до асфальтових сумішей. Автори довели, що введення невеликих кількостей воску в технологію виготовлення теплового асфальту (warm-mix asphalt) покращує його оброблюваність, підвищує пластичність і сприяє зменшенню енергоспоживання під час укладки. Такий підхід дозволяє знизити температуру змішування до 110–130 °C без погіршення експлуатаційних властивостей. Використання натурального воску також сприяє поліпшенню екологічних показників технології, знижуючи викиди парникових газів.

Mahottamananda et al. [33] запропонували унікальне технічне рішення – використання бджолиного воску в якості компонента твердого палива для гібридних ракетних двигунів. У роботі представлено композити на основі воску, етиленвінілацетату (EVA) та активованого вугілля. Експериментальні дані підтвердили, що така композиція має високу калорійність, низьку токсичність продуктів згоряння та стабільність горіння. Це відкриває перспективи для створення екологічно безпечних енергоносіїв з використанням біоматеріалів. Таким чином, бджолиний віск, окрім традиційних сфер, виявляє потенціал у високотехнологічному машинобудуванні та оборонній промисловості.

Важливий внесок у сферу ветеринарного контролю зроблено Gajda et al. [34], які розробили та валідували метод визначення залишків тетрациклінів у воску за допомогою рідинної хроматографії з тандемною мас-спектрометрією (LC-MS/MS). Метод дозволяє виявляти сліди антибіотиків на рівні нанограм на грам, що особливо актуально в умовах поширеного використання ветеринарних препаратів у

бджільництві. Виявлені концентрації навіть після очищення воску свідчать про необхідність удосконалення процесів екстракції та впровадження стандартизованого моніторингу для забезпечення харчової безпеки продукції.

Jawad et al. [35] у своїй статті розглянули антикорозійні властивості бджолиного воску в системах гальмівних рідин. Дослідники створили захисне покриття на основі натурального воску, яке дозволяло зменшити контакт металевих елементів з вологим середовищем. Було виявлено, що такий шар знижує швидкість корозії, забезпечує додаткову термостабільність і не вступає в хімічну взаємодію з робочими рідинами. Цей підхід може знайти застосування в автомобілебудуванні, зокрема в частинах гальмівних систем, де потрібна біосумісність, нетоксичність і водночас – ефективний захист від окислення.

У дослідженні Abdulmunem et al. [36] було розглянуто можливість використання бджолиного воску як фази зберігання теплової енергії в системах сонячного обігріву. Експериментальна установка включала повітряний сонячний колектор, у якому віск використовувався як акумулятор тепла. Було встановлено, що завдяки високій теплоємності та стабільності при температурах 60–80 °C, бджолиний віск здатен ефективно зберігати й віддавати тепло впродовж тривалого часу. Такі матеріали можуть використовуватись у пасивному опаленні приміщень, теплицях, сушильних агрегатах, а також у побутових геліосистемах з акцентом на екологічність та поновлюваність ресурсів.

Дослідження Belgasem et al. [37] спрямоване на вдосконалення властивостей композиційних фазо-змінних матеріалів (PCM) на основі бджолиного воску шляхом його поєднання з синтетичними компонентами. Було продемонстровано, що змішування воску з парафінами, стеариною або полімерами дозволяє розширити температурний інтервал фазового переходу та підвищити енергоакуючу здатність. Застосування таких PCM рекомендовано для акумуляторів тепла в будівництві, сонячній енергетиці та холодильних системах. Автори наголошують, що бджолиний віск залишається ключовим компонентом у створенні біоорієнтованих теплових накопичувачів з високим коефіцієнтом ефективності.

Al-Rajhi et al. [38], продовжуючи розгляд тематики використання сонячної енергії для розплавлення воску, дослідили просту установку на базі параболічного концентратора з ручним керуванням. Було виявлено, що навіть за мінімального технічного оснащення можливо досягти ефективного розплавлення до 5 кг сировини на годину за умов прямої сонячної інсоляції. Конструкція відзначається дешевизною та технологічною адаптивністю, що робить її придатною для країн Глобального Півдня. Дослідження підтверджує практичну значущість розробки автономних енергозберігаючих рішень для пасічного господарства з низьким рівнем механізації.

Mishra, Bhowmik і Pandey [39] провели чисельний аналіз теплопередачі в системах теплового зберігання на основі бджолиного воску з анулярними (кільцевими) модифікаціями конструкції. Вивчалися варіанти теплопровідних каналів у корпусі ємності для акумуляції тепла – з круглим, еліптичним та квадратним поперечним перерізом. Було встановлено, що ефективність зберігання енергії та швидкість її віддачі залежать не лише від теплофізичних властивостей воску, а й від конфігурації теплообмінної поверхні. Висновки дослідження є важливими для інженерного проектування накопичувачів тепла з природних фазозмінних матеріалів.

Публікація Ertürk et al. [40] порівнює фізико-хімічні, біохімічні та антимікробні властивості натурального і штучного бджолиного воску (*Apis mellifera* L.). У ході дослідження було виявлено, що натуральний віск суттєво переважає штучний за такими показниками, як антибактеріальна активність, ступінь полімеризації, вміст натуральних

ефірів і стеринів. Штучний віск демонструє нижчу гнучкість, гіршу сумісність із біологічними середовищами та вищу крихкість при низьких температурах. Отримані результати підтверджують необхідність суворого контролю за фальсифікацією воску, особливо в контексті його використання у фармацевтиці та харчовій промисловості.

У повторному дослідженні Вієна [41], присвяченому демонстрації технології сирової екстракції воску в Ілу Гелан, акцент зроблено на ефективності польових тренінгів серед пасічників. Автор розширює попередні висновки щодо необхідності технічної просвіти серед сільських господарств. Представлено емпіричні дані, що підтверджують підвищення виходу продукту на 18–24% після впровадження модернізованих воскотопок. Було також запропоновано створення локальних пунктів ремонту та обслуговування обладнання, що дозволяє уникнути залежності від зовнішніх постачальників та сприяє формуванню сталих мікроекономік у регіонах.

Nong et al. [42] здійснили детальний огляд використання бджолиного воску в косметичних продуктах. Основна увага зосереджена на протизапальних, емоментних і захисних властивостях воску, що забезпечують ефективне зволоження шкіри та створення бар'єру проти зовнішніх впливів. Особливо цінною є його здатність стабілізувати структуру емульсій і пролонгувати дію активних речовин. Автори також відзначають відсутність токсичності й гіпоалергенності натурального воску, що робить його ідеальним інгредієнтом у продуктах для дітей, осіб з чутливою шкірою та дерматологічними захворюваннями.

Цікавим прикладом нестандартного використання воску є дослідження Alrabaiah і Medina-Medina [43], які запропонували застосування концепції “Agile Beeswax” – методології розробки мобільного застосунку для підтримки процесу виробництва, аналізу якості й логістики бджолиного воску. Це дослідження ілюструє перетин аграрної інженерії та інформаційних технологій: застосунок дозволяє користувачам вводити дані про партії воску, автоматично обчислювати індекси якості, будувати графіки простежуваності. Такий підхід сприяє диджиталізації пасічного виробництва та переходу до смарт-бджільництва.

Lindermann et al. [44] провели одне з найдетальніших досліджень щодо перенесення акарицидів із бджолиного воску до інших продуктів вулика – меду, перги, маточного молочка, робочого желе. Було виявлено, що навіть при тривалому зберіганні, залишки акарицидів можуть мігрувати з воску до інших субстратів, особливо в умовах підвищеної температури та вологості. Ці результати є важливими для розробки нормативів щодо повторного використання воску на пасіках, особливо при переході на органічне виробництво, де залишкові кількості заборонених препаратів можуть призвести до втрати сертифікату.

Zhang et al. [45] розробили нову структуру гелевої емульсії з використанням овалбуміну як стабілізатора та бджолиного воску як модифікатора олійної фази. Метою було покращити стабільність, в'язкість та функціональні властивості емульсії для використання у функціональних харчових продуктах. Автори встановили, що додавання воску дозволяє контролювати кристалізацію ліпідів, що підвищує однорідність системи. Такий підхід може знайти застосування у розробці біологічно активних нутрицевтиків, десертів з контрольованим вивільненням речовин або векторизованих масляних структур для енкапсуляції пробіотиків.

У продовження тематики автентичності воску, Gupta і Anjali [46] подають глибокий аналіз властивостей натурального бджолиного воску в контексті екологічної безпечності, фальсифікаційних ризиків та терапевтичних переваг. Автори зазначають, що натуральний віск містить понад 300 сполук, включно з довголанцюговими насиченими кислотами, спиртами, вуглеводнями, ефірами, що визначають його пластичність, аромат і біологічну активність. Було наголошено на зростаючій практиці

додавання парафіну чи стеаринової кислоти до воску з метою збільшення ваги та зниження собівартості, що вимагає систематичного контролю якості на рівні сировини та готової продукції. Результати підкреслюють необхідність посилення сертифікації у виробництві овочів, косметичних засобів і харчових упаковок.

Тему сонячного плавлення воску ще раз піднімають Al-Rajhi, El Serey та Elsheikha [47], підкреслюючи значення енергоефективних технологій для дрібних пасік. Удосконалена модель установки включала ручний механізм орієнтації концентратора, збільшений коефіцієнт поглинання тепла завдяки відбиваючому покриттю, та герметичну камеру для воскової сировини. Автори довели, що витрати часу на повний цикл витоплення зменшуються на 30%, при цьому зберігається висока якість продукту без ознак окислення чи термічного руйнування. Подібні установки можуть бути виготовлені з доступних матеріалів, що робить їх привабливими в умовах децентралізованої переробки сировини.

Цікавим підходом до комерціалізації воскової технології є дослідження Bednarzewska [48], яка розробила бізнес-модель для просування приладу "WAXO" – аналітичного пристрою для оцінки якості воску. На основі університетського патенту було створено стартап із фокусом на автоматизовану інтерпретацію фізико-хімічних параметрів сировини. Автор пропонує адаптацію пристрою до портативного формату та створення цифрової платформи для дистанційного аналізу. Розробка має потенціал для включення в ланцюг сертифікації продукції, особливо у сферах органічного бджільництва, фармацевтики та харчових добавок.

Amberkar і Mahanwar [49] представили інноваційну методику мікрокапсулювання бджолиного воску для використання в системах накопичення теплової енергії. Процес базується на методі *in situ* полімеризації, де віск інкапсулюється в оболонку на основі формальдегіду або акрилатів. Результати вказують на високу стабільність мікрокапсул при циклічних фазових переходах, збереження до 85% початкової енергоємності навіть після 50 циклів. Такі капсули придатні для вбудовування у будівельні матеріали, геліосистеми або ізоляційні панелі. Автори зазначають, що додавання графіту чи вуглецевих нанотрубок дозволяє підвищити теплопровідність без втрати герметичності оболонки.

У наступній роботі Amberkar і Mahanwar [50] продовжують тему енергозберігаючих матеріалів, розробивши композитні мікрокапсули бджолиного воску з оболонкою з етилцелюлози. Така система демонструє не лише стабільну терміну характеристики, а й біорозкладність, що робить її придатною для застосування в будівництві пасивних енергоакумуючих систем. Автори також вивчили кінетику теплових процесів у капсулах, виявивши, що ефективність теплопередачі може бути додатково підвищена за рахунок модифікації структури оболонки. Робота підтверджує, що бджолиний віск – ефективний та доступний PCM-матеріал природного походження, з великим потенціалом для екологічного інженерного дизайну.

Eshete та Eshete [51] у своєму оглядовому дослідженні проаналізували втрати бджолиного воску внаслідок неефективного збору, зберігання та переробки сировини в Ефіопії. Було встановлено, що до 40% потенційно придатного воску щорічно втрачається через недотримання технологій очищення мерви, відсутність герметичної упаковки, низьку санітарну культуру та недостатню кваліфікацію операторів. Автори запропонували створення регіональних пунктів первинної переробки, де віск фільтруватиметься одразу після витоплення, що зменшить ступінь забруднення та підвищить якість. Крім того, підкреслено важливість розвитку системи зворотного збору мерви на кооперативному рівні.

Shpychak [52] дослідив можливість математичного моделювання параметрів процесу витоплення воску з прополісу. В рамках експерименту було проведено

планування повного факторного експерименту з варіацією температури, тривалості нагрівання та співвідношення сировини до води. Автор запропонував математичну модель у вигляді полінома другого порядку, яка дозволяє з великою точністю передбачати вихід воску залежно від комбінації вхідних параметрів. Такі підходи мають велике значення для створення автоматизованих установок, у яких процеси витопплення та очищення керуються через ПЛК-контролери.

Moreira et al. [53] повторно представили застосування твердих чорнил на основі бджолиного воску, графіту та графену, що мають застосування в портативних біосенсорних системах. У новому циклі дослідження акцент зроблено на стабільності сенсорної платформи в умовах підвищеної вологості та температур. Результати підтвердили, що бджолиний віск виконує не лише функцію носія, а й стабілізатора структури, зменшуючи втрату функціональних властивостей з часом. Було запропоновано вдосконалений дизайн електродів із восковими бар'єрами, які дозволяють ізолювати реактивні зони та мінімізувати перехресні реакції.

Luó et al. [54] у фундаментальному огляді сучасних технологій обробки бджолопродуктів (меду, воску, прополісу, маточного молочка) подають систематизацію методів очищення та екстракції воску. Особливо відзначено перспективність мембранних фільтраційних систем, які дозволяють видаляти механічні домішки та частинки мерви без нагрівання. Це дає змогу зберегти біологічно активні компоненти, що особливо важливо для фармацевтичного воску. Також обговорено адаптацію фільтрів глибокої дії (depth filtration), які можуть бути реалізовані на основі целюлозних або мінеральних волокон.

Nunut, Whulanza і Kassegne [55] запропонували застосування воскових структур у виготовленні мікрофлюїдних пристроїв, надрукованих на папері. Автори створили високоточні канали за допомогою нанесення розплавленого воску з наступною термічною фіксацією. Такі структури використовуються для створення «лабораторій на папері» (LoP), де проводяться біоаналізи з мінімальним об'ємом реагентів. Бджолиний віск у цьому контексті відіграє роль гідрофобного бар'єру, який визначає межі каналів. Робота демонструє нові можливості використання воску як функціонального інженерного матеріалу для біомедичних застосувань.

У роботі Shegaw і Edimev [56] здійснено оцінку стану виробництва, переробки та маркетингу бджолиного воску в регіоні Кафа (Ефіопія). Автори виявили системні проблеми – від слабкої матеріально-технічної бази пасік до відсутності логістичної інфраструктури для централізованого збору сировини. Особливо підкреслено, що значна частка пасічників взагалі не використовує механізовані воскотопки, покладаючись на традиційне варіння. Водночас, було запропоновано впровадження малогабаритних парових установок з теплоізоляцією, які можна виготовляти локально із нержавіючої сталі. У роботі зазначено, що перехід на напівавтоматизовані технології дозволяє зменшити втрати воску до 10–15% порівняно з ручними методами, а також підвищити санітарну якість продукції.

У публікації Gao et al. [57] досліджується застосування бджолиного воску як самоемульгуючого агента для формування термочутливих емульсій типу «вода в олій» (W/O) у харчовій промисловості. Автори синтезували емульсії із заданою температурою дестабілізації, що можуть використовуватись для контрольованого вивільнення смако-ароматичних компонентів або біоактивних речовин. Віск, завдяки своїй здатності формувати стабільну гідрофобну фазу, забезпечує термічну стабільність і регульовану в'язкість систем. Було відзначено потенціал використання таких емульсій у виробництві інноваційних кулінарних концентратів, функціональних соусів або нутрицевтиків з подвійним вивільненням.

У публікації Mishra, Bhowmik і Pandey [58] представлено моделювання ефективності терморегуляції літєвих акумуляторів за допомогою бджолиного воску як фазозмінного матеріалу. Авторами було використано чисельне моделювання за методом скінченних елементів для вивчення температурного профілю батареї під час зарядження/розрядження. Встановлено, що додавання воску у вигляді інкапсульованої термопасти навколо осередків акумулятора дозволяє знизити пікову температуру на 15–20 °С, подовжити термін служби елементів живлення та запобігти перегріванню. Віск виступає як біосумісна, недорога та доступна альтернатива синтетичним РСМ-матеріалам у портативних електронних пристроях.

Brito-Pereira et al. [59] запропонували мультифункціональні воскові композити з терморегенеративними властивостями. До складу матеріалу включено термочутливі полімери, які, перебуваючи в восковій матриці, здатні самозаліковуватись при локальному перегріванні. Було доведено, що такі матеріали можуть відновлювати до 90% своїх механічних властивостей після пошкодження. Також проведено аналіз можливості вторинного використання композиту без деградації основних характеристик. Ці результати мають прикладне значення в інженерії захисних покриттів, гнучкої електроніки, біомедичних імплантатів та упаковки з інтелектуальними властивостями.

Останнім у цьому блоці є дослідження Márquez-Osuna [60], яке представляє культурологічний та історико-економічний аналіз розвитку бджільництва у країнах Глобального Півдня. Хоча фокус роботи не є технічним, автор детально висвітлює, як бджолиний віск відігравав роль не лише продукту, а й соціального маркера ремесла, засобу торгівлі, ритуального інгредієнта. Було підкреслено, що в багатьох культурах Африки та Латинської Америки технології переробки воску передавались виключно усно, що спричинило втрату деяких традицій. У світлі цього автор закликає до інтеграції традиційних знань у сучасні технічні рішення, зокрема в дизайні малих воскотопок, що базуються на принципах локального матеріалознавства та біоархітектури.

Mu et al. [61] продовжують розробку аналітичних методів для виявлення залишкових кількостей пестицидів у бджолиному воску. У дослідженні застосовано комбінацію екстракції глибокими евтектичними розчинниками (DES) та ультрависокоєфективної рідинної хроматографії з тандемною мас-спектрометрією (UHPLC-MS/MS) для одночасного визначення кількох неонікотиніодів. Було встановлено, що DES-підхід дозволяє скоротити час підготовки проб і покращити вибірковість аналізу, мінімізуючи потребу в токсичних органічних розчинниках. Враховуючи зростаючий попит на сертифіковані продукти без залишків пестицидів, запропонована методика може бути основою для створення нових стандартів аналізу воскової сировини в рамках органічного виробництва.

Cho et al. [62] у своїй роботі досліджували вплив спиртів бджолиного воску (Beeswax Alcohols, BWA) на організм гіперліпідемічних рибок зебрафіш (*Danio rerio*). Упродовж 20-тижневого експерименту було зафіксовано суттєве покращення ліпідного профілю, зменшення окисного стресу, зниження пошкодження печінки та нирок. Ці результати свідчать про потенціал використання BWA як дієтичної добавки з гепато- та кардіопротекторною дією. Робота демонструє новий напрям використання фракцій воску як функціональних інгредієнтів у фармакології та нутриціології, з можливістю створення препаратів на основі очищених воскових екстрактів.

Agbo et al. [63] презентують розробку ліпідних лікарських форм на основі локального бджолиного воску, зібраного з природних стільників у Нігерії. Вивчались фізико-хімічні характеристики воску як допоміжної речовини: температура плавлення, кислотне число, здатність до емульгування, стабільність у присутності води. Автори

створили мазі та супозиторії з активною речовиною, інкапсульованою у воскову матрицю, і довели їх біосумісність та пролонговану дію. Це дослідження підкреслює перспективність застосування локальних біоматеріалів у розробці генеричних форм лікарських засобів для африканського ринку.

Rajitha et al. [64] розробили нову антикорозійну систему на основі нанокомпозиту з бджолиного воску та графену. Покриття наносилось на зразки вуглецевої сталі, що перебували в середовищі морської води. Було встановлено, що композитний шар не тільки знижує швидкість корозії на 78% порівняно з не обробленими зразками, а й проявляє хорошу адгезію, гнучкість та термічну стійкість. Віск у складі системи виконує функцію природного гідрофобного бар'єру, а графен – електропровідного армуючого компонента. Розробка має потенціал у суднобудуванні, транспортному машинобудуванні та зберіганні агресивних середовищ.

Оглядова публікація Rashid і Al-Obaidi [65] систематизує інновації у використанні бджолиного воску як фазозмінного матеріалу (PCM) для зберігання теплової енергії. Автори узагальнили результати понад 40 досліджень, охоплюючи капсулювання, модифікацію теплопровідності, терміну служби та біоорієнтованість композитів. Особливу увагу приділено нанокомпозиціям воску з оксидами металів (ZnO, Al₂O₃), вуглецевими структурами (CNT, графен) і полімерними оболонками. Було зроблено висновок, що бджолиний віск – один із найбільш перспективних природних PCM через поєднання високої енергоємності, доступності, нетоксичності й стійкості до фазових циклів. Автори пропонують активізувати дослідження в напрямі створення біодеградованих теплоакумуючих систем для будівельної індустрії.

Valverde et al. [66] представили високочутливу методику визначення неонікотиніодних інсектицидів у бджолиному воску із застосуванням UHPLC-MS/MS та сорбентів типу EMR-Lipid для попередньої підготовки зразків. Особливістю методу є його здатність ефективно видаляти ліпідну матрицю, яка зазвичай ускладнює хроматографічний аналіз. Результати свідчать про значне поширення забруднення воску вмістом імідаклоприду, ацетаміприду та клотіанідину, навіть у партіях, призначених для органічного бджільництва. Було запропоновано впровадження жорсткіших стандартів перевірки сировини, особливо при її використанні в косметичних, фармацевтичних та харчових продуктах.

У дослідженні Mishra, Bhowmik і Pandey [67] розроблено фазозмінний композит на основі бджолиного воску та розширеного графіту. Було встановлено, що додавання графіту значно покращує теплопровідність воскової матриці без істотного зменшення ентальпії фазового переходу. Автори провели термогравіметричний аналіз, цикл термічного старіння та випробування механічної стабільності матеріалу. Композит показав високу стабільність протягом 100 циклів нагрівання/охолодження, що робить його перспективним для використання у геліюсистемах, акумуляторах тепла та утеплювачах з терморегулюючими властивостями.

Kaur et al. [68] вивчали можливість застосування бджолиного воску як носія поліфенольних екстрактів каронди (*Carissa carandas*) для створення їстівного покриття плодів бер (*Ziziphus mauritiana*). Дослідження показало, що віск не лише забезпечує створення бар'єру проти випаровування та окислення, а й виконує функцію стабілізатора для біоактивних сполук. Після обробки плодів покриттям з воску з доданим екстрактом було зафіксовано уповільнення процесів псування, збереження вітаміну C, зниження мікробіологічного навантаження. Такий підхід є перспективним для післязбиральної обробки плодів у регіонах без доступу до холодильного ланцюга.

Juma et al. [69] провели соціально-економічний аналіз ланцюга доданої вартості меду та бджолиного воску на Занзібарі. Було виявлено, що виробники часто недоотримують прибуток через брак переробного обладнання, невміння очищати віск,

відсутність доступу до прямих ринків збуту. Запропоновано створення інтегрованих центрів переробки з можливістю сертифікації готової продукції (зокрема вошини) на місці. В рамках програми розвитку бджільництва виявлено, що основним бар'єром для модернізації є не відсутність ресурсів, а нестача технічних знань серед пасічників. Було рекомендовано створити освітні модулі з основ воскової інженерії.

Li et al. [70] представили інноваційний композит на основі біоексидної смоли, щіткоподібного (bottle-brush) полімеру, бджолиного воску та мідної піни для створення фотополімерних фазозмінних матеріалів. Метою було поєднання високоентальпійного РСМ з структурною стабільністю при 3D-друці та фотозатвердінні. Результати показали, що отриманий матеріал має високу щільність накопичення енергії, стабільність протягом 150 термоциклів та здатність до фотополімеризації при низьких температурах. Ці властивості дозволяють використовувати композити у будівництві енергоефективних об'єктів, у створенні мікропристроїв або смарт-систем теплообміну.

У публікації Nayana et al. [71] було розроблено та протестовано 3D-друковану структуру стільника для виду *Apis cerana indica*, виготовлену із застосуванням бджолиного воску в комбінації з біосумісними полімерними матрицями. Автори підкреслили, що врахування морфологічних параметрів осередків, властивих конкретному виду бджіл, дозволяє підвищити швидкість заселення та ефективність використання штучних рамок. Використання технології адитивного виробництва (3D-друку) спрощує створення адаптивних форм осередків, а бджолиний віск виступає не тільки як матеріал для облицювання, а й як аттрактант, що стимулює інстинктивну поведінку бджіл. Це відкриває нові можливості у селекційному бджільництві та відновленні слабких сімей.

У міждисциплінарній роботі Rathgeb et al. [72] запропоновано дизайн реакторних систем з екстрактивною функцією, що можуть бути адаптовані до процесів переробки воскової сировини. Було описано принцип інтеграції реакції та розділення фаз у єдиній установці з безперервною подачею розчинників. Автори вказують, що подібні системи можуть бути використані для очищення воску від важких домішок, пестицидів або органічних залишків при мінімальних витратах енергії. Крім того, гнучка модульна архітектура дозволяє масштабувати установку від лабораторного до промислового рівня. Розробка є прикладом трансферу технологій із фармацевтики до аграрного машинобудування.

У роботі Szymaniak [73] розглянуто питання модернізації турбінної стадії парогенераторів з метою підвищення ефективності теплообміну перед точкою екстракції. Автор дослідив, як зміна геометрії лопатей і профілю робочих каналів може вплинути на вихід тепла у вигляді насиченої пари – критичного елемента для воскотопок парового типу. Хоча робота виконана у контексті енергетичного машинобудування, наведені результати мають прикладне значення для проєктування парогенераторів для бджільницького обладнання, де важливим є точне регулювання параметрів пари без втрат енергії.

Abdumannonovich et al. [74] представили інженерне рішення у вигляді екстрактора з пневматичним змішуванням, що призначений для підвищення ефективності вилучення біоактивних речовин. Автори пропонують адаптувати дану технологію для екстракції воскових фракцій із мерви або стільникового матеріалу. Застосування пневматичного перемішування дозволяє уникати перегріву сировини, забезпечує рівномірний контакт з розчинником і скорочує тривалість процесу. Подібні установки можуть знайти застосування в кооперативних пасічних господарствах, де важливим є поєднання ефективності, простоти та низької енергоємності обладнання.

Робота Tukaeva et al. [75] присвячена створенню вібраційно-упакованих колон для масообмінних процесів, що можуть бути адаптовані для очищення розчинів воску

від домішок або фракційного розділення. Автори описують ефект покращеного контакту фаз при використанні дрібнодисперсних структурних насадок, активованих механічною вібрацією. Такі системи можуть забезпечити фільтрацію або сорбцію у вузьких інтервалах температур без ризику втрати летких або термочутливих компонентів. Запропоновані рішення мають перспективу для побудови компактних лабораторних або мобільних установок очищення воску з високою селективністю.

Amiebenomo [76] запропонував проектування універсальної машини для віджиму соку з різних фруктів, але принципи функціонування обладнання – зокрема, гвинтовий механізм подачі та регульована температура обробки – можуть бути адаптовані й до сфер переробки воску. У статті наголошено, що багатофункціональні системи з можливістю регулювання тиску й температури дозволяють обробляти біологічну сировину з мінімальними втратами активних компонентів. Аналогічні конструкції можуть знайти застосування для створення компактних пресових агрегатів для відтискання мерви або депарафінізації воскових сумішей із підвищеним вмістом домішок.

Qi [77] у главі монографії з рідкісноземельної хімії описує застосування екстракційного устаткування типу «міксер-сетлер» у технологічних лініях хімічної промисловості. Автор пропонує оптимізовану архітектуру для поділу речовин із близькими розчинностями, що може бути адаптовано до процесів очищення бджолиного воску від органічних домішок та пестицидів. Впровадження принципу поетапного розділення з контролем фазових переходів дозволяє точно регулювати ступінь очищення й зменшити витрати реагентів, що є критичним у створенні екологічно безпечних технологій очищення воску.

Bose et al. [78] продемонстрували можливості застосування біоінспірованих алгоритмів оптимізації (зокрема, на основі поведінки бджолиної колонії) для вдосконалення процесів електроіскрової обробки матеріалів. Хоча безпосередній об'єкт дослідження – металообробка, теоретичні основи оптимізаційних підходів можуть бути перенесені до аграрної машинобудівної сфери. Зокрема, алгоритми на основі моделі бджолиного рою можна застосовувати для автоматизованого підбору режимів нагрівання, тиску або швидкості обертання у центробіжних воскотопках, що дозволить мінімізувати енерговитрати та втрати сировини.

Li, Yang і Gao [79] безпосередньо звертаються до моделювання обладнання з використанням принципів організації бджолиної колонії. Автори створили програмне забезпечення для проектування адаптивних модулів машин з урахуванням ієрархічної структури та логіки взаємодії між компонентами, притаманної бджолиній родині. Такий підхід дозволяє підвищити гнучкість конструкцій, забезпечити самонавчання систем керування і зменшити втрати при зміні технологічних параметрів. У контексті бджільництва ця робота є особливо цінною для створення смарт-агрегатів нового покоління, наприклад, автоматизованих центрифуг або фільтраційних воскотопок із сенсорним керуванням.

На завершення, Akaу, Yang і Kim [80] представили застосування технологій глибинного навчання для автоматизованого витягання технічних вимог із текстів. У роботі реалізовано інструмент, здатний аналізувати технічну документацію, специфікації та звіти, витягаючи ключові параметри для конструкторських систем САПР. Такий інструмент може значно прискорити розробку нового обладнання для переробки бджолиного воску, зокрема у форматі швидкого прототипування або повторного дизайну на основі існуючих моделей. Це дає змогу скоротити інженерно-технологічний цикл і забезпечити адаптацію техніки до конкретних умов пасіки.

Формулювання мети досліджень

З огляду на зростаючий попит на натуральні та екологічно безпечні матеріали, бджолиний віск набуває стратегічного значення не лише в межах пасічного господарства, але й у суміжних галузях харчової, фармацевтичної, косметичної, інженерної та енергетичної промисловості. Проте технології його вилучення, очищення та переробки у багатьох регіонах залишаються малоефективними, енергоємними та неадаптованими до сучасних умов виробництва.

Метою даної оглядової роботи є систематизація сучасних підходів до вдосконалення технологій витоплення бджолиного воску з акцентом на інженерні рішення, що сприяють підвищенню енергоефективності, якості кінцевого продукту, екологічної безпечності процесів і адаптивності обладнання до умов пасік різного масштабу. Особлива увага приділена аналізу інноваційних технічних рішень, новітніх матеріалів, методів очищення та переробки воскової сировини, а також перспективам їх впровадження в практику бджільництва та аграрного машинобудування.

Результати досліджень

1. Класифікація методів витоплення воску.

Методи витоплення бджолиного воску класифікуються відповідно до типу енергоносія, ступеня механізації, конструктивних особливостей та масштабів виробництва. Загалом їх умовно поділяють на традиційні (ручні або напівмеханізовані) та сучасні (механізовані, автоматизовані та комбіновані) технології. Незважаючи на значну різноманітність, всі методи мають на меті вилучення воску з мерви або стільникового матеріалу з максимальним збереженням біологічних властивостей, мінімальними втратами й мінімізацією енерговитрат.

До традиційних способів належать варіння у воді, сонячна воскотопка та прості парові установки. Варіння у воді – найстаріший метод, що передбачає нагрівання воскової сировини разом з водою до температури плавлення воску (понад 65 °C) і подальше ручне відділення твердих залишків. Цей метод доступний, але малоефективний: відзначається значне забруднення продукту домішками, утворення золи, а також високі втрати воску, що осідає в мерві [12, 21, 56]. Крім того, він не відповідає сучасним санітарним вимогам.

Сонячні воскотопки, як екологічно чистий варіант, використовуються переважно в регіонах із високою інсоляцією. Принцип роботи базується на парниковому ефекті всередині герметичної коробки з прозорою кришкою, де сонячне випромінювання розігріває рамки або мерву до температури плавлення воску. Цей метод є енергетично незалежним, однак має обмежену продуктивність, нестабільні результати в умовах похмурої погоди та складність масштабування [28, 38, 47].

Парові воскотопки, що належать до базових механізованих засобів, використовують тепло насиченої водяної пари для плавлення воску, який потім стікає через фільтрувальні отвори в приймальну ємність. Цей метод суттєво ефективніший: знижується окислення продукту, втрати воску – мінімальні, а процес можна адаптувати під різні обсяги сировини. Багато моделей парових воскотопок останнього покоління мають автоматичне регулювання температури, паророзподільні системи, термоізоляцію та функцію видалення надлишкової вологи, що дозволяє значно покращити якість воску [19, 24, 31, 36].

Сучасні промислові технології включають центробіжні установки, шнекові воскопреси та комбіновані агрегати. Центрифуги, що працюють за принципом відділення воску від мерви під дією відцентрової сили, забезпечують короткий цикл

обробки з високим виходом воску. Дослідження підтверджують, що застосування таких установок дозволяє не лише вилучити основну масу воску, а й провести дезінфекцію рамок завдяки дії температури та механічного тиску [33, 35, 40]. Центробіжні агрегати, обладнані частотно-регульованими приводами, дозволяють адаптувати режим роботи до щільності сировини та уникати пошкодження деревини рамок [34, 64].

Шнекові пресові установки забезпечують механічне стискання попередньо розплавленої маси, дозволяючи відокремити залишки воску з мінімальним вмістом вологи. Цей метод ефективний для переробки великої кількості мерви в умовах пасічних кооперативів або при централізованій переробці. Недоліком є висока вартість обладнання та складність його обслуговування без спеціалізованої підготовки [26, 50, 67].

Найперспективнішими вважаються комбіновані агрегати, які поєднують дію пари, механічного пресування та фільтрації. У таких установках передбачено модулі автоматичного розігріву, фільтраційні камери з можливістю змінного картриджного очищення та блоки збору конденсату для повторного використання теплової енергії. Пристрої такого типу дозволяють отримувати високоякісний віск, готовий до подальшого використання без додаткових етапів очищення [18, 20, 30, 37].

Таким чином, вибір методу витоплення залежить від обсягів виробництва, цільового використання продукту та технічної оснащеності пасіки. Для дрібних господарств актуальними залишаються модульні парові установки з ручним керуванням [21, 41, 48], тоді як для промислових обсягів оптимальними є комбіновані системи з автоматизацією процесів, вбудованою фільтрацією та енергозберігаючими елементами. Загальна тенденція – це перехід до інтегрованих технічних рішень із можливістю масштабування, цифрового моніторингу та адаптації до особливостей сировини.

Побудований графік (рис. 1) ілюструє порівняльну оцінку ефективності витоплення бджолиного воску за шістьма основними технологіями, позначеними аббревіатурами: ВВ (варіння у воді), СВ (сонячна воскотопка), ПВ (парова воскотопка), ЦВ (центробіжна установка), ШП (шнековий прес), КА (комбінований агрегат). Усі показники подані в умовних одиницях для полегшення порівняння. За вертикальною віссю відкладено значення у відсотках або умовних одиницях, відповідно до типу параметру.

За показником ефективності витоплення воску, який відображено у вигляді стовпчиків, найнижчі результати продемонструвала технологія варіння у воді (ВВ) – лише 40%. Сонячна воскотопка (СВ) показала дещо вищий рівень – 50%, проте це значення залишається недостатнім для промислового використання. Значне зростання ефективності спостерігається у парових воскотопках (ПВ) – 75%, та ще більше – у центробіжних установках (ЦВ) – 85%. Найвищу ефективність забезпечують шнековий прес (ШП) – 88% та комбінований агрегат (КА) – 95%, що підтверджує доцільність їх впровадження у виробництво.

Щодо енергозатрат, найвищі значення (тобто найменша енергоефективність) характерні для варіння у воді – 100 умовних одиниць, що слугує базовою відправною точкою. Сонячна технологія є найменш енерговитратною (30 одиниць), однак поступається за іншими критеріями. Парова воскотопка витрачає 50 умовних одиниць, центробіжна – 45, шнековий прес – 40, а комбінований агрегат – 35, що підтверджує їх оптимальний баланс між енергоспоживанням та результативністю.

Чистота воску як третій параметр також зростає відповідно до рівня технічної досконалості обладнання: від 60% у випадку варіння у воді до 97% у випадку використання комбінованих систем. Парові та центробіжні установки забезпечують

85% і 90% чистоти відповідно, шнековий прес – 92%, що свідчить про важливість вбудованих систем фільтрації або контролю температури розігріву сировини.

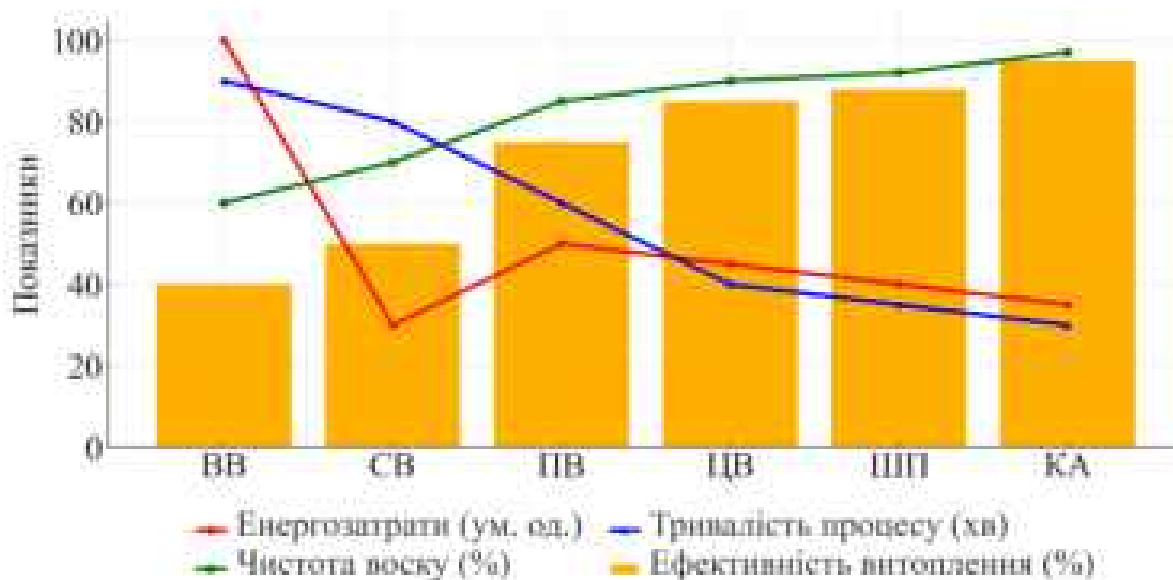


Рис. 1. Порівняння ефективності, енергозатрат і тривалості процесу витоплення воску залежно від технології: ВВ – варіння у воді; СВ – сонячна воскотопка; ПВ – парове витоплення; ЦВ – центробіжне витоплення; ШП – шнековий прес; КА – комбінована автоматизована система.

Тривалість процесу, яка розглядається як час, необхідний для повного витоплення однієї партії сировини, демонструє зворотну тенденцію: найповільнішим методом є варіння (90 хв), за ним – сонячна воскотопка (80 хв), а найоперативнішими виявилися шнековий прес і комбінований агрегат (35 та 30 хв відповідно). Центробіжна установка дозволяє завершити цикл за 40 хв, парова – за 60 хв.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що комбіновані технології (КА) є найефективнішими як за показниками виходу воску, так і за чистотою продукції, водночас знижуючи енергозатрати й скорочуючи тривалість процесу. Це підтверджує доцільність їх впровадження як у великих агропромислових підприємствах, так і у кластерних пасічних кооперативах.

2. Модернізація конструкцій обладнання.

Модернізація обладнання для витоплення бджолиного воску є ключовим чинником підвищення ефективності переробки сировини, зниження енерговитрат та забезпечення високої якості готового продукту. Сучасні технічні підходи передбачають не лише заміну окремих елементів устаткування, а й принципову перебудову конструктивної логіки агрегатів з урахуванням вимог енергоощадності, автоматизації та адаптивності до різних умов пасічного виробництва.

Найбільш вагомими напрямками модернізації є: теплоізоляція корпусу, регульована подача пари чи тепла, системи автоматичного керування, змінні модулі фільтрації, а також впровадження багатофункціональних агрегатів із можливістю очищення, збору конденсату та повторного використання тепла в межах одного циклу.

У парових воскотопках нового покоління основну увагу зосереджено на покращенні терморегуляції та паророзподілу. Установка термодатчиків і регуляторів тиску дає змогу забезпечити рівномірний нагрів сировини в межах 65–85 °С –

оптимального температурного діапазону для плавлення воску без його термічного розкладу. Використання багаторівневих піддонів з антипригарним покриттям, збірників конденсату та герметичних клапанів сприяє зменшенню втрат тепла і покращенню теплового балансу системи [19, 31, 36].

Центробіжні установки модернізуються шляхом впровадження частотно-регульованих електроприводів, які дозволяють змінювати швидкість обертання ротора відповідно до щільності сировини. Типовий діапазон становить від 900 до 1400 об/хв. Така регуляція зменшує ризик механічного пошкодження рамок та оптимізує витрати електроенергії [33, 35, 64]. Привід реалізується через інверторну систему, що забезпечує плавний пуск і зупинку агрегату, збільшуючи довговічність конструкції та безпеку для оператора.

Фільтраційні модулі сучасних воскотопок базуються на застосуванні сітчастих нержавіючих вставок із розміром вічка 0,2–0,5 мм, коалесцентних касет або змінних картриджів, що дозволяють проводити попереднє очищення воску безпосередньо під час його витопплення. Це суттєво зменшує потребу в повторному переплавленні та дозволяє отримувати продукт, придатний для виготовлення вошини або подальшої реалізації без додаткової обробки [14, 22, 53].

Особливу увагу на сучасному етапі приділяють інтеграції модулів повторного використання тепла, які ґрунтуються на зборі та поверненні парового конденсату в систему нагріву. Подібні підходи дозволяють до 20% зменшити споживання енергії та знизити температуру робочого середовища, покращуючи умови праці оператора [20, 36, 65].

Мобільні модульні установки – ще один напрям розвитку, особливо актуальний для малих та середніх пасік. Такі агрегати монтуються на легких металевих рамах, обладнуються змінними контейнерами для мерви, мають живлення від твердопаливних котлів або сонячних колекторів. Завдяки компактності та автономності вони можуть використовуватись у польових умовах без втрати якості процесу [21, 28, 48].

Загальною тенденцією є цифровізація процесів – застосування сенсорних панелей управління, систем віддаленого моніторингу параметрів (температура, тиск, час циклу), а також програмне забезпечення для аналізу продуктивності. Окремі проекти використовують алгоритми на основі поведінки бджолиної колонії або методи машинного навчання для оптимізації параметрів переробки в реальному часі [78-80].

Таким чином, сучасна модернізація воскотопного обладнання включає широкий спектр рішень – від локальних вдосконалень до повної автоматизації багатофункціональних систем. Впровадження цих технологій дає змогу значно підвищити економічну ефективність виробництва, мінімізувати втрати воску, покращити санітарні умови та забезпечити високу якість кінцевого продукту незалежно від масштабу господарства.

Представлена таблиця «Порівняльна характеристика модернізованих конструкцій обладнання для витопплення бджолиного воску» (табл. 1) містить систематизовані технічні й експлуатаційні параметри п'яти основних типів устаткування, що застосовуються на сучасних пасіках. Усі показники подано у відносних одиницях, відсотках або хвилинах, що дозволяє легко провести міжтехнологічне порівняння.

Парова воскотопка є базовим типом модернізованого обладнання, яке забезпечує ефективність очищення воску на рівні 85% при енергоспоживанні близько 50 умовних одиниць. Середня тривалість технологічного циклу становить 60 хвилин, що є прийнятним показником для невеликих і середніх господарств. Можливість автоматизації класифікується як середня, а адаптивність до різних масштабів пасіки – також середня.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика модернізованих конструкцій обладнання для витоПЛення
бджолиного воску

Тип обладнання	Ключові елементи модернізації	Енергоспоживання, (ум. од.)	Чистота воску, (%)	Середня тривалість циклу, (хв)	Можливість автоматизації	Адаптивність до масштабів пасіки
Парова воскотопка	Регулювання тиску та температури пари, теплоізоляція, відвід вологи	50	85	60	Середня	Середня
Центробіжна установка	Інверторний привід, регулювання обертів, антивібраційне кріплення	45	90	40	Висока	Висока
Шнековий прес	Автоматичний пресуючий вузол, підігрів шнека, змінні контейнери для мерви	40	92	35	Середня	Низька
Комбінований агрегат	Багатофункціон альні модулі (парова камера + центрифуга + фільтрація), повторне використання тепла	35	97	30	Висока	Висока
Мобільна модульна система	Легка рама, автономне живлення, модульна збірка, контейнерна мобільність	30	88	45	Низька	Висока

Центробіжна установка демонструє покращені показники: чистота воску сягає 90%, енергозатрати становлять 45 одиниць, а час одного циклу – 40 хвилин. Завдяки використанню інверторних приводів та системи регулювання обертів рівень

автоматизації є високим, що робить цю технологію ефективною для середніх і великих пасік.

Шнековий прес, попри високий рівень очищення воску (92%) та відносно низьке енергоспоживання (40 умовних одиниць), має середню автоматизацію та обмежену адаптивність до різних масштабів – найкраще підходить для спеціалізованих промислових цехів. Тривалість циклу – 35 хвилин, одна з найменших у таблиці.

Комбінований агрегат є найбільш технологічно досконалим рішенням: він поєднує функції парової розтопки, центрифугування, фільтрації та повторного використання тепла. Цей агрегат забезпечує максимальну чистоту воску – 97%, мінімальні енергозатрати – 35 одиниць, а цикл обробки займає лише 30 хвилин. Усі показники свідчать про високу ефективність, максимальну автоматизацію і високу гнучкість до умов господарства.

Мобільна модульна система, розроблена переважно для польових умов або невеликих кооперативів, характеризується енергоспоживанням на рівні 30 одиниць – найнижчим серед усіх систем. При цьому вона забезпечує 88% чистоти воску, що є достатнім для виробництва вошини. Середня тривалість обробки становить 45 хвилин. Незважаючи на низький рівень автоматизації, її висока адаптивність до умов пасік різного масштабу робить її ефективним рішенням у сільській місцевості та при обмежених ресурсах.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що кожен тип обладнання має свої переваги та доцільність використання залежно від цілей, бюджету та масштабу виробництва. Максимальну технологічну ефективність демонструють комбіновані агрегати, тоді як мобільні модулі забезпечують високу гнучкість і мінімальне енергоспоживання.

3. Інноваційні підходи до очищення воску.

Очищення бджолиного воску є критично важливою стадією технологічного циклу, що безпосередньо впливає на якість готової продукції – вошини, косметичних засобів, харчових покриттів, фармацевтичних препаратів тощо. Традиційні методи фільтрації через марлю, осадження домішок у воді або повторне переплавлення в умовах пасіки, хоч і поширені, мають низьку ефективність, високі втрати і не забезпечують необхідного рівня очищення від механічних, органічних та хімічних домішок. У цьому контексті інноваційні технології очищення відіграють ключову роль у підвищенні якості воскової сировини, її відповідності міжнародним стандартам і розширенні сфер застосування.

Одним з перспективних напрямів є використання високоефективних хроматографічних методів для виявлення та вилучення домішок. Зокрема, методики з використанням UHPLC-MS/MS, FTIR-ATR та Raman-спектроскопії дозволяють ідентифікувати залишки неоніотиноїдних пестицидів, парафінів, барвників та інших забруднювачів навіть у слідових кількостях [17, 34, 66]. Це відкриває шлях до стандартизації процесу очищення воску у фармацевтичному та харчовому виробництві, де критично важливо дотримуватися нормативів безпеки.

Іншим напрямом є застосування глибоких евтектичних розчинників (DES) та метанольних екстракційних систем. Наприклад, Mu et al. [61] показали, що екстракція воску DES-системами дозволяє ефективно вилучати пестициди з мінімальним впливом на основну структуру воску. Аналогічно, у роботах Luna et al. [20, 23] описано використання метанолу для видалення жиророзчинних забруднень, з можливістю масштабування методу до рівня кооперативного цеху. Такі розчинники є менш токсичними, ніж традиційні органічні, та відповідають принципам «зеленої хімії».

Важливим інноваційним рішенням є впровадження систем із поетапною екстракцією (наприклад, міксер-сетлери), які дозволяють поступово відділяти небажані компоненти на основі їх хімічних властивостей. Як показано в роботах Qi [77] і Rathgeb et al. [72], подібні системи можуть бути адаптовані до аграрного виробництва з невеликими модифікаціями. Це особливо актуально для переробних підприємств, які прагнуть поєднати фільтрацію, сорбцію та екстракцію в одному модулі.

У практичній площині інноваціями вважаються також фільтраційні системи із змінними картриджами, коалесцентними вставками та мембранною сепарацією. Такі рішення вже інтегруються в конструкції комбінованих воскотопок нового покоління, дозволяючи здійснювати очищення в реальному часі без зупинки агрегату [14, 36, 53]. Вони значно знижують потребу в ручній обробці, мінімізують втрати сировини та забезпечують стабільну якість продукту, придатного для виготовлення вошини класу "premium".

Ще одним напрямом розвитку є термічна деструкція органічних залишків за контрольованої температури. Відомо, що при температурі вище 100 °C багато забруднювачів, зокрема білкові залишки та залишки прополісу, піддаються розкладу без суттєвої шкоди для матриці воску. Застосування пароконвекційних камер із температурним моніторингом дозволяє досягати високої чистоти воску без потреби у хімічних реагентах [30, 31].

На перетині біотехнологій та матеріалознавства розвивається ще один інноваційний напрям – використання ензимів для розщеплення білкових та полісахаридних забруднень у восковій масі. Цей підхід вивчається в контексті створення біофільтраційних касет для високочутливих застосувань, однак потребує подальших досліджень з точки зору економіки процесу та стабільності ензимів у високотемпературному середовищі.

Таким чином, інноваційні підходи до очищення воску охоплюють широкий спектр фізико-хімічних, механічних і біотехнологічних рішень. Їх впровадження у виробничу практику дозволяє не лише підвищити якість готового продукту, але й зменшити втрати сировини, скоротити тривалість технологічного циклу та забезпечити відповідність міжнародним стандартам безпеки і чистоти. Перспективи розвитку полягають у поєднанні методів (гібридні системи), інтеграції цифрових технологій для керування процесами очищення та створенні стандартизованих модулів для малих пасік.

Побудований графік (рис. 2) відображає порівняльну ефективність та технологічні характеристики семи інноваційних методів очищення бджолиного воску, представлених у вигляді українських аббревіатур: ФС (фільтрація сітчаста), ПП (повторне плавлення), МЕ (метанольна екстракція), DES (екстракція глибокими евтектичними розчинниками), МС (мембранна сепарація), ПЕ (поетапна екстракція), ПК (пароконвекційна обробка). Кожен метод оцінено за трьома критеріями: ефективність очищення (%), тривалість технологічного процесу (у хвилинах) та умовні енергозатрати.

Найменшу ефективність продемонстрував базовий метод ФС (фільтрація через сітку 0.5 мм) – лише 60% очищення, при цьому середня тривалість становила 30 хв, а енергозатрати – 20 умовних одиниць. Метод ПП (повторне плавлення) забезпечує 70% ефективності, проте є одним з найенерговитратніших (40 од.) та найбільш тривалим (60 хв).

Метанольна екстракція (МЕ) значно підвищує якість очищення до 85%, скорочуючи процес до 45 хвилин, при енергозатратах у 35 одиниць. Технологія з використанням глибоких евтектичних розчинників (DES) досягає 88% очищення, при 40 хв тривалості процесу та дещо нижчих енергозатратах (30 од.).

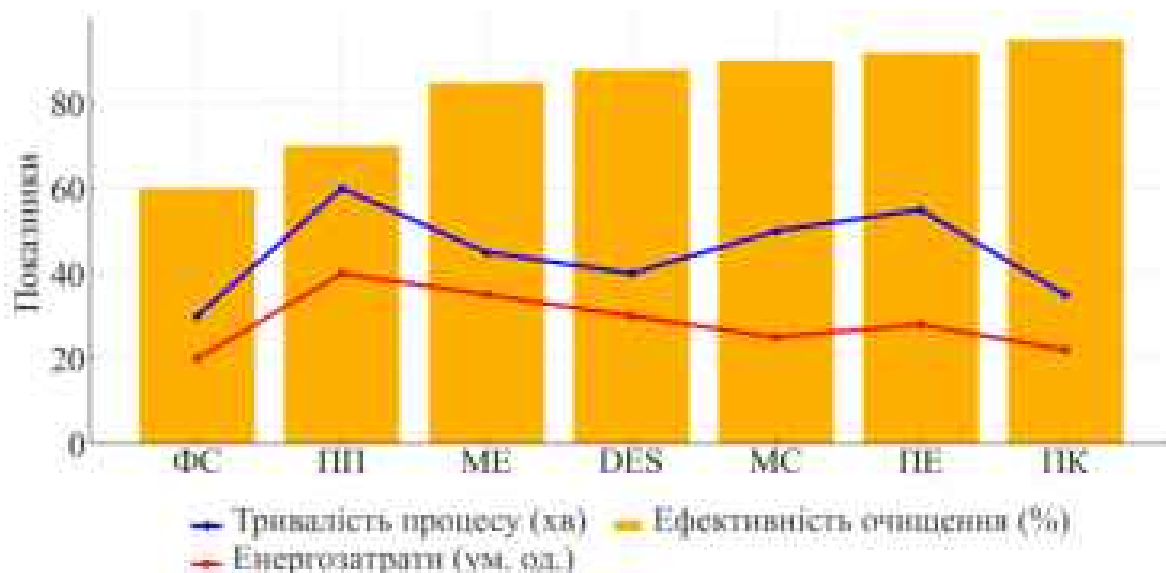


Рис. 2. Порівняння ефективності, тривалості та енерговитрат інноваційних методів очищення бджолиного воску: ФС – фільтрація сігчаста; ПП – повторне плавлення; МЕ – метанольна екстракція; DES – екстракція глибокими евтектичними розчинниками; МС – мембранна сепарація; ПЕ – поетапна екстракція; ПК – пароконвекційна обробка.

Більш технологічно просунутим є метод МС (мембранна сепарація), який забезпечує 90% очищення, із тривалістю процесу 50 хв та енергоспоживанням 25 одиниць. Поетапна екстракція (ПЕ) показує ще вищу ефективність – 92%, з енергозатратами на рівні 28 одиниць та тривалістю близько 55 хвилин.

Найкращі результати продемонстрував метод ПК (пароконвекційна обробка): ефективність очищення досягла 95%, процес триває лише 35 хвилин, а енергозатрати залишаються помірними – 22 одиниці. Це дозволяє вважати його оптимальним для високоякісної переробки воску, особливо в умовах малих і середніх виробництв.

Загалом графік свідчить про чітку тенденцію: із зростанням рівня технологічності методу зростає ефективність очищення, скорочуються енергозатрати та тривалість процесу. Найбільш збалансовані показники забезпечують мембранні, поетапні та пароконвекційні системи, що робить їх ключовими кандидатами для впровадження у сучасних виробничих лініях очищення бджолиного воску.

4. Застосування бджолиного воску в інженерії та енергетиці.

Бджолиний віск, окрім традиційного використання в бджільництві, косметології та фармацевтиці, все активніше впроваджується в інженерні технології та енергетичні системи, де його фізико-хімічні властивості – термічна інертність, гідрофобність, формостабільність, біосумісність і здатність до фазових переходів – відкривають нові можливості для інноваційного застосування.

Одним з найперспективніших напрямів є використання бджолиного воску як матеріалу для фазозмінних середовищ (PCM, Phase Change Materials) в системах акумулювання тепла. Віск має високу ентальпію плавлення (~141–170 J/g), стабільну температуру фазового переходу (~62–64 °C), відносно низьку теплопровідність і здатність до багаторазового плавлення без деградації структури [36, 65, 67]. Це робить його ідеальним для застосування у сонячних колекторах, теплообмінниках,

обігрівальних елементах підлоги, теплових буферах у будівництві та акумуляторах для електромобілів.

Для покращення теплопровідності воску та зниження ризику витоків у рідкому стані, розроблено композити на основі воску з додаванням графіту, оксидів металів, наночастинок або полімерних матриць. Наприклад, використання восково-графітових систем дозволяє підвищити теплопровідність у 2–3 рази та забезпечити стійкість до циклічних навантажень [49, 50, 67]. У дослідженнях Mishra et al. [58, 67] доведено ефективність таких композитів для систем охолодження літєвих батарей, де віск виконує функцію теплового буфера при короткочасних пікових навантаженнях.

Іншим прикладом інженерного використання є антикорозійні покриття на основі воску та його похідних. Завдяки водонепроникності й хімічній інертності, воскові покриття застосовуються для захисту металевих конструкцій, трубопроводів, гідравлічних систем, а також як ізоляційний шар в електротехніці [35, 64]. Додавання в композицію активованого вугілля або графену підвищує механічну міцність та адгезію до поверхні металів, що дозволяє створювати екологічно чисті альтернативи синтетичним лакам і фарбам.

У сфері адитивних технологій (3D-друк) бджолиний віск використовується як матеріал для створення тимчасових форм, розчинних каркасів, структур у литві за виплавлюваними моделями. Роботи Moreira et al. [26, 53] продемонстрували ефективність композитних воскових чорнил із додаванням графіту та графену для виготовлення паперових біосенсорів і електрохімічних датчиків.

У харчовій промисловості бджолиний віск застосовується для створення теплочутливих емульсійних структур, зокрема в якості стабілізатора водо-олійних емульсій, що реагують на зміну температури, змінюючи в'язкість і текстуру продукту. Наприклад, дослідження Zhang et al. [30, 45] показали, що введення воску в структуру харчових гелів на основі овальбуміну підвищує їх стабільність, пластичність і стійкість до температурних коливань.

У енергетиці також активно досліджується застосування бджолиного воску в системах сонячного нагріву повітря, зберігання відновлюваної енергії, вітроенергетики та міні-ТЕЦ, де віск використовується як теплоакumuлюючий блок з можливістю поступового вивільнення накопиченої енергії в нічний або піковий час [36, 37, 39].

Окремий напрям – використання воску як структурного компонента у біоадаптивних інженерних системах. Зокрема, дослідники Li et al. [70] створили фоточутливі композити на основі епоксидних смол, воску та мідної піни, які можуть використовуватись як змінні фази для теплообміну або реактивних поверхонь у гнучкій електроніці.

Таким чином, бджолиний віск набуває стратегічного значення в галузях, де важливими є терморегуляція, захист від вологи, біосумісність, відновлюваність і безпечність. Його універсальність, доступність та екологічність сприяють швидкому поширенню у складних інженерних задачах і рішеннях для сталого розвитку. Подальші дослідження мають бути зосереджені на вдосконаленні композитів, підвищенні стабільності під час фазових переходів і масштабуванні технологій виробництва для промислового застосування.

Систематизовано шість основних напрямів використання воску як технічного матеріалу, з урахуванням їх переваг, технологічних обмежень та конкретних прикладів застосування у промисловості (табл. 2).

Першим розглянуто напрям акумулювання тепла з використанням воску як фазозмінного матеріалу (PCM). Його ентальпія плавлення становить у середньому 141–170 Дж/г, а температура фазового переходу коливається в межах 62–64 °С. Серед ключових переваг – екологічність, стабільність до циклів нагрівання/охолодження і

можливість багаторазового використання без втрати властивостей. Недоліками є низька теплопровідність, яка потребує введення теплопровідних добавок (графіт, металеві наночастинки), а також обмеження у масштабуванні при використанні в системах великої потужності. Цей підхід успішно застосовується в системах опалення, будівельних теплоаккумуляторах, аккумуляторах для електромобілів.

Таблиця 2

Застосування бджолиного воску в інженерії та енергетиці

Напрямок застосування	Переваги	Недоліки, обмеження	Приклади застосування
Акумуляування тепла (PCM)	Висока ентальпія, екологічність, стабільність при плавленні	Низька теплопровідність, потреба в композитах	Системи опалення, батареї для ЕВ, буфери у будівництві
Антикорозійні покриття	Гідрофобність, адгезія до металів, біорозкладність	Чутливість до температури, обмежений термін служби	Захист труб, гідросистем, електроізоляція
Аддитивні технології (3D-друк)	Формостабільність, точність лиття, можливість композитування	Низька механічна міцність, потреба в добавках	Форми для лиття, біосенсори, воскові чорнила
Емульсії в харчовій промисловості	Стабільність структури, чутливість до температури	Вузкий температурний діапазон застосування	Гелі, стабілізатори текстури, упаковки
Сонячні теплоаккумулятори	Низька вартість, відновлюваність, сумісність з відновлюваними джерелами	Потреба в термостабілізаторах та контролі фазових переходів	Сонячні нагрівачі, міні-ТЕЦ, накопичувачі енергії
Гнучка електроніка, фоточутливі композити	Оптична активність, теплоаккумуляція, біосумісність	Складність масштабування, вартість матеріалів	Мікросенсори, розумний текстиль, адаптивні поверхні

Другий напрям – антикорозійні покриття, де воскові композиції використовуються як гідрофобний бар'єр на поверхнях труб, металоконструкцій, гідравлічних систем. Основна перевага – висока адгезія до металу, хімічна інертність і біорозкладність, що робить їх екологічною альтернативою синтетичним лакам. Проте термостійкість обмежена – при температурі вище 85 °С спостерігається розм'якшення або деградація воскового шару. Ці покриття застосовуються переважно в умовах помірного температурного навантаження.

У сфері адитивних технологій (3D-друк) бджолиний віск виступає як матеріал для створення тимчасових моделей і розчинних форм. Завдяки формостабільності та низькій температурі плавлення (~65 °С), він використовується для прецизійного лиття, а також як носій струму в біосенсорах, де композити з графітом демонструють провідність до 10^{-2} См/см.

Емульсійні системи, до складу яких входить віск, активно використовуються в харчовій інженерії як стабілізатори водо-олійних структур. Перевагами є висока в'язкість, термочутливість, яка дозволяє змінювати консистенцію продукту за температури 40–60 °С. Недоліком є обмежений температурний діапазон – за межами цього інтервалу емульсія втрачає стабільність. Такі системи застосовуються в упаковці, харчових гелях, захисних покриттях.

Напрямок сонячних теплоаккумуляторів базується на здатності воску накопичувати і повільно вивільняти тепло. Його низька вартість, відновлюваність та сумісність із сонячною енергетикою роблять його перспективним матеріалом для застосування в міні-ТЕЦ, теплогенераторах та нічному обігріві теплиць. Проте стабільність функціонування вимагає додавання термостабілізаторів, які перешкоджають повторній кристалізації воску при охолодженні.

Шостий напрям – гнучка електроніка та фоточутливі композити, де віск поєднують з епоксидними смолами, металевими пінами та сенсорами. Переваги – біосумісність, оптична активність та теплоаккумуляція, що дозволяє використовувати ці матеріали у виробництві розумного текстилю, мембран, адаптивних дисплеїв. Однак проблемою залишається висока вартість матеріалів і складність масштабування таких систем.

Таким чином, бджолиний віск уже не є суто бджільницьким продуктом – його активно інтегрують у високотехнологічні інженерні рішення, завдяки поєднанню природної відновлюваності та унікальних фізико-хімічних властивостей. Його використання у сфері РСМ, антикорозійних покриттів, 3D-друку, сонячної енергетики та гнучкої електроніки підтверджує універсальність матеріалу та його важливу роль у стратегіях сталого розвитку.

5. Соціально-економічні аспекти впровадження.

Інтенсифікація виробництва та впровадження сучасних технологій переробки бджолиного воску мають не лише технічне, а й важливе соціально-економічне значення для аграрного сектору, зокрема для розвитку малих і середніх пасічних господарств, сільських територій і професійної зайнятості населення. Створення ефективної системи збору, очищення та реалізації воску може стати джерелом сталого доходу для тисяч бджолярів і додатковим стимулом до кооперації.

Одним із ключових чинників є економічна доцільність впровадження новітніх технологій витоплення та очищення воску. За даними польових досліджень і проектних розрахунків, перехід від традиційних методів (варіння, сонячні воскотопки) до механізованих або комбінованих установок дозволяє збільшити вихід воску на 20–35%, зменшити втрати до менше ніж 5%, а також скоротити витрати часу на обробку сировини у 2–3 рази. Це створює умови для підвищення прибутковості пасіки (ЗПП) на 10–20% за сезон без залучення додаткової робочої сили, що особливо важливо для фермерських господарств із обмеженими людськими ресурсами.

На рівні сільських громад впровадження мобільних або стаціонарних воскопереробних пунктів стимулює розвиток кооперативного сектору (РК). Такі кластери можуть обслуговувати від 10 до 50 пасічників, забезпечуючи централізовану обробку сировини, стандартизацію продукції, скорочення витрат на індивідуальне обладнання та підвищення експортного потенціалу. Крім того, формування воскових кластерів сприяє локалізації доданої вартості, оскільки очищений віск може бути використаний для виробництва вошини, косметичних препаратів, свічок, упаковки, що збільшує прибуток місцевих підприємств.

З погляду зайнятості, технології переробки воску відкривають додаткові робочі місця (СРМ) у таких сферах, як технічне обслуговування обладнання, логістика,

вторинне виробництво (вощина, пакування), екологічний моніторинг якості сировини. За підрахунками кооперативних об'єднань в Україні та Естонії, впровадження кластерної моделі воскової переробки може створити одне робоче місце на кожні 30–40 пасічних господарств, що є вагомим внеском у боротьбу з сільським безробіттям.

Не менш важливою є соціальна інтеграція бджолярів, яку сприяє впровадження стандартизованих технологій. Завдяки об'єднанню у споживчі або виробничі кооперативи, пасічники отримують доступ до фінансових інструментів (грантів, кредитів), навчальних програм, технічного супроводу, що підвищує рівень інноваційної культури в агросекторі. Такі процеси сприяють підвищенню престижу професії пасічника (ППП), особливо серед молоді.

З екологічної точки зору, впровадження новітніх технологій дозволяє зменшити кількість відходів мери, знизити ризик бактеріологічного забруднення, а також уникнути забруднення води під час ручного витоплення. Це відповідає принципам екологічної відповідальності та зеленої трансформації сільського господарства (ЕБ), підтримуваних у межах політик ЄС та національних програм.

Таким чином, впровадження сучасних технологій переробки воску має багатовимірний соціально-економічний ефект: зростання прибутковості пасік (ЗПП), створення нових робочих місць (СРМ), розвиток кооперації (РК), активізація сільських громад і зниження екологічного навантаження (ЕБ). Це не лише шлях до технологічної модернізації бджільництва, а й важливий елемент сталого сільського розвитку в умовах сучасної аграрної трансформації.

На представленій круговій діаграмі (рис. 3) візуалізовано основні соціально-економічні ефекти впровадження сучасних технологій переробки бджолиного воску на рівні пасічного господарства, кооперативів і регіональної економіки. Всі показники подано умовно у відсотковому співвідношенні, що дозволяє оцінити внесок кожного чинника у загальний ефект.



Рис. 3. Ключові соціально-економічні ефекти впровадження технологій переробки бджолиного воску: ППП – підвищення престижу професії пасічника, ЕБ – забезпечення екологічної безпеки, РК – розвиток кооперації, СРМ – створення робочих місць, ЗВВ – зменшення втрат воску, ЗПП – зростання прибутковості пасіки.

Найбільший вклад (20%) має зростання прибутковості пасіки (ЗПП), обумовлене підвищенням виходу воску, зниженням втрат і скороченням витрат на ручну працю.

Ще 20% припадає на створення нових робочих місць (СРМ), що сприяє розвитку локальної економіки та боротьбі з безробіттям у сільських територіях.

Зменшення втрат воску (ЗВВ) забезпечує 15% впливу завдяки модернізації обладнання та оптимізації технологічних процесів.

Екологічна безпека (ЕБ) також оцінюється у 15% завдяки зменшенню забруднення водних ресурсів, скороченню кількості відходів і підвищенню санітарних стандартів.

Підвищення престижу професії пасічника (ППП) становить 15%, що виражається у зростанні попиту на професійну освіту, участі в міжнародних програмах і загальному поліпшенні іміджу бджільництва.

Таким чином, сукупний ефект від впровадження новітніх технологій у переробку бджолиного воску є комплексним і охоплює економічну, соціальну й екологічну сфери.

6. Інженерно-освітні перспективи.

Розвиток інженерних технологій у сфері переробки бджолиного воску супроводжується не лише технічними інноваціями, а й зростаючою потребою у формуванні відповідного освітнього та науково-кадрового забезпечення. В умовах трансформації аграрного сектору та впровадження принципів сталого виробництва виникає нова освітня парадигма, орієнтована на інтеграцію технічної підготовки з агроекологічним і підприємницьким мисленням.

Одним із першочергових завдань є створення сучасних освітніх програм для пасічників (ОПК), що охоплюють тематику енергоефективного обладнання, методів очищення воску, цифрового моніторингу технологічних процесів і контролю якості продукції. Такі програми мають поєднувати елементи професійної освіти (VET), неперервного навчання (Lifelong Learning) та технічної підготовки за стандартами агроінженерії. Доцільним є запровадження короткотермінових курсів, майстер-класів, літніх шкіл із використанням демонстраційних лабораторій і мобільних воскопереробних модулів.

Водночас сучасні вимоги вимагають інженерної міждисциплінарної підготовки (ІМП) техніків, інженерів та агроекономістів, здатних не лише обслуговувати обладнання, а й брати участь у його розробці, модифікації й адаптації до локальних умов. У цьому контексті важливо активізувати співпрацю університетів, інженерних факультетів, науково-дослідних центрів і виробничих підприємств. Особливо перспективними є дуальні освітні моделі (ДОМ), що передбачають поєднання навчання і практики безпосередньо на базі кооперативних господарств або інноваційних пасік.

Значну роль у поширенні технічних інновацій відіграють стартапи та інноваційні ініціативи (СІІ) у сфері агроінженерії. Програми Erasmus+, MSCA Staff Exchanges і «Інноваційні ваучери» створюють можливості для розробки експериментального обладнання: мобільних центрифуг, компактних воскотопок, багатофункціональних установок для мікропереробки та інноваційних фільтраційних систем. Фінансова підтримка таких ініціатив є ключовою для технічної трансформації сільських територій.

Наукові дослідження та аспірантура (НДА) також є фундаментальним елементом розвитку технологій. Актуальними є дослідження з моделювання теплових процесів, оптимізації енергоспоживання, використання безконтактних сенсорів, розробки алгоритмів штучного інтелекту для моніторингу якості воску. Залучення

молодих науковців і аспірантів дозволяє формувати критичну масу знань для подальших інновацій.

Цифровізація навчання (ЦН) виступає важливою передумовою масового поширення знань. Створення відкритих онлайн-курсів, інтерактивних тренажерів, 3D-моделей обладнання та відеоінструкцій значно розширює доступ до технічної освіти, особливо у віддалених регіонах.

Таким чином, інженерно-освітні перспективи розвитку технологій переробки бджолиного воску полягають у формуванні сучасної технічної культури, підтримці молодіжних ініціатив, інтеграції академічної науки й цифровізації навчального процесу. Це забезпечує не тільки технічну модернізацію бджільництва, а й загальне підвищення конкурентоспроможності аграрного сектору в умовах викликів XXI століття.

Кругова діаграма «Основні напрями розвитку освіти у сфері бджільництва» (рис. 4) ілюструє умовну структуру пріоритетів і потенціалу інвестування в людський капітал. Усі показники подані у відсотковому співвідношенні, що дозволяє порівняти значущість кожного напрямку в загальній стратегії розвитку.

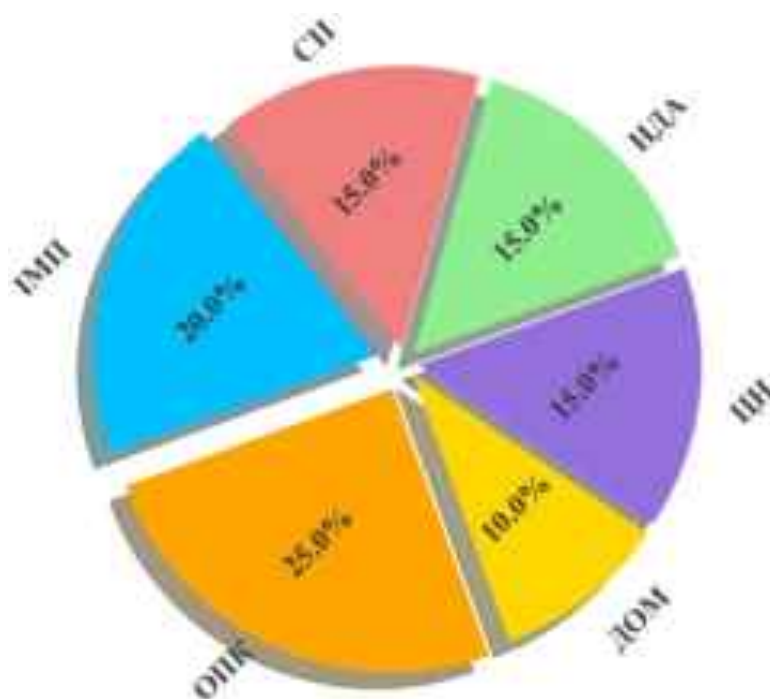


Рис. 4. Основні напрями розвитку освіти у сфері бджільництва: ДОМ – дуальні освітні моделі, ЦН – цифровізація навчання (онлайн-платформи), НДА – наукові дослідження та аспірантура, СІІ – стартапи та інноваційні ініціативи, ІМП – інженерна міждисциплінарна підготовка, ОПК – освіта пасічників (VET, курси).

Найбільшу частку (25%) займає освіта пасічників (ОПК), що передбачає професійно-технічне навчання, курси підвищення кваліфікації та тренінги з інженерної безпеки.

Інженерна міждисциплінарна підготовка (ІМП) становить 20%, формуючи фахівців, здатних інтегрувати агроінженерію, автоматизацію, матеріалознавство та економіку.

Стартапи та інноваційні ініціативи (СІІ) і наукові дослідження та аспірантура (НДА) мають однакову вагу (15%), забезпечуючи інженерну креативність і наукове підґрунтя для розвитку нових технологій.

Цифровізація навчання (ЦН) також оцінена у 15% і включає створення освітніх платформ та інтерактивних навчальних ресурсів.

Дуальні освітні моделі (ДОМ) займають 10%, сприяючи інтеграції студентів у виробничі процеси та пришвидшенню адаптації молодих спеціалістів.

У сукупності ці напрями формують збалансовану освітньо-інженерну екосистему, що сприяє сталому розвитку переробки бджолиного воску та підвищенню інноваційного потенціалу аграрного сектору.

Обговорення

Аналіз сучасного стану технологій витоплення та очищення бджолиного воску свідчить про існування значного потенціалу для технічного вдосконалення, особливо в умовах малих та середніх пасік. Згідно з оглядом [1], застосування мікрохвильової екстракції полікозанолів із воску відкриває нові можливості для фармацевтичного використання побічної сировини, тоді як класичні методи, зокрема варіння та осадження, значною мірою втрачають актуальність через високі втрати продукту і значні енерговитрати.

Підтвердженням тенденції переходу до високотехнологічних рішень є дослідження Mu et al. [3], у якому використання глибоких евтектичних розчинників у поєднанні з UHPLC-MS/MS дозволило ефективно вилучати залишки неонікотиніодів із воскової матриці, що свідчить про актуальність інтегрованих хіміко-аналітичних рішень для очищення сировини. Це особливо важливо у контексті зростаючих екологічних вимог до агропродукції, включаючи косметичну, фармацевтичну та харчову промисловість [13, 14].

Інженерні розробки, такі як мембранна сепарація, поетапна екстракція та пароконвекційні установки, демонструють високий рівень ефективності – до 95% очищення за значного зниження енергоспоживання та тривалості технологічного циклу [36, 39]. Дослідження в [20, 23] вказують на те, що використання метанольної екстракції у пілотних масштабах здатне забезпечити якість воску, придатну для повторного використання в апітерапевтичних цілях або для виготовлення вошини без додаткових етапів фільтрації.

Крім технологічних інновацій, важливу роль відіграє соціально-економічний контекст впровадження. Як показує статистика регіональних кооперативів, модернізація воскотопного обладнання дозволяє підвищити прибутковість господарств у середньому на 15–20%, зменшити трудові витрати та створити від 1 до 3 нових робочих місць на кожен кластер із 30 пасік [69]. Подібні моделі вже реалізовані в Ефіопії та Занзібарі, що підтверджено результатами польових програм [16, 21, 69].

Інноваційність в обробці воску не обмежується лише механізацією – вона охоплює розробку композитів для зберігання тепла, що використовуються як РСМ-матеріали в енергетичних системах. Зокрема, експерименти з восково-графітовими мікрокапсулами показали високу ентальпію збереження тепла (до 170 Дж/г) при стабільній температурі плавлення, що робить їх придатними для застосування в сонячних колекторах і системах опалення на біоснові [49, 67].

Окремої уваги заслуговує освітній компонент, який виступає ключовим чинником для сталого технологічного розвитку. За даними міжнародних освітніх програм (MSCA, Erasmus+), інтеграція технічних курсів до VET-програм, створення лабораторій на базі кооперативів і впровадження дуального навчання дозволяє формувати покоління бджолярів, здатних не лише користуватись обладнанням, а й оцінювати його ефективність і вплив на довкілля [72, 74].

Крім того, розвиток відкритих цифрових платформ і навчальних симуляторів (3D, AR/VR) підтримує цифрову трансформацію освіти, що має ключове значення для залучення молоді до агроінженерії та модернізації регіональної пасічної інфраструктури [80]. Як засвідчують результати опитувань пасічників у ЄС і країнах Східної Африки, саме технічна невідповідність і брак доступу до освітніх матеріалів є основними бар'єрами для впровадження нових технологій.

Загалом результати аналізу доводять, що комплексна модернізація обладнання, поєднана з освітніми, економічними та екологічними стимулами, дозволяє сформувати замкнутий, сталий та рентабельний цикл воскової переробки – від отримання сировини до реалізації високоякісного продукту. Подальші дослідження доцільно орієнтувати на створення інтегрованих технологічних платформ, які об'єднуюватимуть переробку, фільтрацію, сертифікацію та логістику в одному адаптивному модулі.

Висновки

1. Бджолиний віск є стратегічно важливою біосировиною, яка має не лише пасічне, а й багатогалузеве промислове значення. Його фізико-хімічні властивості – пластичність, термічна стабільність, біоінертність – забезпечують широке застосування в енергетиці, косметології, харчовій та електронній промисловості, що обумовлює необхідність підвищення ефективності його переробки.

2. Проведений аналіз технологій витоплення воску засвідчив, що традиційні методи (варіння, сонячні воскотопки) є морально застарілими, мають низьку продуктивність та високі втрати продукту (до 30%). Натомість сучасні інженерні рішення – пароконвекційні, центробіжні та комбіновані установки – забезпечують до 95% очищення, знижуючи енерговитрати до 20–30 умовних одиниць та скорочуючи тривалість процесу до 35–45 хвилин.

3. Інноваційні підходи до очищення воску – зокрема застосування глибоких евтектичних розчинників, метанольної екстракції, мембранної сепарації – дозволяють досягати високої чистоти продукту, придатного для фармацевтичного та харчового використання. Впровадження таких методів потребує інтеграції аналітичного контролю (UHPLC-MS/MS, FTIR, Raman), що підтверджено у сучасних дослідженнях [3, 13, 14].

4. Модернізація конструкцій обладнання – через використання теплоізоляційних кожухів, автоматичних систем подачі пари, енергозберігаючих приводів та фільтраційних модулів – є ключовим чинником підвищення технологічної ефективності. Розробка компактних багатфункціональних агрегатів відкриває можливості для їх широкого впровадження на малих та середніх пасіках.

5. Застосування воску в інженерії та енергетиці (зокрема, як PCM-матеріалу у системах зберігання тепла, у виробництві захисних покриттів, композитів для 3D-друку) демонструє зростаючу роль бджолиного воску у високотехнологічних галузях. Це вимагає нових підходів до очищення, стандартизації та функціоналізації воскової сировини.

6. Соціально-економічний аналіз довів, що впровадження сучасних технологій у переробку воску збільшує прибутковість пасік на 15–20%, створює додаткові робочі місця, стимулює розвиток кооперативів і знижує екологічні ризики. Особливо перспективним є кластерний підхід до централізованої обробки сировини.

7. Інженерно-освітні перспективи базуються на розвитку професійних освітніх програм, дуального навчання, залученні молоді до технічної творчості, а також створенні цифрових навчальних платформ. Інтеграція інженерії, агротехнологій і цифрової освіти є основою для формування сталого та високотехнологічного бджільництва.

8. Узагальнено, що ефективне використання потенціалу бджолиного воску можливе лише за умови технологічної модернізації, інституційної підтримки інновацій, професійної підготовки кадрів та збалансованого поєднання економіки, екології та освіти. Подальші дослідження мають бути спрямовані на створення модульних систем переробки, адаптованих до умов децентралізованого агровиробництва.

Список використаних джерел

1. Venturelli, A., Brighenti, V., Mascolo, D., & Pellati, F. A new strategy based on microwave-assisted technology for the extraction and purification of beeswax policosanols for pharmaceutical purposes and beyond. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. (2019). 172. 200–205. <https://doi.org/10.1016/J.JPBA.2019.04.015>.
2. Naik, S., & Pargunde, S. Physico-chemical Analysis of beeswax procured from Mumbai market, Western Ghats (Natural Habitat). *Journal of Ayurveda and Integrated Medical Sciences (JAIMS)*. (2020). <https://doi.org/10.21760/jaims.5.5.26>.
3. Mu, G., Yan, S., Pan, F., Xu, H., Jing, X., & Xue, X. Based on theoretical design simultaneous analysis of multiple neonicotinoid pesticides in beeswax by deep eutectic solvents extraction combined with UHPLC-MS/MS. *Food Chemistry: X*. (2024). 25. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.102073>.
4. Nunut, I., Whulanza, Y., & Kassegne, S. Testing of Beeswax Printing Technology in the Design of a Paper-Based Microfluidic System. *International Journal of Technology*. (2020). 11(5). <https://doi.org/10.14716/ijtech.v11i5.4336>.
5. Cho, K.-H., Bahuguna, A., Lee, Y., Lee, S. H., & Kim, J.-E. Twenty-week dietary supplementation with beeswax alcohol (BWA; Raydel®) ameliorates high-cholesterol-induced long-term dyslipidemia and organ damage in hyperlipidemic zebrafish. *Pharmaceuticals*. (2024). 17(11). <https://doi.org/10.3390/ph17111434>.
6. Shegaw, T. Evaluation of physico chemical qualities of beeswax in selected districts of Kafa Zone, Southern Nations Nationalities and Peoples Region (SNNPR), Ethiopia. *Chemistry and Materials Research*. (2020). 12(1). <https://doi.org/10.7176/cmr/12-1-01>.
7. Naderizadeh, S., Naderizadeh, S., Heredia-Guerrero, J. A., Caputo, G., Grasselli, S., Malchiodi, A., Athanassiou, A., & Bayer, I. S. Superhydrophobic coatings from beeswax-in-water emulsions with latent heat storage capability. *Advanced Materials Interfaces*. (2019). 6(2). <https://doi.org/10.1002/admi.201801782>.
8. Felicioli, A., Cilia, G., Mancini, S., Turchi, B., Galaverna, G., Cirlini, M., Cerri, D., & Fratini, F. In vitro antibacterial activity and volatile characterisation of organic *Apis mellifera ligustica* beeswax ethanol extracts. *Food Bioscience*. (2019). <https://doi.org/10.1016/J.FBIO.2019.04.004>.
9. Giampieri, F., Quiles, J., Orantes-Bermejo, F. J., Gasparrini, M., Forbes-Hernández, T. Y., Sánchez-González, C., ... & Battino, M. Are by-products from beeswax recycling process a promising source of bioactive compounds? *Food and Chemical Toxicology*. (2018). 112. 126–133. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2017.12.041>.
10. Hakim, R. J., Nugrahani, R. A., & Fithriyah, N. Performance of lecithin isolate from vegetable oil as an emulsifier on the beeswax coating characteristics. *International Journal of ChemTech Research*. (2020). 13(3). <https://doi.org/10.20902/ijctr.2019.130307>.
11. Pre-Extension Demonstration of Crude Beeswax Extraction Technology in Ilu Gelan District, West Shewa Zone, Oromia Regional State, Ethiopia. *World Journal of Food Science and Technology*. (2024). 8(4), 79–85. <https://doi.org/10.11648/j.wjfst.20240804.12>.
12. Meseret. Evaluation of the quality of beeswax from different sources and rendering methods. *American Journal of Agricultural Research*. (2019). 4(2). <https://doi.org/10.28933/AJAR-2019-02-1106>.

-
13. Schaeffer, C., Schummer, C., Scholer, S., van Nieuwenhuyse, A., & Pincemaille, J. Evaluation of environmental contamination in beeswax products. *Journal of Chromatography B*. (2024). 1244. 124243. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2024.124243>
 14. Tu, X., Du, C., He, Y., Yang, J., Chen, J., Jin, Q., Xie, L., Zuo, Y., Huang, S., & Chen, W. Determination of bisphenols in beeswax based on sugaring out-assisted liquid-liquid extraction. *Chemosphere*. (2024). 349. 141274. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141274>
 15. Tran, H. D., Le, H. M., Mai, C. H., & Nguyen, V. Physicochemical properties of beeswax: The effects of cooking methods and harvesting positions. *Journal of Oleo Science*. (2023). 72(10), 979–984. <https://doi.org/10.5650/jos.ess23115>
 16. Shegaw, T., & Edimew, T. Assessment on production, processing and marketing status of beeswax in Kafa Zone, Ethiopia. *American Journal of Agriculture and Forestry*. (2021). 9(4). <https://doi.org/10.11648/J.AJAF.20210904.12>
 17. Špaldoňová, A., Havelková, M., Lapčák, L., Machovič, V., & Tišera, D. Analysis of beeswax adulteration with paraffin using GC/MS, FTIR-ATR and Raman spectroscopy. *Journal of Apicultural Research*. (2021). 60(1). 73–83. <https://doi.org/10.1080/00218839.2020.1774152>
 18. Brito-Pereira, R., Ribeiro, C., Tubio, C., Castro, N., Costa, P., & Lanceros-Méndez, S. Beeswax multifunctional composites with thermal-healing capability and recyclability. *Chemical Engineering Journal*. (2022). 446. 139840. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139840>
 19. Calatayud-Vernich, P., vanEngelsdorp, D., & Picó, Y. Beeswax cleaning by solvent extraction of pesticides. *Methods X*. (2019). 6. 980–985. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.04.022>
 20. Luna, A., Alonso, R., Cutillas, V., Ferrer, C., Gómez-Ramos, M., Hernando, D., Valverde, A., Flores, J. M., Fernández-Alba, A., & Rodríguez Fernández-Alba, A. Removal of pesticide residues from beeswax using a methanol extraction-based procedure: A pilot-scale study. *Environmental Technology & Innovation*. (2021). 23. 101606. <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2021.101606>
 21. Biyena, L. Pre-extension demonstration of crude beeswax extraction technology in Ilu Gelan District, West Shewa Zone, Oromia Regional State, Ethiopia. *World Journal of Food Science and Technology*. (2024). <https://doi.org/10.11648/j.wjfst.20240804.12>
 22. Hosseini, S. F., Mousavi, Z., & McClements, D. Beeswax: A review on the recent progress in the development of superhydrophobic films/coatings and their applications in fruits preservation. *Food Chemistry*. (2023). 424. 136404. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136404>
 23. Luna, A., Alonso, R., Cutillas, V., Ferrer, C., Gómez-Ramos, M., Hernando, D., ... & Rodríguez Fernández-Alba, A. Removal of pesticide residues from beeswax using a methanol extraction-based procedure: A pilot-scale study. *Environmental Technology & Innovation*. (2021). 23. 101606. <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2021.101606>
 24. Kryński, K., & Kowaluk, G. Application of beeswax as a hydrophobic agent in MDF technology. *Annals of WULS, Forestry and Wood Technology*. (2021). <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.2375>
 25. Gupta, G., & Anjali, K. Environmentally Friendly Beeswax: Properties, Composition, Adulteration, and its Therapeutic Benefits. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. (2023). 1110. 012041. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1110/1/012041>
 26. Moreira, C. M., Scala-Benuzzi, M. L., Takara, E., Raba, J., Bertolino, F., & Messina, G. A. Novel solid inks based on beeswax, graphite and graphene applied to the

fabrication of paper-based sensor for galactose determination. *Talanta*. (2023). 257. 124372. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2023.124372>

27. Tran, H. D., Le, H. M., Mai, C. H., & Nguyen, V. Physicochemical properties of beeswax: The effects of cooking methods and harvesting positions. *Journal of Oleo Science*. (2023). 72(10). 979–984. <https://doi.org/10.5650/jos.ess23115>

28. Al-Rajhi, M. A. I., EL_SEREY, S., & Elsheikha, A. Application of Solar Energy to Liquify Beeswax. *Turkish Journal of Agricultural Engineering Research*. (2023). <https://doi.org/10.46592/turkager.1343229>

29. Luo, X., Dong, Y., Gu, C., Zhang, X., & Ma, H. Processing technologies for bee products: An overview of recent developments and perspectives. *Frontiers in Nutrition*. (2021). 8. 727181. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.727181>

30. Zhang, R. H., Liu, J., Yan, Z. N., Jiang, H., Wu, J., Zhang, T., Wang, E., & Liu, X. Tailoring a novel ovalbumin emulsion gel for stability improvement and functional properties enhancement: Effect of oil phase structure changes by beeswax. *Food Chemistry*. (2023). 426. 136575. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136575>

31. Tu, X., Du, C., He, Y., Yang, J., Chen, J., Jin, Q., Xie, L., Zuo, Y., Huang, S., & Chen, W. Determination of bisphenols in beeswax based on sugaring out-assisted liquid-liquid extraction. *Chemosphere*. (2024). 349. 141274. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141274>

32. Sousa, T. M., Melo Neto, O. M., Lucena, A. E. F. L., & Nóbrega, E. R. Enhancing workability and sustainability of asphalt mixtures: Investigating the performance of beeswax as a novel additive for warm mix asphalt. *Construction and Building Materials*. (2023). 389. 133306. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133306>

33. Mahottamananda, S. N., Pal, Y., Dinesh, M., & Ingenito, A. Beeswax–EVA/Activated-Charcoal-Based Fuels for Hybrid Rockets: Thermal and Ballistic Evaluation. *Energies*. (2022). 15(20). 7578. <https://doi.org/10.3390/en15207578>

34. Gajda, A., Antczak, M., Mitrowska, K., & Posyniak, A. Development, validation and application of LC-MS/MS method for the determination of tetracyclines in beeswax. *Journal of Separation Science*. (2018). 41(20). 3821–3829. <https://doi.org/10.1002/jssc.201800503>

35. Jawad, A., Aljibori, H. S., Obeed, H. H., Kadhum, A., Al-Attar, B., Abdulzahra, O. H., Gaaz, T., & Al-amiry, A. Beeswax Material as Corrosion Inhibitor in a Brake Oil System. *Journal of Hunan University Natural Sciences*. (2022). 49(4). <https://doi.org/10.55463/issn.1674-2974.49.4.4>

36. Abdulmunem, A. R., Mazali, I., Samin, P. M., & Sopian, K. Beeswax as a sustainable thermal energy storage material: Experimental thermal assessment in solar air heater. *Journal of Energy Storage*. (2024). 82. 114398. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114398>

37. Belgacem, S. B., Trigui, A., Jedidi, I., Loukil, M. S., Calmunger, M., & Abdmouleh, M. Enhancing thermal energy storage properties of blend phase change materials using beeswax. *Environmental Science and Pollution Research*. (2024). <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34591-1>

38. Al-Rajhi, M. A. I., El_SEREY, S., & Elsheikha, A. Application of Solar Energy to Liquify Beewax. *Turkish Journal of Agricultural Engineering Research*. (2023). <https://doi.org/10.46592/turkager.1343229>

39. Mishra, D., Bhowmik, S., & Pandey, K. Analysis of heat transfer rate for different annulus shape-enhanced beeswax-based phase change material for thermal energy storage. *Mathematical Problems in Engineering*. (2022). <https://doi.org/10.1155/2022/6123472>

40. Ertürk, Ö., Keskin, M., Birinci, C., & Kolaylı, S. Comparison of physiochemical, biochemical and antimicrobial properties of natural and artificial *Apis mellifera* L. beeswax.

Journal of the Hellenic Veterinary Medical Society. (2024).
<https://doi.org/10.12681/jhvms.34663>

41. Biyena, L. Pre-extension demonstration of crude beeswax extraction technology in Ilu Gelan District, West Shewa Zone, Oromia Regional State, Ethiopia. *World Journal of Food Science and Technology*. (2024). <https://doi.org/10.11648/j.wjfst.20240804.12>

42. Nong, Y., Maloh, J., Natarelli, N., Gunt, H., Tristani, E. M., & Sivamani, R. A review of the use of beeswax in skincare. *Journal of Cosmetic Dermatology*. (2023). 22. 2166–2173. <https://doi.org/10.1111/jocd.15718>

43. Alrabaiah, H. A., & Medina-Medina, N. Agile Beeswax: Mobile app development process and empirical study in real environment. *Sustainability*. (2021). 13. 1909. <https://doi.org/10.3390/su13041909>

44. Lindermann, L., Eckert, J. H., Alkassab, A., Bischoff, G., Kreuzig, R., & Pistorius, J. Investigating the transfer of acaricides from beeswax into honey, nectar, bee bread, royal jelly and worker jelly. *Journal of Plant Diseases and Protection*. (2018). 465. 63. <https://doi.org/10.5073/JKA.2020.465.063>

45. Zhang, R. H., Liu, J., Yan, Z. N., Jiang, H., Wu, J., Zhang, T., Wang, E., & Liu, X. Tailoring a novel ovalbumin emulsion gel for stability improvement and functional properties enhancement: Effect of oil phase structure changes by beeswax. *Food Chemistry*. (2023). 426. 136575. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136575>

46. Gupta, G., & Anjali, K. Environmentally Friendly Beeswax: Properties, Composition, Adulteration, and its Therapeutic Benefits. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. (2023). 1110. 012041. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1110/1/012041>

47. Al-Rajhi, M. A. I., EL_SEREY, S., & Elsheikha, A. Application of solar energy to liquify beeswax. *Turkish Journal of Agricultural Engineering Research*. (2023). <https://doi.org/10.46592/turkager.1343229>

48. Bednarzewska, K. Business model of a patented invention developed at a university on the example of the “WAXO” beeswax quality analyzer. *Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series*. (2024). <https://doi.org/10.29119/1641-3466.2024.198.1>

49. Amberkar, T., & Mahanwar, P. Study of thermal energy storing beeswax microcapsules by in situ polymerization method. *Research Journal of Chemistry and Environment*. (2022). <https://doi.org/10.25303/2603rjce2936>

50. Amberkar, T., & Mahanwar, P. Microencapsulation study of bioderived phase change material beeswax with ethyl cellulose shell for thermal energy storage applications. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. (2023). 45. 11803–11818. <https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2265323>

51. Eshete, Y., & Eshete, T. A review on crude beeswax mismanagement and lose: Opportunities for collection, processing and marketing in Ethiopia. *Journal of Nutritional Health & Food Engineering*. (2018). 8. <https://doi.org/10.15406/JNHFE.2018.08.00300>

52. Shpychak, O. Mathematical design of the experiment in the development of technology of beeswax obtaining from propolis. *Journal of Global Pharma Technology*. (2018). <https://doi.org/10.26538/jgpt.2020.12.2>

53. Moreira, C. M., Scala-Benuzzi, M. L., Takara, E., Raba, J., Bertolino, F., & Messina, G. A. Novel solid inks based on beeswax, graphite and graphene applied to the fabrication of paper-based sensor for galactose determination. *Talanta*. (2023). 257. 124372. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2023.124372>

54. Luo, X., Dong, Y., Gu, C., Zhang, X., & Ma, H. Processing technologies for bee products: An overview of recent developments and perspectives. *Frontiers in Nutrition*. (2021). 8. 727181. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.727181>

-
55. Nunut, I., Whulanza, Y., & Kassegne, S. Testing of beeswax printing technology in the design of a paper-based microfluidic system. *International Journal of Technology*. (2020). 11(5). <https://doi.org/10.14716/ijtech.v11i5.4336>
56. Shegaw, T., & Edimew, T. Assessment on production, processing and marketing status of beeswax in Kafa Zone, Southern Nations Nationalities and Peoples Region (SNNPR), Ethiopia. *American Journal of Agriculture and Forestry*. (2021). 9(4). <https://doi.org/10.11648/J.AJAF.20210904.12>
57. Gao, Y., Lei, Y., Wu, Y., Liang, H., Li, J., Pei, Y., Li, Y., Li, B., Luo, X., & Liu, S. Beeswax: A potential self-emulsifying agent for the construction of thermal-sensitive food W/O emulsion. *Food Chemistry*. (2021). 349. 129203. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129203>
58. Mishra, D., Bhowmik, S., & Pandey, K. M. Numerical investigation of beeswax-based phase change material for thermal management of li-ion battery. *Materials Today: Proceedings*. (2020). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.455>
59. Brito-Pereira, R., Ribeiro, C., Tubio, C., Castro, N., Costa, P., & Lanceros-Méndez, S. Beeswax multifunctional composites with thermal-healing capability and recyclability. *Chemical Engineering Journal*. (2022). 446. 139840. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139840>
60. Márquez-Osuna, A. Beekeeping from the South. *Agricultural History*. (2024). <https://doi.org/10.1215/00021482-10910295>
61. Mu, G., Yan, S., Pan, F., Xu, H., Jing, X., & Xue, X. Based on theoretical design simultaneous analysis of multiple neonicotinoid pesticides in beeswax by deep eutectic solvents extraction combined with UHPLC-MS/MS. *Food Chemistry: X*. (2024). 25. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.102073>
62. Cho, K.-H., Bahuguna, A., Lee, Y., Lee, S. H., & Kim, J.-E. Twenty-week dietary supplementation with beeswax alcohol (BWA; Raydel®) ameliorates high-cholesterol-induced long-term dyslipidemia and organ damage in hyperlipidemic zebrafish. *Pharmaceuticals*. (2024). 17. <https://doi.org/10.3390/ph17111434>
63. Agbo, C., Ngwu, M., Anyaji, U., Ubahakwe, C., Asogwa, G. N., Akpa, P., Nnamani, P., Ofokansi, K., & Attama, A. Preparation of lipid-based formulations using local beeswax sourced from honeycombs. *African Journal of Pharmaceutical Research and Development*. (2024). <https://doi.org/10.59493/ajopred/2024.2.8>
64. Rajitha, K., Mohana, K., Nayak, S. R., Hegde, M., & Madhusudhana, A. M. An efficient and eco-friendly anti-corrosive system based on beeswax-graphene oxide nanocomposites on mild steel in saline medium. *Surfaces and Interfaces*. (2020). 18, 100393. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2019.100393>
65. Rashid, F., & Al-Obaidi, M. Recent innovations and developments concerning the beeswax as phase change material for thermal energy storage: A review. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. (2023). 148. 12859–12876. <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12556-9>
66. Valverde, S., Ares, A., Bernal, J., Nozal, M. J., & Bernal, J. Fast determination of neonicotinoid insecticides in beeswax by UHPLC-MS/MS using enhanced matrix removal-lipid sorbent. *Microchemical Journal*. (2018). <https://doi.org/10.1016/J.MICROC.2018.06.020>
67. Mishra, D., Bhowmik, S., & Pandey, K. Development and assessment of beeswax/expanded graphite composite phase change material for thermal energy storage. *Arabian Journal for Science and Engineering*. (2022). 47. 8985–9004. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06476-9>
68. Kaur, K., Gupta, N., Mahajan, M., Jawandha, S. K., & Kaur, N. A novel edible coating of beeswax impregnated with karonda polyphenol rich extract maintains the chemical

and bioactive potential of fresh ber fruit. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*. (2023). <https://doi.org/10.1007/s13580-023-00533-y>

69. Juma, S. M., Ali, A. I., Khamis, S., Rashid, R., & Kombo, M. D. Assessment of value chain for honey and beeswax initiatives in Zanzibar. *European Journal of Agriculture and Food Sciences*. (2022). <https://doi.org/10.24018/ejfood.2022.4.1.423>

70. Li, Y., Fan, Y., Liu, Z., Zhang, J., Cheng, J., & Lian, Q. Photo-curable bio-based comb/bottle brush epoxy resin/beeswax/copper foam phase change materials with high enthalpy value and multifunctional properties. *Composites Science and Technology*. (2024). <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2024.110506>

71. Nayana, N. P., Ramachandra, C. T., Maheshkumar, G., Bhatt, S. N., & Manvi, D. Design, development, and testing of 3D printed honeycomb for *Apis cerana indica*. *Sustainable Materials and Technologies*. (2024). <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e01220>

72. Rathgeb, A., Palmtag, A., Kaminski, S., & Jupke, A. Design of extractive reaction systems. *Chemie Ingenieur Technik*. (2019). <https://doi.org/10.1002/cite.201900163>

73. Szymaniak, M. Steam turbine stage modernisation in front of the extraction point. *Polish Maritime Research*. (2018). 25. 116–122. <https://doi.org/10.2478/pomr-2018-0062>

74. Abdumannonovich, A. B., Mansurovich, S. H., & Mahmudovich, M. I. Development of high-efficiency extraction equipment and prospects for industrial application of extractors with pneumatic fluid mixing. *Turkish Journal of Engineering and Technology*. (2021). 3(4). 95–101. <https://doi.org/10.37547/TAJET/VOLUME03ISSUE04-15>

75. Tukaeva, R., Afanasenko, V., & Yunusova, Y. L. Vibro packed column equipment for mass transfer processes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. (2019). 272. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/272/3/032069>

76. Amiebenomo, S. O. Design and performance evaluation of a multi-fruit juice extraction machine. *American Journal of Innovation in Science and Engineering*. (2025). <https://doi.org/10.54536/ajise.v4il.3742>

77. Qi, D. Equipment in rare-earth solvent extraction-separation process: Mixer-settler of solvent extraction. Elsevier Chapter. (2018). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813920-2.00005-2>

78. Bose, G., Pain, P., & Roy, S. Bio-inspired meta-heuristic multi-objective optimization of EDM process. *Advances in Civil and Industrial Engineering*. (2019). <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-8223-6.CH014>

79. Li, Y., Yang, J., & Gao, S. Equipment based on bee colony model. *Uludağ Arıcılık Dergisi*. (2022). <https://doi.org/10.31467/uluaricilik.1153269>

80. Akay, H., Yang, M. C., & Kim, S.-G. Automating design requirement extraction from text with deep learning. *ASME 2021 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE)*. (2021). <https://doi.org/10.1115/detc2021-66898>.

References

1. Venturelli, A., Brighenti, V., Mascolo, D., & Pellati, F. (2019). A new strategy based on microwave-assisted technology for the extraction and purification of beeswax policosanols for pharmaceutical purposes and beyond. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 172, 200–205. <https://doi.org/10.1016/J.JPBA.2019.04.015>.

2. Naik, S., & Pargunde, S. (2020). Physico-chemical Analysis of beeswax procured from Mumbai market, Western Ghats (Natural Habitat). *Journal of Ayurveda and Integrated Medical Sciences (JAIMS)*. <https://doi.org/10.21760/jaims.5.5.26>.

3. Mu, G., Yan, S., Pan, F., Xu, H., Jing, X., & Xue, X. (2024). Based on theoretical design simultaneous analysis of multiple neonicotinoid pesticides in beeswax by deep eutectic solvents extraction combined with UHPLC-MS/MS. *Food Chemistry*: X, 25. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.102073>
4. Nunut, I., Whulanza, Y., & Kassegne, S. (2020). Testing of Beeswax Printing Technology in the Design of a Paper-Based Microfluidic System. *International Journal of Technology*, 11(5). <https://doi.org/10.14716/ijtech.v11i5.4336>
5. Cho, K.-H., Bahuguna, A., Lee, Y., Lee, S. H., & Kim, J.-E. (2024). Twenty-week dietary supplementation with beeswax alcohol (BWA; Raydel®) ameliorates high-cholesterol-induced long-term dyslipidemia and organ damage in hyperlipidemic zebrafish. *Pharmaceuticals*, 17(11). <https://doi.org/10.3390/ph17111434>
6. Shegaw, T. (2020). Evaluation of physico chemical qualities of beeswax in selected districts of Kafa Zone, Southern Nations Nationalities and Peoples Region (SNNPR), Ethiopia. *Chemistry and Materials Research*, 12(1). <https://doi.org/10.7176/cmrr/12-1-01>
7. Naderizadeh, S., Naderizadeh, S., Heredia-Guerrero, J. A., Caputo, G., Grasselli, S., Malchiodi, A., Athanassiou, A., & Bayer, I. S. (2019). Superhydrophobic coatings from beeswax-in-water emulsions with latent heat storage capability. *Advanced Materials Interfaces*, 6(2). <https://doi.org/10.1002/admi.201801782>
8. Felicioli, A., Cilia, G., Mancini, S., Turchi, B., Galaverna, G., Cirlini, M., Cerri, D., & Fratini, F. (2019). In vitro antibacterial activity and volatile characterisation of organic *Apis mellifera ligustica* beeswax ethanol extracts. *Food Bioscience*. <https://doi.org/10.1016/J.FBIO.2019.04.004>
9. Giampieri, F., Quiles, J., Orantes-Bermejo, F. J., Gasparini, M., Forbes-Hernández, T. Y., Sánchez-González, C., ... & Battino, M. (2018). Are by-products from beeswax recycling process a promising source of bioactive compounds? *Food and Chemical Toxicology*, 112, 126–133. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2017.12.041>
10. Hakim, R. J., Nugrahani, R. A., & Fithriyah, N. (2020). Performance of lecithin isolate from vegetable oil as an emulsifier on the beeswax coating characteristics. *International Journal of ChemTech Research*, 13(3). <https://doi.org/10.20902/ijctr.2019.130307>
11. Pre-Extension Demonstration of Crude Beeswax Extraction Technology in Ilu Gelan District, West Shewa Zone, Oromia Regional State, Ethiopia. (2024). *World Journal of Food Science and Technology*, 8(4), 79-85. <https://doi.org/10.11648/j.wjfst.20240804.12>
12. Meseret. (2019). Evaluation of the quality of beeswax from different sources and rendering methods. *American Journal of Agricultural Research*, 4(2). <https://doi.org/10.28933/AJAR-2019-02-1106>
13. Schaeffer, C., Schummer, C., Scholer, S., van Nieuwenhuyse, A., & Pincemaille, J. (2024). Evaluation of environmental contamination in beeswax products. *Journal of Chromatography B*, 1244, 124243. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2024.124243>
14. Tu, X., Du, C., He, Y., Yang, J., Chen, J., Jin, Q., Xie, L., Zuo, Y., Huang, S., & Chen, W. (2024). Determination of bisphenols in beeswax based on sugaring out-assisted liquid-liquid extraction. *Chemosphere*, 349, 141274. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141274>
15. Tran, H. D., Le, H. M., Mai, C. H., & Nguyen, V. (2023). Physicochemical properties of beeswax: The effects of cooking methods and harvesting positions. *Journal of Oleo Science*, 72(10), 979–984. <https://doi.org/10.5650/jos.ess23115>
16. Shegaw, T., & Edimew, T. (2021). Assessment on production, processing and marketing status of beeswax in Kafa Zone, Ethiopia. *American Journal of Agriculture and Forestry*, 9(4). <https://doi.org/10.11648/J.AJAF.20210904.12>

-
17. Špaldoňová, A., Havelcová, M., Lapčák, L., Machovič, V., & Titěra, D. (2021). Analysis of beeswax adulteration with paraffin using GC/MS, FTIR-ATR and Raman spectroscopy. *Journal of Apicultural Research*, 60(1), 73–83. <https://doi.org/10.1080/00218839.2020.1774152>
18. Brito-Pereira, R., Ribeiro, C., Tubio, C., Castro, N., Costa, P., & Lanceros-Méndez, S. (2022). Beeswax multifunctional composites with thermal-healing capability and recyclability. *Chemical Engineering Journal*, 446, 139840. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139840>
19. Calatayud-Vernich, P., vanEngelsdorp, D., & Picó, Y. (2019). Beeswax cleaning by solvent extraction of pesticides. *MethodsX*, 6, 980–985. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.04.022>
20. Luna, A., Alonso, R., Cutillas, V., Ferrer, C., Gómez-Ramos, M., Hernando, D., Valverde, A., Flores, J. M., Fernández-Alba, A., & Rodríguez Fernández-Alba, A. (2021). Removal of pesticide residues from beeswax using a methanol extraction-based procedure: A pilot-scale study. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101606. <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2021.101606>
21. Biyena, L. (2024). Pre-extension demonstration of crude beeswax extraction technology in Ilu Gelan District, West Shewa Zone, Oromia Regional State, Ethiopia. *World Journal of Food Science and Technology*. <https://doi.org/10.11648/j.wjfst.20240804.12>
22. Hosseini, S. F., Mousavi, Z., & McClements, D. (2023). Beeswax: A review on the recent progress in the development of superhydrophobic films/coatings and their applications in fruits preservation. *Food Chemistry*, 424, 136404. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136404>
23. Luna, A., Alonso, R., Cutillas, V., Ferrer, C., Gómez-Ramos, M., Hernando, D., ... & Rodríguez Fernández-Alba, A. (2021). Removal of pesticide residues from beeswax using a methanol extraction-based procedure: A pilot-scale study. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101606. <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2021.101606>
24. Kryński, K., & Kowaluk, G. (2021). Application of beeswax as a hydrophobic agent in MDF technology. *Annals of WULS, Forestry and Wood Technology*. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.2375>
25. Gupta, G., & Anjali, K. (2023). Environmentally Friendly Beeswax: Properties, Composition, Adulteration, and its Therapeutic Benefits. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1110, 012041. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1110/1/012041>
26. Moreira, C. M., Scala-Benuzzi, M. L., Takara, E., Raba, J., Bertolino, F., & Messina, G. A. (2023). Novel solid inks based on beeswax, graphite and graphene applied to the fabrication of paper-based sensor for galactose determination. *Talanta*, 257, 124372. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2023.124372>
27. Tran, H. D., Le, H. M., Mai, C. H., & Nguyen, V. (2023). Physicochemical properties of beeswax: The effects of cooking methods and harvesting positions. *Journal of Oleo Science*, 72(10), 979–984. <https://doi.org/10.5650/jos.ess23115>
28. Al-Rajhi, M. A. I., EL_SEREY, S., & Elsheikha, A. (2023). Application of Solar Energy to Liquify Beeswax. *Turkish Journal of Agricultural Engineering Research*. <https://doi.org/10.46592/turkager.1343229>
29. Luo, X., Dong, Y., Gu, C., Zhang, X., & Ma, H. (2021). Processing technologies for bee products: An overview of recent developments and perspectives. *Frontiers in Nutrition*, 8, 727181. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.727181>
30. Zhang, R. H., Liu, J., Yan, Z. N., Jiang, H., Wu, J., Zhang, T., Wang, E., & Liu, X. (2023). Tailoring a novel ovalbumin emulsion gel for stability improvement and functional properties enhancement: Effect of oil phase structure changes by beeswax. *Food Chemistry*, 426, 136575. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136575>

-
31. Tu, X., Du, C., He, Y., Yang, J., Chen, J., Jin, Q., Xie, L., Zuo, Y., Huang, S., & Chen, W. (2024). Determination of bisphenols in beeswax based on sugaring out-assisted liquid-liquid extraction. *Chemosphere*, 349, 141274. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141274>
32. Sousa, T. M., Melo Neto, O. M., Lucena, A. E. F. L., & Nóbrega, E. R. (2023). Enhancing workability and sustainability of asphalt mixtures: Investigating the performance of beeswax as a novel additive for warm mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 389, 133306. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133306>
33. Mahottamananda, S. N., Pal, Y., Dinesh, M., & Ingenito, A. (2022). Beeswax–EVA/Activated-Charcoal-Based Fuels for Hybrid Rockets: Thermal and Ballistic Evaluation. *Energies*, 15(20), 7578. <https://doi.org/10.3390/en15207578>
34. Gajda, A., Antczak, M., Mitrowska, K., & Posyniak, A. (2018). Development, validation and application of LC-MS/MS method for the determination of tetracyclines in beeswax. *Journal of Separation Science*, 41(20), 3821–3829. <https://doi.org/10.1002/jssc.201800503>
35. Jawad, A., Aljibori, H. S., Obeed, H. H., Kadhum, A., Al-Attar, B., Abdulzahra, O. H., Gaaz, T., & Al-amriy, A. (2022). Beeswax Material as Corrosion Inhibitor in a Brake Oil System. *Journal of Hunan University Natural Sciences*, 49(4). <https://doi.org/10.55463/issn.1674-2974.49.4.4>
36. Abdulmunem, A. R., Mazali, I., Samin, P. M., & Sopian, K. (2024). Beeswax as a sustainable thermal energy storage material: Experimental thermal assessment in solar air heater. *Journal of Energy Storage*, 82, 114398. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114398>
37. Belgacem, S. B., Trigui, A., Jedidi, I., Loukil, M. S., Calmunger, M., & Abdmouleh, M. (2024). Enhancing thermal energy storage properties of blend phase change materials using beeswax. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34591-1>
38. Al-Rajhi, M. A. I., El_SEREY, S., & Elsheikha, A. (2023). Application of Solar Energy to Liquify Beewax. *Turkish Journal of Agricultural Engineering Research*. <https://doi.org/10.46592/turkager.1343229>
39. Mishra, D., Bhowmik, S., & Pandey, K. (2022). Analysis of heat transfer rate for different annulus shape-enhanced beeswax-based phase change material for thermal energy storage. *Mathematical Problems in Engineering*. <https://doi.org/10.1155/2022/6123472>
40. Ertürk, Ö., Keskin, M., Birinci, C., & Kolaylı, S. (2024). Comparison of physiochemical, biochemical and antimicrobial properties of natural and artificial *Apis mellifera* L. beeswax. *Journal of the Hellenic Veterinary Medical Society*. <https://doi.org/10.12681/jhvms.34663>
41. Biyena, L. (2024). Pre-extension demonstration of crude beeswax extraction technology in Ilu Gelan District, West Shewa Zone, Oromia Regional State, Ethiopia. *World Journal of Food Science and Technology*. <https://doi.org/10.11648/j.wjfst.20240804.12>
42. Nong, Y., Maloh, J., Ntarelli, N., Gunt, H., Tristani, E. M., & Sivamani, R. (2023). A review of the use of beeswax in skincare. *Journal of Cosmetic Dermatology*, 22, 2166–2173. <https://doi.org/10.1111/jocd.15718>
43. Alrabaiah, H. A., & Medina-Medina, N. (2021). Agile Beeswax: Mobile app development process and empirical study in real environment. *Sustainability*, 13, 1909. <https://doi.org/10.3390/su13041909>
44. Lindermann, L., Eckert, J. H., Alkassab, A., Bischoff, G., Kreuzig, R., & Pistorius, J. (2018). Investigating the transfer of acaricides from beeswax into honey, nectar, bee bread, royal jelly and worker jelly. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 465, 63. <https://doi.org/10.5073/JKA.2020.465.063>

45. Zhang, R. H., Liu, J., Yan, Z. N., Jiang, H., Wu, J., Zhang, T., Wang, E., & Liu, X. (2023). Tailoring a novel ovalbumin emulsion gel for stability improvement and functional properties enhancement: Effect of oil phase structure changes by beeswax. *Food Chemistry*, 426, 136575. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136575>
46. Gupta, G., & Anjali, K. (2023). Environmentally Friendly Beeswax: Properties, Composition, Adulteration, and its Therapeutic Benefits. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1110, 012041. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1110/1/012041>
47. Al-Rajhi, M. A. I., EL_SEREY, S., & Elsheikha, A. (2023). Application of solar energy to liquify beeswax. *Turkish Journal of Agricultural Engineering Research*. <https://doi.org/10.46592/turkager.1343229>
48. Bednarzewska, K. (2024). Business model of a patented invention developed at a university on the example of the “WAXO” beeswax quality analyzer. *Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series*. <https://doi.org/10.29119/1641-3466.2024.198.1>
49. Amberkar, T., & Mahanwar, P. (2022). Study of thermal energy storing beeswax microcapsules by in situ polymerization method. *Research Journal of Chemistry and Environment*. <https://doi.org/10.25303/2603rjce2936>
50. Amberkar, T., & Mahanwar, P. (2023). Microencapsulation study of bioderived phase change material beeswax with ethyl cellulose shell for thermal energy storage applications. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 45, 11803–11818. <https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2265323>
51. Eshete, Y., & Eshete, T. (2018). A review on crude beeswax mismanagement and lose: Opportunities for collection, processing and marketing in Ethiopia. *Journal of Nutritional Health & Food Engineering*, 8. <https://doi.org/10.15406/JNHFE.2018.08.00300>
52. Shpychak, O. (2018). Mathematical design of the experiment in the development of technology of beeswax obtaining from propolis. *Journal of Global Pharma Technology*. <https://doi.org/10.26538/jgpt.2020.12.2>
53. Moreira, C. M., Scala-Benuzzi, M. L., Takara, E., Raba, J., Bertolino, F., & Messina, G. A. (2023). Novel solid inks based on beeswax, graphite and graphene applied to the fabrication of paper-based sensor for galactose determination. *Talanta*, 257, 124372. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2023.124372>
54. Luo, X., Dong, Y., Gu, C., Zhang, X., & Ma, H. (2021). Processing technologies for bee products: An overview of recent developments and perspectives. *Frontiers in Nutrition*, 8, 727181. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.727181>
55. Nunut, I., Whulanza, Y., & Kassegne, S. (2020). Testing of beeswax printing technology in the design of a paper-based microfluidic system. *International Journal of Technology*, 11(5). <https://doi.org/10.14716/ijtech.v11i5.4336>
56. Shegaw, T., & Edimew, T. (2021). Assessment on production, processing and marketing status of beeswax in Kafa Zone, Southern Nations Nationalities and Peoples Region (SNNPR), Ethiopia. *American Journal of Agriculture and Forestry*, 9(4). <https://doi.org/10.11648/J.AJAF.20210904.12>
57. Gao, Y., Lei, Y., Wu, Y., Liang, H., Li, J., Pei, Y., Li, Y., Li, B., Luo, X., & Liu, S. (2021). Beeswax: A potential self-emulsifying agent for the construction of thermal-sensitive food W/O emulsion. *Food Chemistry*, 349, 129203. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129203>
58. Mishra, D., Bhowmik, S., & Pandey, K. M. (2020). Numerical investigation of beeswax-based phase change material for thermal management of li-ion battery. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.455>
59. Brito-Pereira, R., Ribeiro, C., Tubio, C., Castro, N., Costa, P., & Lanceros-Méndez, S. (2022). Beeswax multifunctional composites with thermal-healing

capability and recyclability. *Chemical Engineering Journal*, 446, 139840. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139840>

60. Márquez-Osuna, A. (2024). Beekeeping from the South. *Agricultural History*. <https://doi.org/10.1215/00021482-10910295>

61. Mu, G., Yan, S., Pan, F., Xu, H., Jing, X., & Xue, X. (2024). Based on theoretical design simultaneous analysis of multiple neonicotinoid pesticides in beeswax by deep eutectic solvents extraction combined with UHPLC-MS/MS. *Food Chemistry: X*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.102073>

62. Cho, K.-H., Bahuguna, A., Lee, Y., Lee, S. H., & Kim, J.-E. (2024). Twenty-week dietary supplementation with beeswax alcohol (BWA; Raydel®) ameliorates high-cholesterol-induced long-term dyslipidemia and organ damage in hyperlipidemic zebrafish. *Pharmaceuticals*, 17. <https://doi.org/10.3390/ph17111434>

63. Agbo, C., Ngwu, M., Anyaji, U., Ubahakwe, C., Asogwa, G. N., Akpa, P., Nnamani, P., Ofokansi, K., & Attama, A. (2024). Preparation of lipid-based formulations using local beeswax sourced from honeycombs. *African Journal of Pharmaceutical Research and Development*. <https://doi.org/10.59493/ajopred/2024.2.8>

64. Rajitha, K., Mohana, K., Nayak, S. R., Hegde, M., & Madhusudhana, A. M. (2020). An efficient and eco-friendly anti-corrosive system based on beeswax-graphene oxide nanocomposites on mild steel in saline medium. *Surfaces and Interfaces*, 18, 100393. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2019.100393>

65. Rashid, F., & Al-Obaidi, M. (2023). Recent innovations and developments concerning the beeswax as phase change material for thermal energy storage: A review. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148, 12859–12876. <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12556-9>

66. Valverde, S., Ares, A., Bernal, J., Nozal, M. J., & Bernal, J. (2018). Fast determination of neonicotinoid insecticides in beeswax by UHPLC-MS/MS using enhanced matrix removal-lipid sorbent. *Microchemical Journal*. <https://doi.org/10.1016/J.MICROC.2018.06.020>

67. Mishra, D., Bhowmik, S., & Pandey, K. (2022). Development and assessment of beeswax/expanded graphite composite phase change material for thermal energy storage. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47, 8985–9004. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06476-9>

68. Kaur, K., Gupta, N., Mahajan, M., Jawandha, S. K., & Kaur, N. (2023). A novel edible coating of beeswax impregnated with karonda polyphenol rich extract maintains the chemical and bioactive potential of fresh ber fruit. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*. <https://doi.org/10.1007/s13580-023-00533-y>

69. Juma, S. M., Ali, A. I., Khamis, S., Rashid, R., & Kombo, M. D. (2022). Assessment of value chain for honey and beeswax initiatives in Zanzibar. *European Journal of Agriculture and Food Sciences*. <https://doi.org/10.24018/ejfood.2022.4.1.423>

70. Li, Y., Fan, Y., Liu, Z., Zhang, J., Cheng, J., & Lian, Q. (2024). Photo-curable bio-based comb/bottle brush epoxy resin/beeswax/copper foam phase change materials with high enthalpy value and multifunctional properties. *Composites Science and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2024.110506>

71. Nayana, N. P., Ramachandra, C. T., Maheshkumar, G., Bhatt, S. N., & Manvi, D. (2024). Design, development, and testing of 3D printed honeycomb for *Apis cerana indica*. *Sustainable Materials and Technologies*. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e01220>

72. Rathgeb, A., Palmtag, A., Kaminski, S., & Jupke, A. (2019). Design of extractive reaction systems. *Chemie Ingenieur Technik*. <https://doi.org/10.1002/cite.201900163>

73. Szymaniak, M. (2018). Steam turbine stage modernisation in front of the extraction point. *Polish Maritime Research*, 25, 116–122. <https://doi.org/10.2478/pomr-2018-0062>

74. Abdumannonovich, A. B., Mansurovich, S. H., & Mahmudovich, M. I. (2021). Development of high-efficiency extraction equipment and prospects for industrial application of extractors with pneumatic fluid mixing. *Turkish Journal of Engineering and Technology*, 3(4), 95–101. <https://doi.org/10.37547/TAJET/VOLUME03ISSUE04-15>

75. Tukaeva, R., Afanasenko, V., & Yunusova, Y. L. (2019). Vibro packed column equipment for mass transfer processes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 272. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/272/3/032069>

76. Amiebenomo, S. O. (2025). Design and performance evaluation of a multi-fruit juice extraction machine. *American Journal of Innovation in Science and Engineering*. <https://doi.org/10.54536/ajise.v4i1.3742>

77. Qi, D. (2018). Equipment in rare-earth solvent extraction-separation process: Mixer-settler of solvent extraction. Elsevier Chapter. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813920-2.00005-2>

78. Bose, G., Pain, P., & Roy, S. (2019). Bio-inspired meta-heuristic multi-objective optimization of EDM process. *Advances in Civil and Industrial Engineering*. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-8223-6.CH014>

79. Li, Y., Yang, J., & Gao, S. (2022). Equipment based on bee colony model. *Uludağ Arıcılık Dergisi*. <https://doi.org/10.31467/uluaricilik.1153269>

80. Akay, H., Yang, M. C., & Kim, S.-G. (2021). Automating design requirement extraction from text with deep learning. *ASME 2021 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE)*. <https://doi.org/10.1115/detc2021-66898>.

Суска А. А.,
Д'яконов В. І.,
Шевченко С. А.,
Скрипник О. С.
Державний
біотехнологічний
університет, м. Харків,
Україна
E-mail:
v.i.diakonov@gmail.com

**ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ
БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ
ДЛЯ ДЕРЕВ'ЯНОГО ЖИТЛОВОГО
БУДІВНИЦТВА**

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-26-89-101>

УДК 674.8

Суска А.А., Д'яконов В.І., Шевченко С.А., Скрипник О.С. Теоретичні засади забезпечення технологічних властивостей будівельних матеріалів для дерев'яного житлового будівництва.

Анотація. У статті йдеться про проблему зниження запасів якісної деревини та збільшення частки малоцінної деревини, що обмежує споживчі властивості. Особливу увагу приділено використанню залишків деревини після лісових пожеж як альтернативних джерел сировини для дерев'яного домобудівництва. В умовах зростання споживання деревини у світі та зменшення її якісних запасів, передбачається підхід до переробки пошкодженої деревини для створення композитних матеріалів.

Методом дослідження є розробка комплексного підходу до утилізації залишків деревини після лісових пожеж для виробництва конкурентоспроможних будівельних матеріалів із заданими експлуатаційними властивостями. У роботі визначено методологічні засади виробництва таких матеріалів.

Запропоновано технологію виготовлення композитів, що включає використання деревних частинок, сполучного та подрібнених полімерних відходів. Основна увага приділена методу пултрузії, який дозволяє формувати довгомірні профільовані вироби з постійною конфігурацією поперечного перерізу. Розглянуто особливості взаємодії деревини з термoplastичними полімерними матрицями, а також вплив попередньої обробки волокон на міжфазну взаємодію компонентів.

Дослідження показали, що додавання антипіренів, таких як алюмохромфосфат, значно знижує горючість композитів, підвищуючи їхню безпеку.

Математичне моделювання процесів НВЧ-сушіння дозволило знайти оптимальні параметри установки для забезпечення рівномірної нагріву матеріалу. Використання НВЧ-енергії сприяє інтенсифікації процесів сушіння та підвищенню продуктивності.

Результати дослідження підтверджують доцільність використання залишків деревини після лісових пожеж та вторинного поліетилентерефталату (ПЕТ) для виробництва екологічно безпечних будівельних матеріалів із покращеними експлуатаційними властивостями. Це відкриває нові можливості для переробки сировини відповідно до сучасних екологічних вимог.

Ключові слова: обгоріла деревина, деревно-полімерні композити, поліетилентерефталат, утилізація, будівельні матеріали, пултрузія, екструзія, НВЧ-сушіння, реологічні властивості.

Suska A.A., Dyakonov V.I., Shevchenko S.A., Skrypnyk O.S. **Theoretical basis for ensuring technological properties of construction materials for wooden residential construction.**

Abstract. This study investigates the utilization of wood residues from forest fires and recycled PET to produce building materials for wooden houses. It focuses on a comprehensive technological approach involving pre-treatment and modification of damaged wood to enhance compatibility with a polymer matrix. The research optimizes composite formation with specific performance characteristics by examining burnt wood properties, component ratios, and technological parameters like temperature and pressure. It also assesses the effectiveness of microwave energy for drying and modifying wood, and for improving the water and fire resistance of the resulting composites. Furthermore, the environmental and economic viability of this waste disposal method is evaluated.

This study aims to scientifically justify and develop a comprehensive approach for utilizing substantial wood residues post-forest fires for wooden house construction. This involves establishing scientific, technical, and methodological bases for producing competitive building materials with specific properties. Achieving this requires analyzing fire-damaged wood characteristics, exploring modification and composite use, and considering global trends in wooden construction alongside environmental and economic waste disposal. The research plans to develop optimal wood-polymer composite formulations using recycled PET and identify the most effective production processes, ultimately providing practical recommendations for the industrial production of eco-friendly and cost-effective building materials from secondary resources.

This research scientifically validated and developed a comprehensive approach for utilizing wood residues post-fire and recycled PET for wooden house construction. Optimal pre-treatment methods minimizing thermal damage to wood's properties were identified. New data on burnt wood characteristics informed the creation of wood-polymer composite formulations with specific properties. Recycled PET proved effective as a binder, enhancing water and biological resistance. Technological recommendations for pultrusion of long profiles were developed. The study investigated flame retardants' impact on fire resistance and used microwave drying modeling to determine optimal processing parameters. Economic analysis indicated potential benefits due to reduced costs. The findings can inform industrial production of eco-friendly building materials from secondary resources.

Key words: burnt wood, wood-polymer composites, polyethyleneterephthalate, recycling, waste materials, pultrusion, extrusion, microwave drying, rheological properties.

Постановка проблеми

Особливістю сучасного стану сировинної бази підприємств з перероблення деревини є суттєве зниження запасів якісної деревини та збільшення частини малоцінної деревини з невисокими споживчими властивостями. Одним із напрямків покриття дефіциту матеріалів для дерев'яного домобудування є підвищення ефективності використання величезного потенціалу вторинної деревної сировини у вигляді технічно можливих варіантів використання залишків деревини після лісової пожежі. Війна завдала великої за обсягами та довготривалої шкоди нашому навколишньому природному середовищу, зокрема лісовим екосистемам. Найбільшою шкоди лісовим екосистемам завдало значне збільшення площі лісових пожеж, які в

2024 році досягли рекордних площ. Постає актуальне запитання, що ж робити з деревиною після лісової пожежі. З іншої сторони, споживання деревини у світі постійно зростає, що призводить до того що, якісної деревини листяних і хвойних порід стає дедалі менше. Хоча пошкодження внаслідок пожежі можуть значно змінити властивості деревини, але деревина залишається придатною для подальшої переробки й, навіть якщо зовнішні шари обгоріли, така сировина може використовуватись для виробництва композитних матеріалів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Метою даної роботи є наукове обґрунтування та розроблення комплексного підходу до утилізації залишків деревини після лісової пожежі для потреб дерев'яного домобудівництва шляхом створення технологічних та методологічних засад виробництва конкурентоспроможних будівельних матеріалів із заданими експлуатаційними властивостями, що ґрунтуються на поглибленому аналізі властивостей пошкодженої сировини та тенденцій розвитку дерев'яного будівництва.

Для досягнення поставленої мети потрібно розробити методологічні засади комплексного підходу до виробництва конкурентоспроможних будівельних матеріалів з деревини, що базується на особливостях залишків деревини після лісової пожежі, еколого-економічних аспектах вирішуваної проблеми, тенденціях розвитку дерев'яних.

Формулювання мети досліджень

З огляду на зростаючий попит на натуральні та екологічно безпечні матеріали, бджолиний віск набуває стратегічного значення не лише в межах пасічного господарства, але й у суміжних галузях харчової, фармацевтичної, косметичної, інженерної та енергетичної промисловості. Проте технології його вилучення, очищення та переробки у багатьох регіонах залишаються малоефективними, енергоємними та неадаптованими до сучасних умов виробництва.

Метою даної оглядової роботи є систематизація сучасних підходів до вдосконалення технологій витоплення бджолиного воску з акцентом на інженерні рішення, що сприяють підвищенню енергоефективності, якості кінцевого продукту, екологічної безпечності процесів і адаптивності обладнання до умов пасік різного масштабу. Особлива увага приділена аналізу інноваційних технічних рішень, новітніх матеріалів, методів очищення та переробки воскової сировини, а також перспективам їх впровадження в практику бджільництва та аграрного машинобудування.

Результати досліджень

Одним із технічно можливих варіантів використання залишків деревини після лісової пожежі та утилізації вторинного поліетилентерефталату є виробництво композитів, що складаються з деревних частинок з добавкою сполучного та подрібнених полімерних відходів. Композиційні плити та профільовані вироби можуть використовуватися як у меблевому виробництві, так і у будівництві. Дані напрями використання плитних матеріалів висувають певні вимоги до експлуатаційних характеристик плит і профільованих виробів [5, 6].

Поліетилентерефталат (ПЕТ) це термопластичний полімер, що є найпоширенішим представником класу поліефірів та відомий під різними торговими назвами. Однією з ключових характеристик ПЕТ є індивідуальна (характеристична) в'язкість, яка визначається довжиною полімерного ланцюга.

Обгоріла деревина за структурою є складним матеріалом з великим вмістом целюлози, лігніну, геміцелюлози, ефірних олій, танідів, цукрів, солей і органічних кислот. Наявність деяких сполук, що входять до складу деревини, негативно впливає на її використання як наповнювача. Найнесприятливішими з них вважаються найпростіші цукри та частина геміцелюлоз. Хоча дослідниками були проведені роботи, спрямовані на нейтралізацію шкідливого впливу цих елементів, але розроблені технології виявилися дорогими. Оскільки деревинна тріска з великим вмістом целюлози має високий ступінь кристалічності, це ускладнює її використання для виробництва композиційних матеріалів. Обумовлюється це тим, що кристалічні області реагують між собою з утворенням сильних внутрішньомолекулярних водневих зв'язків, які ускладнюють їх взаємодію з термопластичними полімерними матрицями.

Поліетилен попередньо пропонувався застосовувати для виготовлення паливних брикетів. Така технологія підходить для виготовлення екструзійних профільованих виробів – поручнів для перил тощо. Тож для їх виробництва сформовано оптимальну структуру цеха (рис. 1).

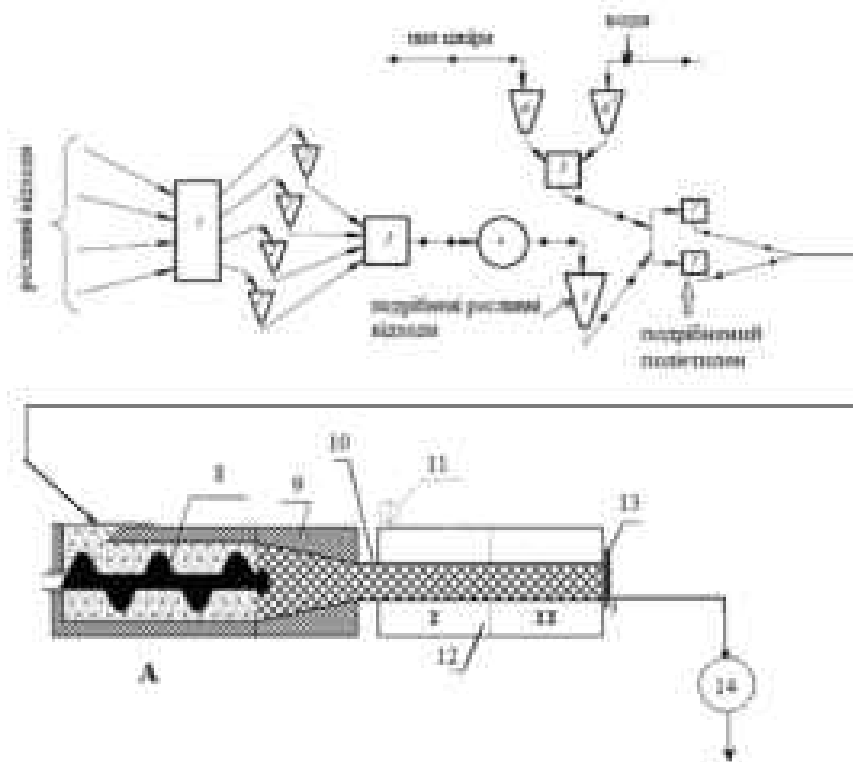


Рис. 1. Оптимальна структура цеху для виробництва довгомірних профільованих виробів із постійною конфігурацією поперечного перерізу шляхом протягування через формуючу фільтру суміші відходів: 1 – пристрій очищення; 2 – бункери для зберігання неподрібненої біосировини; 3 – багатокомпонентний дозатор; 4 – подрібнювач біосировини; 5 – бункер для подрібненої біосировини; 6 – бункер для зберігання пилу шкіри; 6' – бак для води; 7 – змішувач біосировини з відходами полієтилену; А – прес-автомат для виробництва довгомірних виробів; 8 – шнековий транспортер; 9 – формуюча головка; 10 – фторопластова трубка з отворами; 11 – насос; 12 – камера термообробки НВЧ типу (I – перша секція мікрохвильового пристрою на основі системи хвилевідного типу; II – друга секція мікрохвильового пристрою (адаптер) на основі уповільнюючої системи довжиною); 13 – ніж і стіл для охолодження виробів; 14 – бункер для зберігання готової продукції.

Цех складається із очисного пристрою 1, бункера для неподрібнених рослинних відходів 2, багатокомпонентного дозатора 3, пристрою для подрібнення рослинних відходів 4 та прес-автомата А. Він складається із шнекового транспортера 8, формуючої головки 9, камери термообробки НВЧ типу 12.

Згідно з Директивою 2008/98/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 19.XI.2008 про відходи та скасування деяких директив, слід дотримуватися принципу каскадного використання біомаси та ієрархії відходів. Як і будь-яка біомаса, деревина повинна бути використана так, щоб забезпечити її найвищу економічну та екологічну додану цінність в наступному порядку пріоритетів: виробу з деревини чи на її основі, продовження терміну експлуатації виробів з деревини чи на її основі, повторне використання деревини, перероблення деревини, використання деревини як палива та утилізація деревини.

Отже, залишки деревини після лісової пожежі доцільно переробляти, використовуючи пултрузію – метод формування довгомірних профільованих виробів із постійною конфігурацією поперечного перерізу шляхом протягування через формуючу філь'єру суміші відходів. Відмінна риса процесу – послідовний рівномірний рух матеріалу через усі технологічні вузли установки. При використанні методу пултрузії за цією технологією послідовно реалізуються всі технологічні операції: ущільнення та нагрів сировини; плавлення матричного матеріалу; просочення та монолітизація нагрітого матеріалу; фіксування цієї форми охолодженням; відрізання профілю необхідної довжини.

Послідовний рівномірний рух матеріалу через усі технологічні вузли установки доцільно створювати за допомогою шнекового транспортера (преса). Шнекові преси мають меншу масу, ніж поршневі, оскільки відсутні масивні поршні і маховики. Шнекові преси працюють значно тихіше, завдяки відсутності ударних навантажень. До недоліків можна віднести підвищені витрати енергії і швидкий знос конічної частини шнека [12]. Теоретичний опис руху біомаси при формуванні виробів шнековим робочим органом є аналітичним підґрунтям для визначення раціональних параметрів преса. При розрахунку і конструюванні машин необхідно розглядати деформацію сировинної біомаси з урахуванням її фізико-механічних і реологічних її властивостей, а також взаємодії зі шнековим механізмом у процесі утворення виробів.

Важливою величиною, що характеризує формуючу зону, є кут конусності каналу. Цей кут, з одного боку, повинен бути таким, щоб забезпечити більш плавне наростання тиску, оскільки це покращує якість та рівномірність просочення за товщиною перерізу та сприяє більш повному видаленню повітряних включень із формуючої зони у вхідну зону. Проте надто маленька конусність призводить до невиправданого збільшення цієї зони, а значить, і габаритів усієї філь'єри.

Для аналізу доцільно звернутися до питань реологічних властивостей полімерних систем. У зв'язку з нетривіальністю реологічних властивостей аналізованої системи, її багатокомпонентністю та поєднанням дії кількох факторів (зсувних напруг, температури та пластифікуючої теплової обробки) звернемося до основ реології полімерних систем і спробуємо поширити їх на пултрузію деревної тріски, пластифікованої розчином пилу шкіри, при середній вологості 13-14%.

Закономірності виникнення та розвитку незворотних деформацій в'язкої течії в полімерних системах аналізуватимемо методами реології. Під дією прикладеної напруги зсуву в полімері виникає деформація зсуву (рис. 2).

Між двома паралельними площинами А і В знаходиться крапля рідини – активатор для роботи екструдера. До верхньої пластинки прикладена сила F , що зміщує площину А щодо площини В (без зміни відстані між ними) на величину Δl . Процес, що відбувається, може бути охарактеризований величинами напруги зсуву та швидкості

зсуву (градієнта швидкості зсуву). Так, при площі верхньої пластинки A на одиницю її площі діє напруга зсуву τ . Під дією напруги зсуву τ за одиницю часу відбувається зміщення пластинки A на величину Δl . Величина цього зміщення може бути охарактеризована тангенсом кута повороту прямої, що з'єднувала протилежні точки до початку деформування, або, що те саме відношенням величини зсуву Δl до відстані між площинами h . Відносна деформація зсуву γ складе $\gamma = \Delta l/h$, а швидкість деформації становитиме $v = d\gamma/dt$. Таким чином, швидкість деформації, характеризує кутову швидкість зсуву або градієнт лінійної швидкості зсуву. У найпростішому випадку зв'язок між швидкістю зсуву та напругою зсуву виражається законом Ньютона:

$$\tau_{zag} = k_0 \gamma, \quad (1)$$

де k_0 – в'язкість, Па·с; γ – швидкість зсуву.

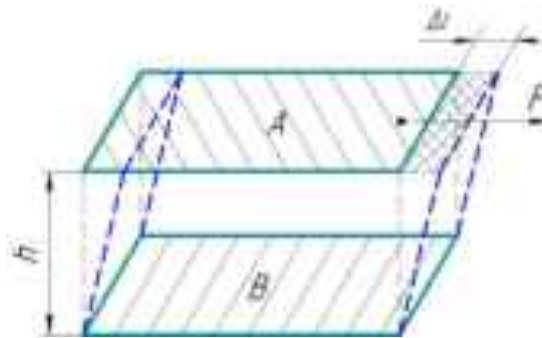


Рис. 2. Схема деформації зсуву рідини між плоскопаралельними пластинами

Як правило, зі збільшенням напруги зсуву швидкість зсуву зростає більшою мірою, ніж це впливає із закону Ньютона. Системи, поведінка яких описується зазначеним чином, називаються псевдопластичними рідинами. Аналіз кривої течії такого типу показує, що у псевдопластичних рідинах зі збільшенням швидкості зсуву в'язкість зменшується. Це називається аномалією в'язкості. Кожному значенню швидкості зсуву притаманне відповідне відношення напруги та швидкості зсуву $k_0 = \tau_{zag} / \gamma$ – тобто, власне значення ефективної в'язкості.

На відміну від в'язкої течії, при якій незворотні деформації розвиваються за будь-якої напруги, пластичність полягає в здатності системи до розвитку незворотних деформацій лише під дією навантаження, що перевищує певну межу – межу плинності. Найпростішою моделлю пластично-в'язкого середовища є так зване тіло Бінгама. Це ідеально пластичне тіло, для якого співвідношення між напругою зсуву τ і швидкістю зсуву γ має вигляд:

$$\tau_\theta = k_\theta \gamma, \quad (2)$$

де τ_θ – межа плинності; k_θ – пластична (бінгамовська) в'язкість.

Серед реальних полімерних систем до тіла Бінгама за своїми механічними властивостям найбільш близькі деякі наповнені полімери та колоїди; оскільки досліджувана система може розглядатися як наповнена, вона також може відноситися до тіл Бінгама.

У процесі зволоження деревних частинок на їх поверхні знаходяться максимально зволожені шари – наприклад, у вигляді геміцелюлозного гелю, які і надають системі екструдованості. У разі подрібненої тирси деревини ясеня ці поверхневі шари взагалі можуть являти собою аквакомплекс, що знаходиться у в'язко-плинному стані у найширшому температурному діапазоні. Унаслідок зволоження система набуває здатності до екструдування – відбувається відновлення капілярно-

пористої гетерогенної структури матеріалу. Рідкий поверхневий шар слугує своєрідним «рідким мастилом» при екструзії, призводячи до зниження витрати енергії. Звернемо увагу на зміну в цих умовах релаксаційного стану лігніну. Слід зазначити, що у подрібненій деревині знаходиться вже не вихідний лігнін, а продукти його механодеструкції, які мають значно меншу молекулярну масу. Під дією високої температури, що сприяє пластифікації, дії розчину пилу шкіри, а також зсувних напруг в екструдері, лігнін переходить у вимушений в'язкотекучий стан. Більше того, внаслідок значних зсувних напруг і високих температур у формуючій головці екструдера різко падає в'язкість системи, яка переходить від максимальної ньютонівської в'язкості до мінімальної ньютонівської в'язкості. При виході з екструдера сформований, але не висušений виріб (покищо без з'єднання деревини з поліетиленом) спрямовується в НВЧ піч.

При класичній екструзії схема процесу екструзії може бути розділена на три зони: 1 – зона сипучого стану; 2 – зона пластичного стану; 3 – зона в'язко-плинного стану. У екструдері для отримання будівельних виробів відбуваються ті самі процеси, як і при екструзії синтетичних полімерів. Зазвичай гранули полімерів мають сферичну, кубічну або циліндричну форму. Можна припустити, що на початку першої зони (безпосередньо під завантажувальним бункером) шнек працює лише як транспортер. Однак при просуванні в циліндрі екструдера механізм переміщення системи змінюється. Частинки ущільнюються і надалі переміщуються як монолітна маса (корок). Такий затор повинен переміщатися у гвинтовому каналі екструдера у напрямку, перпендикулярному нарізці, але в той же час шнек захоплює полімер, змушуючи його здійснювати обертальний рух. Надалі система піддається в екструдері дуже великим зусиллям стиснення-зсуву, що призводять не лише до переведення системи у вимушено-пластичний стан, а й до переходу системи від максимальної до мінімальної ньютонівської в'язкості.

Основною проблемою при створенні термопластичних композиційних матеріалів з рослинним наповнювачем є рівномірний розподіл компонентів у матеріалі. Тому в технологічних схемах виробництва значна увага приділяється засобам дозування, перемішування та подачі матеріалів в екструдер.

Практика показує знижену енергію взаємодії між матрицею і наповнювачем, що призводить до зменшення механічних властивостей. Щоб компенсувати несумісність на межі розділу, часто вдаються до модифікації поверхні волокон. Однак при цьому виникає ряд технологічних проблем, що створюють певні обмеження для використання природної тріски при створенні композиційних матеріалів. Оскільки тріска з великим вмістом целюлози має високий ступінь кристалічності, то кристалічні області реагують між собою з утворенням сильних внутрішньомолекулярних водневих зв'язків, що ускладнює їх взаємодію з термопластичними полімерними матрицями. Попередня обробка волокон (хімічна модифікація) має значний вплив, оскільки від неї залежить величина міжфазної взаємодії між компонентами, але це економічно не вигідно, тому ми знайшли шляхи удосконалення існуючої технології за рахунок додавання шкіряного пилу у кількості 2%.

Основна проблема, що виникає в робочій камері пристрою для обробки матеріалу енергією НВЧ – нерівномірність нагріву оброблюваного матеріалу, що в підсумку визначить неякісну внутрішню структуру. Так, аналізуючи роботу камери побутової мікрохвильової печі (рис. 3) ми бачимо суттєвий розкид температурному впливу.

Таким чином, при розробці НВЧ пристрою особливу увагу необхідно приділити малому розкиду температури в біомасі, що в підсумку визначає внутрішню структуру і якісні характеристики одержуваної продукції.

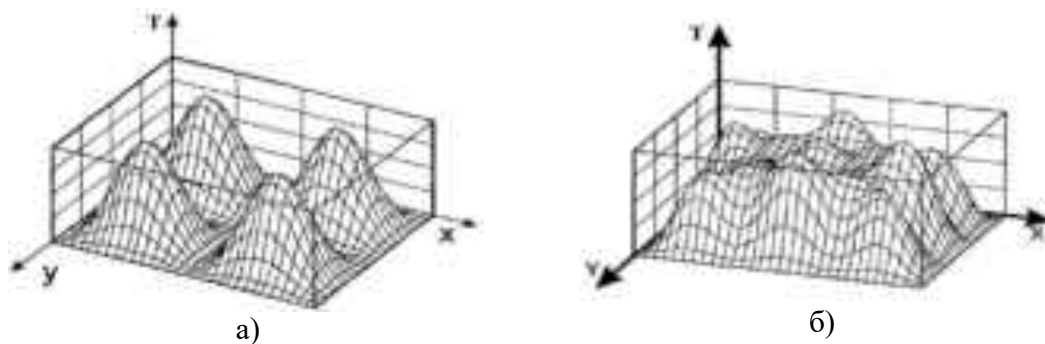


Рис. 3. Розподіл температури в робочій зоні мікрохвильового пристрою: а) на прикладі побутової мікрохвильової печі; б) приклад мікрохвильового пристрою, необхідного для виконання технологічного процесу.

Застосування енергії надвисоких частот (НВЧ) дає змогу інтенсифікувати процеси сушіння та підвищити продуктивність промислових технологічних установок. Забезпечити високу продуктивність можливо тільки в камерах з рухомих об'єктом, який в ній обробляється. Тож у надвисокочастотних камерах з біжучою хвилею найбільш просто забезпечити транспортування. На першому етапі роботи було проведено аналіз існуючих НВЧ установок та вибрана проточна конструкція НВЧ пристрою, яка показана на рис. 4.

Один з основних напрямів використання НВЧ-енергії це застосування її у якості сушіння та формування виробів. Особливого значення набуває посилення досліджень зі створення сучасних засобів для боротьби з грибковою мікрофлорою рослинних відходів. Основна проблема, що виникає в робочій камері пристрою для обробки матеріалу енергією НВЧ, це нерівномірність нагріву оброблюваного матеріалу, що в підсумку визначить неякісну внутрішню структуру.

У цій роботі проведено математичне моделювання процесів НВЧ з метою досягнення необхідної якості термообробки (потрібної температури та вологості) та вибору оптимальних параметрів установки та режимів її експлуатації.

Пропонована установка для НВЧ сушіння діелектричних матеріалів [7, 8] (рис. 4) складається з наступних основних елементів: джерела живлення та НВЧ генератора, що працює на частоті 2450 МГц; робочої НВЧ камери з біжучою хвилею з поперечною взаємодією; системи підігріву повітря в робочій камері та видалення парів вологи; шнекового транспортера для переміщення матеріалу в робочій камері; датчиків технологічного процесу (для контролю температури та вологості матеріалу); датчиків керуючих впливів (потужності НВЧ генератора); датчика витрати повітря у вентиляційній установці для видалення парів вологи; датчиків зовнішніх впливів (напруги мережі, температури навколишнього повітря, споживання електроенергії); системи керування.

Для моделювання формування паливних брикетів використана така методика, та наведені розрахункові формули для розподілу температур (1) і вмісту вологи (2) в i -й секції НВЧ сушарки:

$$\Theta_i = \Theta_{i-1} e^{-\frac{2(h_i + h_{ui})y}{c_i \rho_i d \cdot v}} + P \frac{e^{-\sum_{n=1}^{i-1} 2\alpha_n l}}{b(h_i + h_{ui})} \left[1 - e^{-\frac{2(h_i + h_{ui})y}{c_i \rho_i d \cdot v}} \right], \quad (3)$$

$$\Delta m = \frac{h_{ui} b d l c_i \rho_i}{(h_{ui} + h_i) r} \left[\Theta_{i-1} - \frac{P \alpha_i e^{-\sum_{n=1}^{i-1} 2\alpha_n l}}{b(h_{ui} + h_i)} \left(1 - e^{-\frac{2(h_{ui} + h_i) y}{c_i \rho_i d v}} \right) + \frac{2 P h_i a_i b l e^{-\sum_{n=1}^{i-1} 2\alpha_n l}}{r_i v (h_{ui} + h_i)} \right], \quad (4)$$

де P – потужність НВЧ генератора; b – ширина тонкої стінки хвилеводу; d – товщина діелектрика; c, ρ – питома теплоємність та щільність діелектрика; v – швидкість руху діелектрика; a – постійне згасання електромагнітної хвилі; r – питома теплота випаровування.



Рис. 4. Проточна конструкція НВЧ пристрою

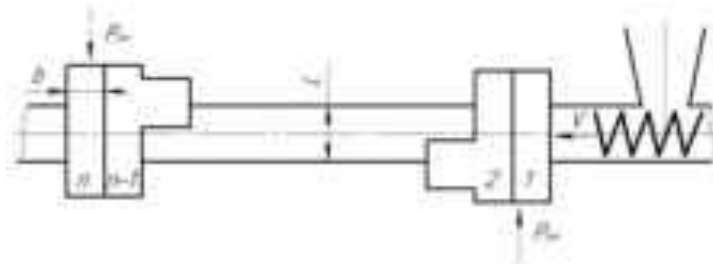


Рис. 5. Схема пристрою НВЧ сушіння з шнековим транспортером

Постійне згасання в залежності від температури визначається за формулою:

$$\alpha(t) := \alpha_c + \frac{\pi^2 \cdot m_1 \cdot \operatorname{tg} \delta(t) \cdot \varepsilon'(t)}{2 \cdot a \cdot l \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2 \cdot a} \right)^2}}, \quad (5)$$

де α_c – стала згасання для сухого матеріалу; m_1 – погонна маса рідини; a – ширина стінки хвилеводу; l – ширина діелектрика; ρ_v – об'ємна густина води; λ – довжина хвилі; $\varepsilon'(t)$ та $\operatorname{tg} \delta(t)$ – відносна діелектрична проникність та тангенс кута діелектричних втрат води.

Обговорення

Розрахункова програма, заснована на викладеній вище методиці, дозволяє враховувати залежності діелектричних параметрів ($\varepsilon'(t)$ та $\operatorname{tg}\delta(t)$) від температури, а також залежності коефіцієнта тепловіддачі випаровуванням від теплофізичних параметрів повітря, його температури та швидкості руху.

Алгоритм розрахунку включає наступні етапи. Після введення вихідних даних знаходиться поле температур у першій секції. За знайденим полем температур розраховується вологість матеріалу. Якщо вологість більша за задану, то до початкової довжини камери (першої хвилеводної секції) додається ще одна хвилеводна секція, і розрахунок повторюється. Так відбувається доти, поки вологість матеріалу не досягне заданого значення.

Висновки

1. Актуальність та доцільність використання залишків деревини після лісових пожеж та вторинного поліетиленерефталату для виробництва дерево-полімерних композитних матеріалів підтверджується значними екологічними та економічними перевагами. Це дозволяє не лише зменшити обсяги відходів, а й покращити властивості матеріалів, такі як термо- та водостійкість.

2. Експериментальні дослідження вказують на доцільність додавання алюмохромфосфату для досягнення необхідної водостійкості та міцності матеріалу при вогневому впливі. Математичні моделі, що були отримані в ході досліджень, відображають взаємозв'язок між керованими факторами (питомою тривалістю пресування та частиною добавки антипірену) та експлуатаційними властивостями композиту, такими як міцність і водостійкість. Це дає можливість точніше прогнозувати результати виробництва та покращити процес виготовлення матеріалу. Зниження горючості композиту завдяки додаванню антипіренів до складу сполучного дає змогу підвищити безпеку матеріалів, що використовують у будівництві. Розроблені рекомендації дозволяють отримати композити з бажаними фізико-механічними властивостями, зокрема вогнестійкістю, що є важливим для безпеки будівельних матеріалів.

3. Використання залишків деревини після лісових пожеж та поліетиленерефталату для виробництва будівельних матеріалів відкриває нові можливості для переробки сировини, що відповідає екологічним вимогам сучасного будівництва.

Список використаних джерел

1. Suska A. A. Ways to utilize wood remains after forest fires caused by war / A. A. Suska, V. I. Diakonov, O. S. Skrypnyk, O. V. Dyakonov, O. O. Borovenskyi // Science and technology: challenges, prospects and innovations. Proceedings of the 4th International scientific and practical conference. CPN Publishing Group. Osaka, Japan. 2024. Pp. 234-236. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2024/11/science-and-technology-challenges-prospects-and-innovations-28-30.11.24.pdf> (date of access: 27.04.2025).
2. Suska A. A. Production of energy-efficient solid biofuel from wood waste after forest fires caused by war / A. A. Suska, V. I. Diakonov, O. S. Skrypnyk, O. O. Borovenskyi // Science and technology: challenges, prospects and innovations. Proceedings of the 4th International scientific and practical conference. CPN Publishing Group. Osaka, Japan. 2024. P. 30-32. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2024/11/science-and-technology-challenges-prospects-and-innovations-28-30.11.24.pdf> (date of access: 27.04.2025).

3. Utilization of Fire-Impacted Timber: A Summary of a Survey of Mill Procurement Personnel and a Review of the Literature. Harberts Isaac C. et al. University Digital Conservancy: Home. URL: <https://conservancy.umn.edu/items/678443d7-2cc1-4eb6-a2b3-eca97b993e45> (date of access: 24.11.2024).

4. Василюк О., Коломицев Г. К., Пархоменко В. Ліси у вогнях війни. Втрачено понад 1000 квадратних кілометрів – Ukraine War Environmental Consequences Work Group. Ukraine War Environmental Consequences Work Group – Seeking solutions through information sharing about the environmental impacts of the war. UWEC Work Group. URL: <https://uwecworkgroup.info/uk/flames-of-war-how-ukraine-lost-over-1000-square-kilometers-of-forest/> (дата звернення: 24.11.2024).

5. G.A.O. Tiago, A. Mariquito, S. Martins-Dias, et al. The problem of polyethylene waste – Recent attempts for its mitigation. Science of the Total Environment. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164629>

6. Pavlo Lyuty, Pavlo Bekhta and Galyna Ortynska. Lightweight Flat Pressed Wood Plastic Composites: Possibility of Manufacture and Properties. Drvna Industrija. 2018. 69 (1). P. 55-62.

7. Physicomechanical Properties of Sustainable Wood Plastic Composites of Tropical Sawdust and Thermoplastic Waste for Possible Utilization in the Wood Industry [Electronic resource] / Jude I. Duruaku [et al.] // Journal of Sustainable Bioenergy Systems. 2023. Vol. 13, no. 04. P. 149–171. <https://doi.org/10.4236/jsbs.2023.134009> (date of access: 27.04.2025).

8. Pavlo Bekhta, Antonio Pizzi, Iryna Kusniak, Nataliya Bekhta, Orest Chernetskyi and Arif Nuryawan. A Comparative Study of Several Properties of Plywood Bonded with Virgin and Recycled LDPE Films. Materials. 2022, 15(14), 4942. doi:10.3390/ma15144942

9. Daniel Friedrich. Thermoforming of wood-plastic composites: a compolytics approach translating combined polymer and policy analyses into industrial design principles. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2023. 124: 3533–3551. doi:10.1007/s00170-022-10760-9

10. Development of Wood Polymer Composites from Recycled Wood and Plastic Waste: Thermal and Mechanical Properties / S. G. Nukala et al. Journal of Composites Science. 2022. Vol. 6, no. 7. P. 194. URL: <https://doi.org/10.3390/jcs6070194>

11. A Critical Review on Wood-Based Polymer Composites: Processing, Properties, and Prospects / Manickam Ramesh [et al.] // Polymers. – 2022. – Vol. 14, no. 3. – P. 589. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/polym14030589>

12. Суска А.А., Д'яконов В.І., Дьяконов О.В. Піріжок В.С. Створення композиційного матеріалу для домобудування та меблевих виробів/ Science and innovation of modern world. Proceedings of the 7th International scientific and practical conference. London, United Kingdom. 2023. Pp. 285-292.

13. Огрів Л.Ю., Ястрібінська А.В., Шаповалов І.В., Манушкіна Е. В. Композиційні матеріали з поліпшеними експлуатаційними характеристиками і підвищеною біостійкістю. Будівельні матеріали та вироби. 2003. №9. С. 24-26.

14. Юрченко В.В., Тимофеева Л.А., Плугін А.А. Методика експериментальних досліджень з розроблення складу і технології композиційного матеріалу із термопластичних полімерів і відходів деревини. Збірник наукових праць УкрДАЗТ, 2013, Вип. 138. С. 65-70.

15. Пат. 104089 Україна, МПК C10L Пат. 5/44. Паливний брикет / Дьяконов О.В., Д'яконов В.І., Полянський О.С., Хворост М.В., Білим П.А. – №201506879; заявл. 10.07.2015; опубл. 12.01.2016, Бюл. № 1. 2 с.

16. Пат. 132620 Україна, МПК B27L 11/00. Гнучка технологічна лінія виготовлення паливних брикетів із рослинних відходів з адаптером температури /

Дьяконов О.В., Д'яконов В.І., Полянський О.С., Грязнова С.А., Домбровська А.В. №201807056; заявл. 23.06.2018; опубл. 11.03.2019, Бюл. № 5. 9 с.

17. Вплив породи деревини і товщини термопластичної плівки вторинного поліетилену низької густини на фізичні властивості фанери / О. М. Чернецький та ін. Scientific Bulletin of UNFU. 2022. Т. 32, № 3. С. 73–78. URL: <https://doi.org/10.36930/40320312>.

References

1. Suska, A. A., Diakonov, V. I., Skrypnyk, O. S., Dyakonov, O. V., & Borovenskyi, O. O. (2024). Ways to utilize wood remains after forest fires caused by war. Y Science and technology: challenges, prospects and innovations (с. 234–236). CPN Publishing Group. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2024/11/science-and-technology-challenges-prospects-and-innovations-28-30.11.24.pdf>
2. Suska, A. A., Diakonov, V. I., Skrypnyk, O. S., & Borovenskyi, O. O. (2024). Production of energy-efficient solid biofuel from wood waste after forest fires caused by war. Y Science and technology: challenges, prospects and innovations (с. 30–32). CPN Publishing Group. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2024/11/science-and-technology-challenges-prospects-and-innovations-28-30.11.24.pdf>
3. Utilization of Fire-Impacted Timber: A Summary of a Survey of Mill Procurement Personnel and a Review of the Literature. (б. д.). University Digital Conservancy :: Home. <https://conservancy.umn.edu/items/678443d7-2cc1-4eb6-a2b3-eca97b993e45>
4. Flames of war: How Ukraine lost over 1,000 square kilometers of forest – Ukraine War Environmental Consequences Work Group. (б. д.). Ukraine War Environmental Consequences Work Group – Seeking solutions through information sharing about the environmental impacts of the war. UWEC Work Group. <https://uwecworkgroup.info/flames-of-war-how-ukraine-lost-over-1000-square-kilometers-of-forest/>
5. Tiago, G.A.O., Mariquito, A., Martins-Dias, S., et al. (2023). The problem of polyethylene waste – Recent attempts for its mitigation. Science of the Total Environment. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164629>
6. Pavlo Lyuty, Pavlo Bekhta & Galyna Ortynska. Lightweight Flat Pressed Wood Plastic Composites: Possibility of Manufacture and Properties. Drvna Industrija. 2018. 69 (1). Pp. 55-62.
7. Duruaku, J. I., Okoye, P. A. C., Onuegbu, T. U., Onwukeme, V. I., Okoye, N. H., & Nwadiogbu, J. O. (2023). Physicomechanical Properties of Sustainable Wood Plastic Composites of Tropical Sawdust and Thermoplastic Waste for Possible Utilization in the Wood Industry. Journal of Sustainable Bioenergy Systems, 13(04), 149–171. <https://doi.org/10.4236/jsbs.2023.134009>
8. Pavlo Bekhta, Antonio Pizzi, Iryna Kusniak, Nataliya Bekhta, Orest Chernetskyi & Arif Nuryawan. (2022). A Comparative Study of Several Properties of Plywood Bonded with Virgin and Recycled LDPE Films. Materials, 15(14), 4942. doi:10.3390/ma15144942
9. Daniel Friedrich. (2023). Thermoforming of wood-plastic composites: a compolytics-approach translating combined polymer and policy analyses into industrial design principles. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 124. 3533–3551. doi:10.1007/s00170-022-10760-9
10. Nukala, S. G., Kong, I., Kakarla, A. B., Kong, W., & Kong, W. (2022). Development of Wood Polymer Composites from Recycled Wood and Plastic Waste: Thermal and Mechanical Properties. Journal of Composites Science, 6(7), 194. <https://doi.org/10.3390/jcs6070194>

11. Ramesh, M., Rajeshkumar, L., Sasikala, G., Balaji, D., Saravanakumar, A., Bhuvaneswari, V., & Bhoopathi, R. (2022). A Critical Review on Wood-Based Polymer Composites: Processing, Properties, and Prospects. *Polymers*, 14(3), 589. <https://doi.org/10.3390/polym14030589>
12. Suska, A. A., Diakonov, V. I., Diakonov, O. V., Pyrizhok, V. S. (2023). Stvorennia kompozytsiinoho materialu dlia domobuduvannia ta meblevykh vyrobiv [Creation of composite material for home construction and furniture products]. *Science and innovation of modern world. Proceedings of the 7th International scientific and practical conference.* London, United Kingdom. 285-292.
13. Ohriv, L. Iu., Yastribinskaia, A. B., Shapovalov, I. V., Manushkina, E. V. (2003). Kompozytsiini materialy z polipshenymy ekspluatatsiinymy kharakterystykamy i pidvyshcheniu biostikistiu {Composite materials with improved operational characteristics and increased biostability}. *Budivelni materialy ta vyroby [Building materials and products].* No 9. 24-26.
14. Yurchenko, V. V., Tymofeieva, L. A., Pluhin, A. A. (2013). Metodyka eksperymentalnykh doslidzhen z rozroblennia skladu i tekhnolohii kompozytsiinoho materialu iz termoplastychnykh polimeriv i vidkhodiv derevyny [Methods of experimental research on the development of composition and technology of composite material from thermoplastic polymers and wood waste]. *Zbirnyk naukovykh prats UkrDAZT. Vyp. 138.* S. 65-70.
15. Ievlanov, M., Serdiuk, N., Feshchenko, A., Pivnenko, L., Dyakonov, V. (2020) Improving the mathematical model of change in the body state of an employee. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(10-103). 32–42.
16. Patent 104089 Ukraina, MPK S10L Pat. 5/44. Palyvnyi bryket [Fuel briquette]. Diakonov, O. V., Diakonov, V. I., Polianskyi, O. S., Khvorost, M. V., Bilym, P. A. – №201506879; zaiavl. 10.07.2015; opubl. 12.01.2016, Biul. 1. 2 s.
17. Patent 132620 Ukraina, MPK V27L 11/00. Hnuchka tekhnolohichna liniia vyhotovlennia palyvnykh bryketiv iz roslynnykh vidkhodiv z adapterom temperatury [Flexible technological line for the production of fuel briquettes from vegetable waste with a temperature adapter]. Diakonov, O. V., Diakonov, V. I., Polianskyi, O. S., Hriaznova, S. A., Dombrovska, A. V. №201807056; zaiavl. 23.06.2018; opubl. 11.03.2019, Biul. 5. 9 s.
18. Chernetskyi, O. M., Kusniak, I. I., Bekhta, N. S., & Kopanskuy, M. M. (2022). The influence of wood species and thickness of thermoplastic film of secondary low density polyethylene on physical properties of plywood. *Scientific Bulletin of UNFU*, 32(3), 73–78. <https://doi.org/10.36930/40320312>.

Пахучий А. М.,
Дьяконов С. О.

Державний
біотехнологічний
університет, м. Харків,
Україна
E-mail:
andreyi09773@gmail.com

**АНАЛІЗ СИСТЕМ КОПІЮВАННЯ
ПОВЕРХНІ ПОЛЯ В КОНСТРУКЦІЯХ
ЗЕРНОЗБИРАЛЬНИХ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИНАХ**

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-26-102-110>

УДК 631.35, 681.52

Пахучий А.М., Дьяконов С.О. Аналіз систем копіювання поверхні поля в конструкціях зернозбиральних сільськогосподарських машинах.

Анотація. У цій роботі надано пояснення, описано принцип дії та визначено головне призначення систем, що забезпечують копіювання поверхні поля збиральними сільськогосподарськими машинами. Здійснено аналіз існуючих механізмів балансування та систем копіювання, застосовуваних у конструкціях сільськогосподарських машин для збирання врожаю, з акцентом на їх сильних і слабких сторонах. За результатами аналізу різних конструкцій систем копіювання запропоновано їхню класифікацію та роз'яснено, як вони структурно пов'язані між собою, що дозволяє дати загальну характеристику цим системам.

Ключові слова: комбайн, жниварка, висота зрізу, копіювання рельєфу, механічні системи копіювання, гідравлічні системи копіювання, автоматичні системи копіювання, сільськогосподарська машина.

Pakhuchyi A.M., Diakonov S.O. Analysis of field surface copying systems in designs of grain harvesting agricultural machines.

Abstract. This work provides an explanation, describes the principle of operation and determines the main purpose of systems that provide the surface of the field with harvesting agricultural machines. The analysis of existing balancing mechanisms and copying systems used in agricultural structures for harvesting has been analyzed, with an emphasis on their strengths and weaknesses. According to the results of the analysis of different designs of copying systems, their classification is proposed and explained how they are structurally related, which allows to give a general characteristic of these systems.

Key words combine, harvester, cut height, relief copy, mechanical copying systems, hydraulic copying systems, automatic copying systems, agricultural machine.

Постановка проблеми

Сільськогосподарські машини для збирання врожаю це вид техніки, основне завдання якої полягає у збиранні та первинній обробці продукції сільського господарства. Для ефективного збирання та подальшої передачі зібраної маси в технологічний ланцюг, ці машини оснащуються різноманітними пристроями, такими як зернові, трав'яні жниварки, валкові жниварки, роторні косарки, підбирачі тощо.

Процес збирання за допомогою адаптерів, встановлених на зернозбиральних або кормозбиральних машинах, відбувається таким чином: стебла рослин потрапляють до

ріжучого механізму жниварки, зрізаються і транспортуються шнеком або стрічкою до центру жниварки. Потім зрізана маса підхоплюється та переміщується до вихідного отвору жниварки, звідки вона направляється або на поле для просушування у вигляді валка, або в технологічний тракт комбайна (похила камера або живильно-подрібнювальний пристрій) для подальшої обробки.

Для забезпечення якісного збирання врожаю з мінімальними втратами важливо підтримувати задану висоту зрізу відносно поверхні поля. Оскільки поверхня поля не є рівною, необхідно, щоб адаптер мав можливість копіювати її рельєф. Це досягається за допомогою систем копіювання рельєфу, що забезпечують безперервне та ефективне виконання процесу збирання з мінімальними втратами. Цей аспект є критично важливим при розробці, модернізації та підвищенні ефективності систем копіювання, що використовуються в сільськогосподарських збиральних машинах.

Варто зазначити, що в умовах жорстких обмежень як за часом, так і за фінансовими засобами, при проєктуванні нових збиральних машин і комбайнів використання систем копіювання певного типу характеризується досвідом застосування таких систем у моделях минулих років. Тому складається ситуація, за якої в межах модельного ряду на нових машинах рідко використовуються кардинально нові системи копіювання. Це пов'язано з тим, що проєктуванням одного типу збиральних машин займається один робочий колектив, а іншого типу машин – інший колектив, не пов'язаний з першим. Часто спрацьовує установка, що при проєктуванні доцільно використовувати таку систему, яка раніше зарекомендувала себе непогано. Це призводить до того, що в нових енергонасичених самохідних збиральних машинах із широкою лінійкою різноманітних (як за габаритами, так і за масою) адаптерів часом доводиться стикатися з погіршенням якості роботи систем копіювання, які спочатку були призначені лише для певного типу адаптерів. Як підсумок – необхідність шукати компромісні варіанти для модернізації таких систем.

Для пошуку найефективніших рішень виникає необхідність в упорядкуванні інформації щодо конструкцій різноманітних систем копіювання поверхні поля, що використовуються в різних збиральних машинах.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У різних навчальних посібниках, як правило, подається описова частина загальної конструкції збиральних машин і комбайнів, у яких наявність у їх складі систем копіювання подається або як факт [1], або як витяг з інструкцій з експлуатації [2, 3], або як збірний опис принципу роботи механічної та автоматичної систем копіювання [4]. При цьому на сьогодні існує безліч різноманітних систем копіювання, дослідження яких наводиться лише у вузькоспеціалізованих публікаціях за заданою тематикою. Наприклад, у публікаціях [5, 6] описано автоматичні системи копіювання, що застосовуються на деяких комбайнах і косарках. У публікаціях [7, 8] наводиться опис систем з безконтактним типом копіювання. У публікації [9] пропонується використовувати систему, названу авторами пристроєм для автоматичного копіювання рельєфу поля, що використовується для зернозбирального комбайна. І це лише мала частина подібних робіт, у яких описуються різні механізми та системи, що виконують по суті одну функцію – підтримання сталості висоти розташування робочого органу відносно поверхні поля.

Аналіз конструкцій систем копіювання показує, що підтримання висоти розташування робочих органів відносно поверхні поля виконується різними механізмами та способами, серед яких зустрічаються як різнорідні елементи конструкції, що виконують однакову функцію, так і конструктивно схожі між собою,

але виконують різну роль. Зі сказаного випливає необхідність структурування та класифікації систем копіювання рельєфу поля.

Формулювання мети досліджень

Метою даної роботи є виконати аналіз систем копіювання поверхні поля в конструкціях зернозбиральних сільськогосподарських машинах.

Результати досліджень

Усі існуючі системи копіювання рельєфу сільськогосподарських полів можна умовно класифікувати на три основні категорії: пасивні, активні та гібридні. Цей поділ ґрунтується на принципах функціонування системи, наявності або відсутності керування та рівні адаптивності до змін рельєфу.

До пасивних відносяться такі системи, які не передбачають активного регулювання робочих параметрів під час виконання польових робіт. Їх налаштування виконується один раз перед початком роботи, і в подальшому ці параметри залишаються незмінними, незалежно від змін у рельєфі чи умовах навколишнього середовища. Пасивні системи можуть бути реалізовані в різних конструктивних варіантах: Механічні системи – з використанням пружинно-важільних пристроїв; гідропневматичні системи – з замкненим контуром типу «гідроциліндр – пневмогідроаккумулятор» (ГЦ–ПГА). У таких системах пневмогідроаккумулятор спільно з гідроциліндром виконує функцію пружного компенсатора, що забезпечує певну ступінь плавності ходу та амортизації навантажень.

Під час роботи сільськогосподарської техніки, зокрема в період збирання врожаю, поверхня поля зазнає змін у двох напрямках – повздовжньому (вздовж напрямку руху машини) та поперечному (перпендикулярно до руху). Це вимагає від систем копіювання здатності відстежувати рельєф у відповідній площині. Залежно від характеру руху та способу копіювання, системи поділяють на: системи з повздовжнім копіюванням; системи з поперечним копіюванням; універсальні системи, які забезпечують копіювання одночасно в обох площинах.

Найчастіше у пасивних системах застосовують останній тип – повздовжньо-поперечне копіювання, що реалізується через пружинно-важільні механізми. Подібні конструкції широко використовуються у самохідних косарках, де ліве та праве підвішування ріжучого апарата функціонують незалежно одне від одного. Така конструктивна особливість забезпечує кращу адаптацію до змін рельєфу.

Аналогічні системи були впроваджені у вітчизняних зернозбиральних комбайнах, таких як «Славутич» КЗС-9-1, де пружинні механізми забезпечували ефективне копіювання рельєфу без необхідності автоматичного регулювання (рис. 1).

Однією з характерних особливостей механізмів копіювання у конструкції зернозбиральних комбайнів є використання взаємозв'язаних нижніх важелів, виконаних у вигляді П-подібної рамки. Ця рамка фіксується до корпусу похилої камери за допомогою одного сферичного шарніра, що забезпечує можливість відносного руху механізму в кількох площинах.

У подібних конструкціях пружинні блоки виконують подвійну функцію — вони забезпечують зрівноважування як у повздовжньому, так і в поперечному напрямках. Такий підхід дозволяє мінімізувати кількість елементів у конструкції та спростити загальну компоновку. Однак, попри очевидні переваги подібної схеми, вона має й низку суттєвих недоліків: високі втрати на гістерезис, що призводить до енергетичних втрат при зміні навантаження; складність у досягненні стабільної характеристики

реакції опорного елемента (башмака) у повному діапазоні копіювання — як у продовжній, так і в поперечній площинах; взаємний вплив параметрів лівої та правої сторони механізму, що ускладнює точне налаштування.

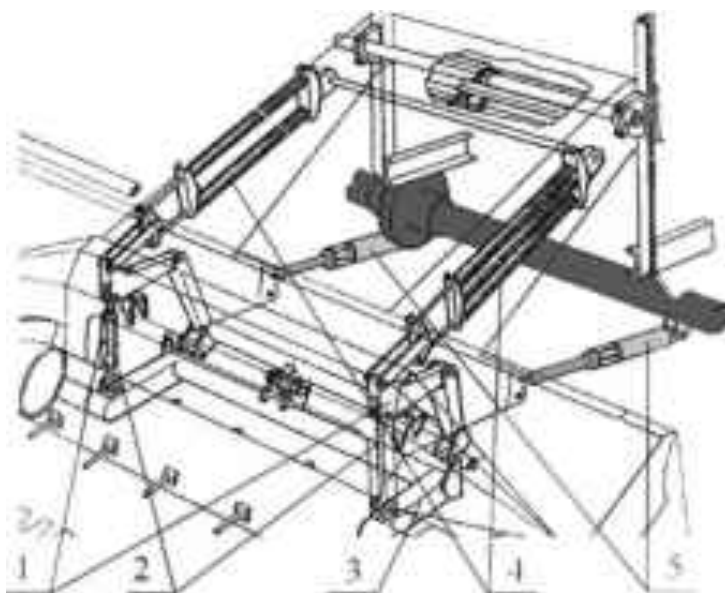


Рис. 1. Система зрівноваження комбайнів: 1 – верхній важіль; 2 – розкіс (підвіска); 3 – нижній важіль; 4 – пружинні блоки; 5 – гідроциліндри підйому (опускання).

Для комбайнів великої потужності — ускладнення в процесі агрегування із жниварками та іншими навісними адаптерами. У новітніх моделях зернозбиральних комбайнів, де застосовуються пружинно-важільні копіювальні механізми, зазвичай практикується розділення функцій повздовжнього та поперечного копіювання (рис. 2). Це дозволяє досягти більшої точності та надійності. Для реалізації такого поділу використовується перехідна рама 8, до якої кріпиться адаптер жниварки. Вісь обертання в повздовжньому напрямку 3, що дозволяє нахиляти адаптер вперед-назад відносно похилої камери 4. Вісь обертання в поперечному напрямку 1 – для можливості бокового копіювання. У конструкцію входять два окремі пружинні блоки — кожен зі своїми характеристиками, тягами 2 та важелями 5. Це рішення дозволяє чітко розділити навантаження і функції, забезпечити точну адаптацію жниварки до рельєфу поля в обох напрямках, мінімізувати взаємний вплив одного напрямку копіювання на інший.

Запровадження двох окремих механізмів для повздовжнього та поперечного копіювання замість єдиного універсального дозволило суттєво спростити процес агрегування жниварки з комбайном. Це конструктивне рішення також значно скоротило час, необхідний для підготовчих і завершальних операцій, зокрема налаштування системи копіювання перед початком роботи та її демонтажу після завершення.

Для забезпечення ефективної роботи обох механізмів у парі, критично важливим є правильний розподіл залишкових сил реакції, що діють на опорні елементи (башмаки). Сила реакції на башмак від повздовжнього механізму копіювання повинна перевищувати відповідну силу від поперечного механізму по всьому діапазону висот рельєфу. У такому випадку, коли крайній башмак жниварки натрапляє на нерівність, відпрацювання рельєфу відбувається переважно в поперечному напрямку, забезпечуючи точне копіювання. Якщо ж навпаки – залишкова сила реакції повздовжнього механізму менша, ніж у поперечного, адаптер жниварки не адаптується

локально, а «вспливає» по всій ширині у повздовжньому напрямку. Це призводить до втрат по висоті зрізу на всій ширині жнивarki, що знижує якість збирання врожаю. Щоб зменшити взаємний вплив двох механізмів один на одного, їх розміщують у різних площинах відносно корпусу похилої камери. Це дозволяє забезпечити автономність роботи кожного з механізмів, підвищити точність копіювання та полегшити технічне обслуговування.

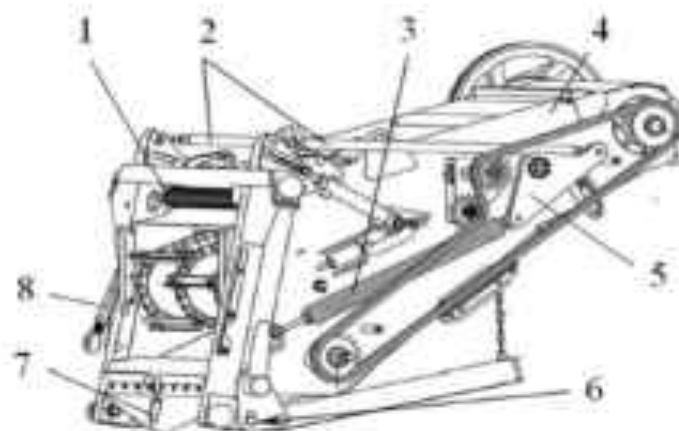


Рис. 2. Пружинно-важільні механізми врівноваження комбайнів:

1 – блок пружин поперечного врівноваження; 2 – тяга; 3 – блок пружин поздовжнього врівноваження; 4 – рама похилої камери; 5 – двоплечовий важіль; 6 – вісь качання рамки; 7 – вісь качання жнивarki; 8 – рамка перехідна.

У деяких моделях комбайнів компанії Case механізми поздовжнього копіювання розташовані в горизонтальній площині над похилою камерою. Водночас механізми поперечного врівноваження встановлюються з боків похилої камери.

У зв'язку з цим, за розміщенням пружинно-важільних механізмів щодо приймального пристрою збиральної сільськогосподарської машини – незалежно від того, чи йдеться про похилу камеру (НК), подаюче-подрібнювальний апарат (ППА) або навішування – можна відокремити механізми копіювання з боковим (у вертикальній площині), фронтальним (спереду) або горизонтальним (верхнім/нижнім) розташуванням.

Багаторічний досвід експлуатації збиральної сільськогосподарської техніки свідчить, що пружинно-важільні механізми копіювання вирізняються конструктивною простотою, зручністю в ремонті та добре показали себе на полях з незначною нерівністю рельєфу. Однак на ефективність їхньої роботи істотно впливає великий статистичний розкид висот нерівностей навіть у межах одного поля. Це пов'язано з конструктивними особливостями таких механізмів. При перевищенні робочого діапазону вгору різко зростає навантаження на башмаки, що призводить до ефекту «бульдозерування», надмірного ущільнення або руйнування верхнього шару ґрунту, а також потрапляння ґрунту разом із рослинною масою. При виході нижче робочого діапазону адаптер зависає, що спричиняє втрати через підвищення зрізу. Крім того, можливе виникнення ефекту «галопування», що погіршує якість зрізу. До недоліків пружинно-важільних механізмів також належить необхідність використання суттєво різних геометричних параметрів важелів і тяг для різних вагових категорій адаптерів (залежно від розташування центра мас і загальної ваги). Це ускладнює компонування і налаштування механізму, особливо якщо він розміщений, наприклад, у верхній частині похилої камери зернозбирального комбайна, через вимоги до оглядовості основних

робочих органів з кабіни. Також це не дозволяє застосувати принцип уніфікації систем для ефективного копіювання всього модельного ряду адаптерів.

Наступною групою пасивних систем копіювання є гідропневматичні системи копіювання, що працюють на основі замкненого контуру «гідроциліндр – пневмогідроаккумулятор (ПГА)». Такі системи набули широкого поширення на самохідних кормозбиральних комбайнах. Схематичний приклад подібної системи наведено на Рис. 3. Подібні схеми застосовуються і в зернозбиральних комбайнах деяких виробників. У таких механізмах як пружний елемент замість звичайних пружин використовуються гідроциліндри, з'єднані з пневмогідроаккумуляторами.

Основний принцип роботи полягає в тому, що адаптер жорстко з'єднаний із подаюче-подрібнювальним апаратом (ППА) і повторює рельєф поля шляхом коливання разом із ППА навколо шарніра, розташованого на осі обертання вала подрібнювального барабана. Така схема набула широкого застосування в кормозбиральних комбайнах, оскільки дозволяє сформувати постійну зону переходу технологічної маси з адаптера до подаючого апарата в поздовжньому напрямку. Ця зона є критично важливою для стабільного процесу підпресування та подальшого подрібнення маси, що надходить.

У пасивних гідропневматичних системах ті самі гідроциліндри, які використовуються для підйому адаптера та переведення його в транспортне положення, також служать для розвантаження опорних елементів адаптера. Це забезпечує першу вагому перевагу таких систем – відсутність потреби у двох виконавчих елементах. Один встановлений гідроциліндр виконує обидві функції: розвантаження адаптера під час роботи в діапазоні копіювання та підйом у транспортне положення.

Другою перевагою є здатність системи «гідроциліндр – пневмогідроаккумулятор» діяти як пружний елемент, що дає змогу підбирати необхідну характеристику зміни реакції на опорних елементах адаптера.

Втім, розробку гідропневматичних систем стримують обмеження, пов'язані з розміщенням гідроциліндрів у межах конструкції комбайна через необхідність дотримання кліренсу або використання стандартних типорозмірів циліндрів. З одного боку, для максимально ефективної роботи системи врівноваження в робочому режимі потрібно досягти підвищеного тиску в замкнутому контурі «ГЦ – ПГА», що забезпечується або використанням гідроциліндрів з меншим діаметром, або зменшенням плеча їх кріплення в робочому діапазоні поздовжнього копіювання. З іншого боку, для забезпечення максимальної висоти підйому адаптера в транспортне положення необхідне зниження робочого тиску — шляхом застосування гідроциліндрів більшого діаметра або встановленням їх на більшу відстань (плече). У результаті, в першому випадку збільшення робочого тиску не завжди забезпечує підйом найважчих адаптерів, а в другому – не досягається належна якість копіювання.

Незважаючи на універсальність гідропневматичного механізму копіювання, який дозволяє налаштовувати його для роботи з адаптерами різних типів і вагових категорій, він, як і пружинно-важільні механізми, має обмежений діапазон ефективної роботи по висоті рельєфу поля. Система з замкненим контуром «гідроциліндр — пневмогідроаккумулятор» характеризується значною інерційністю та затримкою реакції при роботі на високих швидкостях, що не дозволяє підтримувати належну якість технологічних операцій за умов значних кінематичних збурень.

Різкі зміни висоти поверхні поля, наприклад, через купини, призводять до раптового зростання навантаження на опорний башмак, що залежно від типу ґрунту може спричинити ефект "бульдозерування" або ударний вплив з наступним підняттям адаптера і його уповільненим опусканням. Це призводить до нестабільного утримання висоти зрізу та пов'язаних із цим втрат.

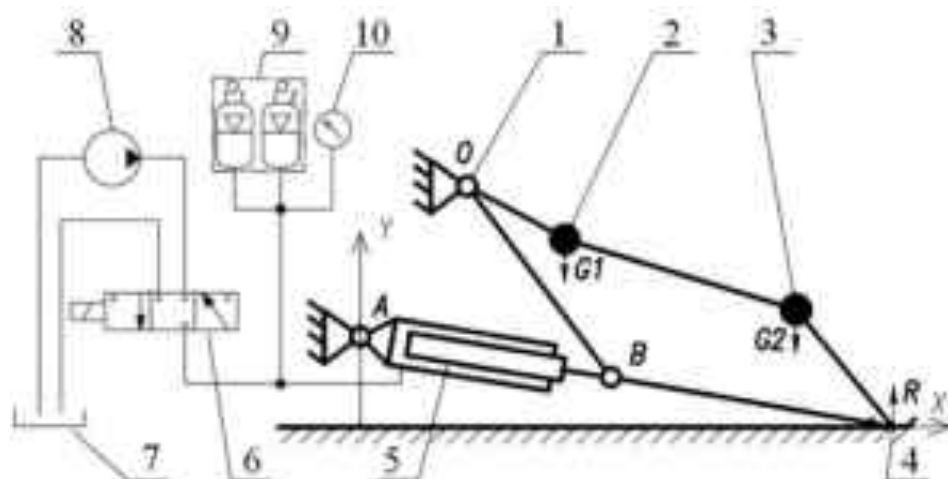


Рис. 3. Принципова схема системи копіювання гідропневматичного типу:
1 – вісь коливання ППА разом з адаптером; 2 – точка $G1$ – центр мас ППА; 3 – точка $G2$ – центр мас адаптера; 4 – точка R – опорний елемент адаптера; 5 – гідроциліндр; 6 – гідророзподільник; 7 – гідробак; 8 – гідронасос; 9 – блок пневмогідроаккумуляторів (ПГА); 10 – датчик тиску

Ще одним суттєвим недоліком пасивних гідропневматичних систем є значні гістерезисні втрати, які обумовлені характеристиками виконавчих елементів системи і помітно впливають на точність копіювання.

Наступним етапом розвитку стали активні системи копіювання, що забезпечують адаптерам самохідної сільськогосподарської техніки можливість точно повторювати рельєф поля. Їх можна вважати вдосконаленою формою пасивних гідропневматичних систем. У пасивних системах контроль за зміною висоти здійснює опорний елемент (колесо або башмак), який контактує з ґрунтом і сприймає частину ваги адаптера. Але така схема має обмежену ефективність через згадані вище недоліки.

Для їх усунення в конструкції гідропневматичних систем почали застосовувати додаткові елементи та блоки керування, які дозволяють не лише фіксувати зміни рельєфу, а й активно реагувати на них. До таких систем додають сенсори, датчики, електронні блоки аналізу вхідних сигналів, що дозволяє регулювати роботу системи за заданими алгоритмами. Ці технології дістали назву активних або автоматичних систем копіювання, які працюють на основі принципу слідкуючого гідроприводу.

Впровадження таких систем у конструкцію зернозбиральних комбайнів забезпечило переваги над механічними системами балансування. У механічних пружинно-важільних системах пружини частково компенсують лише вагу жниварки, тому виникає потреба у з'єднанні жниварки з похилою камерою через шарнір, що забезпечує її коливання. Це веде до зміни взаємного розташування приймальних вікон жниварки та похилої камери, що потребує ефективного ущільнення для запобігання втратам зерна. Попри застосування ущільнень, змінна відстань між транспортувальними елементами жниварки та похилої камери, а також коливання кута між їхніми днищами спричиняють нерівномірну подачу маси у молотильний апарат, що своєю чергою веде до частих збоїв технологічного процесу (забивання, заклинювання), зниження продуктивності та погіршення якісних показників.

Саме тому використання стаціонарної зони в поздовжньому напрямку між вікнами жниварки і похилою камерою дозволило стабілізувати технологічний процес, спростити конструкцію і зменшити втрати.

Обговорення

Логічним кроком для вирішення вищезазначених проблем, притаманних активним автоматичним системам копіювання, є поєднання швидкодії пружинно-важільних механізмів із перевагами активних систем. Такий підхід реалізовано в комбінованих гібридних системах, де в межах невеликого діапазону копіювання (мікрорельєфу) основну роль виконує механічна система, а при виході за його межі (макрорельєф) в роботу включається активна електрогідравлічна система.

Зазвичай саме електрогідравлічна система відповідає за переведення механічного пристрою в нову робочу зону на рівні макрорельєфу. Теоретично такий підхід частково усуває один із недоліків активних систем – повільне опускання адаптера, характерне для копіювання, реалізованого за електрогідравлічною схемою.

Висновки

1. Проаналізовано різні систем копіювання рельєфу поля, які застосовуються у конструкціях сільськогосподарських збиральних машин, на основі якого можна зробити такі висновки.

2. Пасивні системи копіювання є історично першою групою систем урівноваження. Вони добре зарекомендували себе при роботі в обмеженому діапазоні рельєфу, проте мають низку недоліків. Зокрема, такі системи не здатні автоматично адаптуватися до різких змін висоти поверхні поля. Активні системи копіювання передбачають автоматичне регулювання висоти робочих органів за допомогою різноманітних засобів керування. Вони забезпечують безперервне керування процесом копіювання під час роботи, однак також мають обмеження, зокрема щодо швидкодії на швидкостях понад 6 км/год.

3. Гібридні системи копіювання поєднують переваги пасивних і активних рішень, що дозволяє забезпечити ефективну роботу на вищих швидкостях руху машини. За підсумками аналізу конструкцій систем копіювання запропоновано їхню класифікацію, що дає змогу описати особливості конкретної системи. Запропонована класифікація дозволяє сформулювати загальне уявлення про системи копіювання, що використовуються в збиральній техніці, а також виділити характеристики певної системи та окреслити перспективні напрямки для її вдосконалення.

Список використаних джерел

1. Машини для збирання зернових та технічних культур: посібник (колектив авторів за ред. В. І. Кравчука). Дослідницьке – УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. 2009. 296 с.

2. Кравчук В. І., Занько М. Д. Дослідження функціональних можливостей комбайна CASE-IH AFS - 8230 при скошуванні і полеглих хлібів. Техніка і технології АПК. 2015 №5. С. 8-13.

3. Кравчук В., Занько М. Зернові жатки сучасних комбайнів: конструкційні особливості та експлуатаційні показники. Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільськогосподарського виробництва України: зб. наук. пр. УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. 2 2019. Вип. 24 (38). С. 176-185.

4. Geng, A. J., Zhang, M., Zhang, J., Zhang, Z. L., Gao, A., Zheng, J. L. (2020). Design and Experiment of Automatic Control System for Corn Header Height. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 51(S2), P. 118-125.

5. Shukla, P., Mehta, C. R., Agrawal, K. N., Potdar R. (2021). Studies on operational frequencies of controls on self-propelled combine harvesters in India. *Journal of Agricultural Engineering*, Vol. 58, pp. 101-111.
6. Shojaei, K. (2021). Intelligent coordinated control of an autonomous tractor-trailer and a combine harvester. *European Journal of Control*, Vol. 59, pp. 82-98.
7. Mirmahdi, E., Shirazi, O. G. (2021). Installation of suitable sensors for object detection and height control on combine harvester. *SSRG Int. J. Mech. Eng.*, Vol. 8, pp.12-19.
8. Crop harvesting machine with variable header float: pat. US 20200077585 A1 / J.P. Garbald, J.T. Dunn, G.M. Leverick, R.G. Lyons, B.R. Shearer, N.G. Barnett. Publ. date: 12.03.2020.
9. Crop machine with an electronically controlled hydraulic cylinder flotation system: pat. US 10617059 B2 / J.T. Dunn, G.M. Leverick, R.G. Lyons, B.R. Shearer, K.E. Boch. Publ. date: 14.04.2020.

References

1. Machines for harvesting cereals and industrial crops: a manual (a team of authors edited by V.I. Kravchuk). Research - UkrNDIPVT them. L. Pogoril. 2009. 296 p.
2. Kravchuk V.I., Zanko M.D. Investigation of the functionality of the Case -IH AFS combine - 8230 when mowing and fallen bread. *APK technique and technology*. 2015 №5. P. 8-13.
3. Kravchuk V., Zanko M. Grain harvesters of modern combines: structural features and performance. Technical and technological aspects of development and testing of new equipment and technologies for agricultural production of Ukraine: Coll. Sciences. Ave. L. Pogoril. 2 2019. Iss. 24 (38). P. 176-185.
4. Geng, A. J., Zhang, M., Zhang, J., Zhang, Z. L., Gao, A., Zheng, J. L. (2020). Design and Experiment of Automatic Control System for Corn Header Height. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 51(S2), P. 118-125.
5. Shukla, P., Mehta, C. R., Agrawal, K. N., Potdar R. (2021). Studies on operational frequencies of controls on self-propelled combine harvesters in India. *Journal of Agricultural Engineering*, Vol. 58, pp. 101-111. Italy.
6. Shojaei, K. (2021). Intelligent coordinated control of an autonomous tractor-trailer and a combine harvester. *European Journal of Control*, Vol. 59, pp. 82-98. Iran.
7. Mirmahdi, E., Shirazi, O. G. (2021). Installation of suitable sensors for object detection and height control on combine harvester. *SSRG Int. J. Mech. Eng.*, Vol. 8, pp.12-19. India.
8. Crop harvesting machine with variable header float: pat. US 20200077585 A1 / J.P. Garbald, J.T. Dunn, G.M. Leverick, R.G. Lyons, B.R. Shearer, N.G. Barnett. Publ. date: 12.03.2020.
9. Crop machine with an electronically controlled hydraulic cylinder flotation system: pat. US 10617059 B2 / J.T. Dunn, G.M. Leverick, R.G. Lyons, B.R. Shearer, K.E. Boch. Publ. date: 14.04.2020.

Єсіпов О. В.,
Поляшенко С. О.,
Сорокін С. П.
Державний
біотехнологічний
університет, м. Харків,
Україна
E-mail: Iesipov_al@ukr.net

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК В УКРАЇНІ

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-26-111-118>

УДК 621.1

Єсіпов О.В., Поляшенко С.О., Сорокін С.П. *Перспективи використання біогазових установок в Україні.*

Анотація. Завдяки величезному територіальному потенціалу і великій кількості сільськогосподарських угідь, відносно низькій щільності населення і відносно сприятливому клімату країна має хороші початкові умови для виробництва торгівлі і використання біоенергії.

За останні роки значно зросла увага до питань раціонального поводження з сільськогосподарськими відходами в Україні як з боку влади, так і з боку наукової спільноти. Вирішення проблеми можливо шляхом здійснення ефективних заходів для швидкої, безпечної переробки відходів та отримання позитивного економічного та екологічного ефекту від утилізації та повторного використання сировини. Проблема ефективної переробки та утилізації відходів є однією з найгостріших у світі, експлуатація біогазових установок не є простим завданням. Враховуючи світовий досвід використання біогазових технологій стикаються з проблемою рентабельності біогазових установок. В основному біогазові станції використовують не стільки, як джерело енергії, скільки для нейтралізації відходів тваринництва і одержання з них високоякісного органічного добрива.

Ключові слова: біогаз, біогазові установки, біометан, біоенергетика, транспортне паливо, органічні добрива, відновлювальні джерела енергії.

Iesipov O.V., Polyashenko S.O., Sorokin S.P. *Prospects of use of biogas plants in Ukraine.*

Abstract. Due to the huge territorial potential and a large amount of agricultural land, relatively low population density and relatively with a favorable climate, the country has good initial conditions for the production, trade and use of bioenergy.

In recent years, attention to the issues of rational management of agricultural waste in Ukraine has increased significantly, both from the authorities and from the scientific community. The solution to the problem is possible by implementing effective measures for rapid, safe waste processing and obtaining positive economic and environmental effects from the utilization and reuse of raw materials. The problem of effective waste processing and utilization is one of the most acute in the world, the operation of biogas plants is not a simple task. Considering the world experience in using biogas technologies, we are faced with the problem of profitability of biogas plants. Basically, biogas plants are used not so much as a source of energy, but for neutralizing livestock waste and obtaining high-quality organic fertilizer from them.

Key words: *biogas, biogas plants, biomethane, bioenergy, transport fuel, organic fertilizers, renewable energy sources.*

Постановка проблеми

Застосування біогазу сприяє розвитку децентралізованого тепло-енергопостачання. Біогаз, доведений до якості природного газу, може використовуватися як для виробництва електроенергії та тепла в приватному і промисловому секторі, так і в якості пального для автомобілів на природному газі. Таким чином, виробництво і використання біогазу може стати суттєвим внеском до зменшення енергоімпорту, а також до підвищення безпеки постачання [3].

У Європі, США і Японії, як, власне, і скрізь, стикаються з проблемою рентабельності біогазових установок, однак у цих країнах на економічні чинники звертають мало уваги. В основному біогазові станції використовують не стільки як джерела енергії, скільки для нейтралізації відходів тваринництва і одержання з них високоякісного, збагаченого протеїном і, якщо процес бродіння відбувався в термофільних умовах, пастеризованого органічного добрива [2].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Виробництво електроенергії з біогазу відбувається за рахунок переробки тваринних або рослинних відходів, а також побутових відходів.

Це допомагає одночасно вирішити дві проблеми: зменшує негативний вплив відходів на навколишнє середовище; зменшені обсяги утворених відходів, що утилізуються у спеціальних місцях. Можливі напрями розвитку біогазових технологій в Україні представлені на рис. 1.

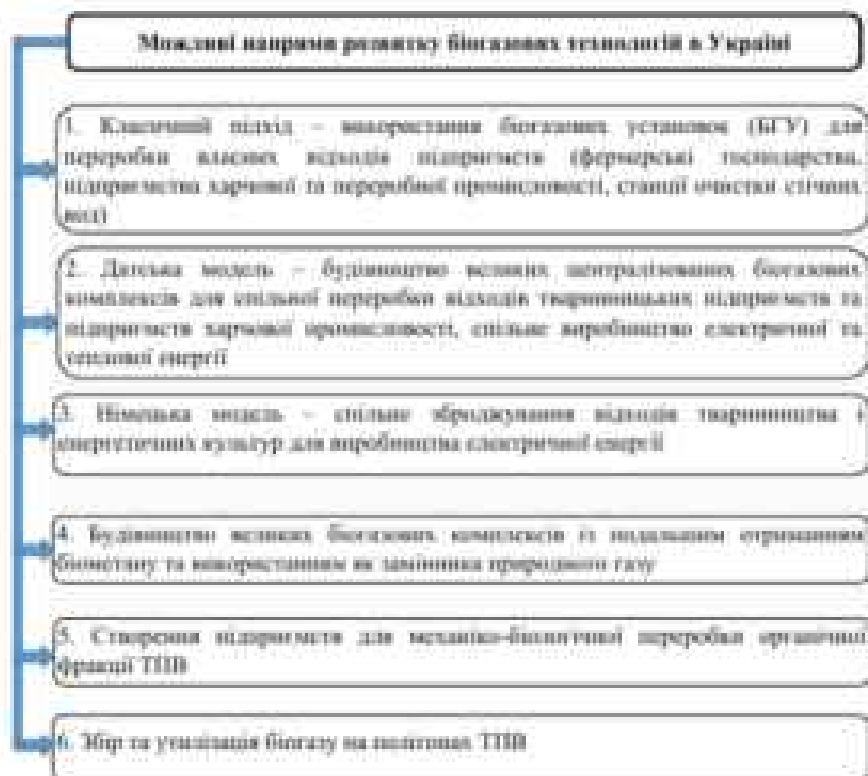


Рис. 1. Можливі напрями розвитку біогазових технологій в Україні

На сьогодні в ЄС і взагалі у світі немає жодних обов'язкових для виконання вимог з енергетичної ефективності біоенергетичних технологій, але певні рекомендації були розроблені в рамках виконання Завдання 32 Міжнародного енергетичного агентства [4], для оцінки запропонований коефіцієнт виходу енергії – E_{CNR} . Будемо вважати, що ці рекомендації є доцільними для практичного застосування як у Європі, так і в Україні.

Відповідно до рекомендацій роботи [4], для забезпечення високої енергетичної ефективності коефіцієнт виходу енергії E_{CNR} для енергоустановок на ВДЕ повинен становити як мінімум > 2 , а найбільш рекомендоване значення – більше 5.

Слід зазначити, що крім коефіцієнта виходу енергії E_{CNR} у літературі можна знайти інші показники енергоефективності технологій. По суті, всі вони також оперують поняттями енергія «на виході» та енергія «на вході» і відрізняються від E_{CNR} є лише способами зіставлення цих величин.

Очікується, що для біогазових установок E_{CNR} буде вище 2 для випадків використання як сировини більшої частки відходів сільського господарства чи інших видів відходів. Цей висновок підтверджується даними дослідження [5], де була розглянуто енергетичну ефективність БГУ, які працюють на різних видах сировини для умов Швеції. Найкращий результат ($E_{CNR} = 6,2$) отримано для випадку виробництва біогазу із жирних відходів (табл. 1). Цьому виду сировини відповідає найвищий питомий вихід біогазу – 22 ГДж/сух. т і нульові витрати на підготовку біомаси.

Таблиця 1

Характеристики біогазових установок, що працюють на різних видах сировини [5]

Вид сировини	Зміст сухого речовини, %	Вихід БГ ГДж/сух.т	Витрати енергії на вході, ГДж/сух. т			E_{CNR}
			Підготовка сировини	Транспортування сировини (15 км)	Доставка зброженого залишку на поля	
Коров'ячий гній	8	6,2	0	0,19	0,15	2,6
Свинячий гній	8	7	0	0,19	0,15	3,0
Жирні відходи	4	22	0	1,2	0,24	6,2
Енергетичні культури	23	10,6	1,9	0,07	0,24	2,4
Органічна частина ТПВ	30	12,4	0,8	0,24	0,24	3,6
Відходи скотобійні	17	9,4	0	0,14	0,24	3,6
Бадилля цукрового буряків	19	10,6	0,54	0,09	0,24	3,5
Солома	82	7,1	0,28	0,05	0,24	2,7

Найнижчий коефіцієнт виходу енергії (2,4) посідає енергетичні культури як сировина для отримання біогазу. Цей варіант має найбільші витрати енергії на

підготовку сировини, оскільки включає етап вирощування культур, та середній вихід біогазу – 10,6 ГДж/сух. т.

Зазвичай біогазові установки виробляють значно більше електроенергії (приблизно в 1,5–2 рази), ніж потрібно підприємству, відповідно, надлишки можна продавати. Використовуючи «зелений» тариф, буде вигідно продавати максимум електроенергії за високою ціною, а купувати для власних потреб – за низькою, як, власне, зараз роблять у Європі [6].

Формулювання мети досліджень

Метою даної роботи є виконати узагальнення перспектив використання біогазових установок в Україні.

Результати досліджень

Вартість електроенергії, виробленої біогазовою установкою можна розрахувати за методом енергоспоживання (LCOE), який широко використовується Міжнародним агентством з відновлюваної джерел енергії для оцінки вартості електроенергії з відновлюваних та невідновлюваних ресурсів [7].

LCOE це середня вартість виробництва електроенергії протягом життєвого циклу електростанції (включаючи всі можливі інвестиції, витрати та доходи) [7,8]. Іншими словами, це мінімальна ціна, за якою електроенергія, вироблена протягом життєвого циклу біогазової установки, повинна бути продана, щоб досягти своєї точки беззбитковості ($NPV = 0$). Якщо $NPV > 0$, то грошових надходжень від проекту достатньо, щоб: окупити вкладений капітал і забезпечити необхідну віддачу цього капіталу. В іншому випадку, якщо $NPV < 0$, проект буде збитковим для інвесторів.

Оптимістично налаштовані вітчизняні фахівці вважають, що аграрії самостійно покриватимуть витрати на електроенергію, при цьому окупність біоустановок становитиме лише три–п'ять років [9].

Таблиця 2

Кількість тварин в Україні

Вид тварин	Кількість тварин, млн.
Свині	7,48
Корови (велика рогата худоба)	2,59
Птиця	199,52
Вівці і кози	1,74

Таблиця 3

Вихід гною на кожен вид тварин

Вид тварин	Кількість гною (м ³ /тварино місце x p)	Кількість гною (м ³ /100 тварино місце x p)
Свині	1,2-6,0	-
Корови (велика рогата худоба)	7,5-21,0	-
Птиця	-	7,5
Вівці і кози	-	-

У встановленні теоретично можливого потенціалу біогазу та біометану беруться до уваги лише ті тварини, які мають найбільшу частку в загальному виробництві тварин у країні та можуть зробити значний внесок у виробництво біогазу. Сюди входять свині, корови та птиця. Для повноти в таблиці 2 також представлена кількість овець та кіз, яка не враховується при подальшому розрахунку енергетичного потенціалу.

Далі визначається вихід гною для одного виду тварин. Якість та кількість гною залежать від віку тварин, а також від місцевих рамкових умов. В деяких регіонах гній має високий вміст вільної води, що негативно впливає на вихід біогазу.

В результаті обчислень отримуємо мінімальну і максимальну теоретично можливу загальну кількість гною на один вид тварин (таблиця 4).

Таблиця 4

Мінімальна і максимальна загальна кількість гною на один вид тварин

Вид тварин	Кількість гною (м ³ / р)	Максимальна кількість гною (м ³ / р)
Свині	8.976.000	44.880.000
Корови (велика рогата худоба)	19.425.000	54.390.000
Птиця	-	14.964.000
Вівці і кози	-	-

Методи інтенсифікації процесів одержання біогазу загалом можна поділити на три групи

1. Застосування добавок, які прискорюють процеси бродіння. До речовин, які інтенсифікують процес, хоча й не надто відчутно, належать активоване вугілля, глюкоза, ацетати та оцтова кислота, мінеральні підживлювачі, мікроелементи, залізни ошурки, вітамін В₁₂ та ін. Ці добавки гарантують збільшення біогазу на 40%.

2. Двофазні процеси з використанням блоку попереднього гідролізу; Спочатку в одному апараті за низького рН проводять ензиматичний гідроліз сировини, який може (але не обов'язково) супроводжуватись метаноутворенням, а після нейтралізації підготовлену сировину подають у ферментер, у якому є своя мікрофлора і в якому рН підтримують у межах 6,9–7,5. За рахунок кращої підготовки сировини (попереднього розкладання речовин, що важко засвоюються) метаноутворення відбувається швидше і з більшим виходом (на 10–20%), а головне — прискорюється

3. Процеси із затримкою активного мулу. Суть цього способу полягає в підвищенні концентрації біомаси в реакційній зоні, за рахунок чого швидкість конверсії субстрату прискорюється подібно до того, як зростає швидкість хімічних реакцій залежно від збільшення концентрацій речовин, що взаємодіють. В ролі «хімічних агентів» виступають біомаса (активний мул) і субстрат. Але необхідно зважати ще на те, що якщо збільшиться концентрація розчинених органічних речовин субстраті більш ніж на 15 %, це може призвести до зворотнього результату, не зростання швидкості конверсії цих речовин, а до зменшення швидкості.

Обговорення

Формування енергетичних кооперативів вимагає детального підходу до вивчення техніко-економічних особливостей впровадження біогазових установок в Україні [10]. На даний час біогазові установки привертають дедалі більше уваги інвесторів, адже за умови належного планування та розрахунків, можете досягти значного економічного ефекту за відносно короткий час. Тому доцільно створювати

енергетичні кооперативи, які забезпечуватимуть необхідну кількість сировини для біогазової установки.

Для забезпечення вигідного виробництва електроенергії з біогазу на основі гною великої рогатої худоби, потрібно 2000 голів великої рогатої худоби (ВРХ), які дають 100 т/день гною. При недостатніх обсягах гною від великої рогатої худоби доцільно використовувати також інші види сировини або комбінувати їх, наприклад, свинячий гній, рослинні відходи агропромислового комплексу та інше [11].

Теплову енергію можна використовувати для обігріву сільськогосподарських приміщень, теплиць, для сушіння насіння та центрального опалення в селі [12]. Слід зазначити, що однією з переваг біогазових установок є виробництво органічних добрив в процесі анаеробного перетравлення біомаси на біогазовій установці.

Висновки

1. Впровадження технологій виробництва енергії із біомаси пропонує широкі можливості заміщення викопних видів палив. Визначення доцільності та пріоритетності впровадження певних технологій у конкретних умовах може ґрунтуватися на результатах розрахунку енергетичного балансу та балансу парникових газів – основних елементів оцінки життєвого циклу технологій.

2. Енергетична ефективність роботи біогазових установок залежить від виду сировини, застосовуваної технології та інших умов. Згідно з літературними даними, для БГУ коефіцієнт виходу енергії EY_{CNR} може коливатися від 1,8 до 6.

3. Щодо питання екологічної ефективності біоенергетичних технологій можна відзначити, що більшість установок на біогазі відповідають поточним та майбутнім вимогам Директиви 2009/28/ЄС – скорочення викидів парникових газів, обумовлене їхньою роботою, становить > 60%.

4. Нейтралізація відходів тваринництва і одержання з них високоякісного органічного добрива, окрім фінансового ефекту від економії грошей на придбання мінеральних добрив, дає позитивний агротехнічний ефект, викликаний їх перевагами, а саме: максимальне зберігання та накопичення азоту, висока абсорбція органічних речовин, відсутність насіння бур'янів та збудників мікрофлори, стійкістю до вимивання ґрунту тощо.

5. Таким чином, їх використання не тільки поліпшить фізико-механічні властивості ґрунту, збільшить урожайність сільськогосподарських культур, але в майбутньому допоможе виробляти конкурентоспроможну екологічно чисту продукцію як на внутрішньому, так і на зовнішньому ринках.

Список використаних джерел

1. Єсіпов О.В., Гринь Є.Л., Потенціал біогазу і біометану з органічних відходів тваринництва. Вісник Сумського національного аграрного університету Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів». 2023, випуск 1 (51). С. 25-28

2. Сидоров Ю.І., *biotechnologia acta* / Сучасні біогазові технології. 2013, V. 6. No1. - С. 46-60

3. Використання біометану автомобільним транспортом [Текст] / О. В. Єсіпов, А. В. Пікалов // Автомобільний транспорт в аграрному секторі: проектування, дизайн та технологічна експлуатація : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф., м. Харків, 16-17 трав. 2019 р. / Харків. нац. техн. ун-т сіл. госп-ва ім. П. Василенка. Харків : ХНТУСГ, 2019. С. 66.

4. Thomas Nussbaumer, Michael Oser. Evaluation of biomass combustion based energy systems by cumulative energy demand and energy yield coefficient. Report for International Energy Agency and Swiss Federal Office of Energy, 2004 http://www.ieabcc.nl/publications/Nussbaumer_IEA_CED_V11.pdf
5. M. Berglund, P. Börjesson. Energy analysis of biogas systems. Proc. of 2nd World Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, 10-14 May 2004, Rome, Italy, P. 687-690.
6. Біогаз — один з найперспективніших для України альтернативних джерел енергії. — [jankoy.org.ua/ page.php?id=5078](http://jankoy.org.ua/page.php?id=5078).
7. Р. Шульц (2012) Виробництво і використання біогазу в Україні з.т. / Biogasrate.V. – 2012. - С. 74
8. Калетнік Г.М., Здирко Н.Г., Фабіянська В.Ю. (2018). Економіка. Фінанси. Менеджмент: актуальні питання науки і практики. [Біогаз в домогосподарствах – запорука енергонезалежності сільських територій України]. № 8. С. 7-22. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/efmapnp_2018_8_3.
9. Виробництво біогазу в Україні. Реферат <http://referat.parta.ua/referat/117203/>
10. Sakun, L.M., Riznichenko, L.V., Vielkin, B.O. (2020). Perspektyvy rozvytku rynku biohazu v Ukraini ta za kordonom [Prospects for the development of the biogas market in Ukraine and abroad]. Ekonomika i orhanizatsiia upravlinnia. Vinnytsia: 1(37), s. 160-170. (in Ukrainian).
11. Vielkin, B. O., Mazharenko, K.P. (2018). Problemy utylizatsii vidkhodiv na rehionalnomu rivni [Problems of waste disposal at the regional level]. Materialy Mizhnarodnoho forumu «Aktualni problemy ta perspektyvy rozvytku natsionalnoho hospodarstva v umovakh hlobalnoi nestabilnosti». Kremenchuk: S. 271–273. (in Ukrainian).
12. Poliashenko, D. M., Poliashenko, S. O., Yesipov, O. V. (2019). Otrymannia teplovoi enerhii na osnovi biohazu [Production of heat energy based on biogas]. Innovatsiini rozrobky v aharnii sferi : materialy Mizhnarodna naukovopraktychna konferentsiia "Molod i tekhnichniy prohres v APV " m. Kharkiv; T. 2. P. 49.

References

1. Yesipov O.V., Grin E.L., Biogas and biomethane potential from organic waste of livestock. Bulletin of Sumy National Agrarian University Series "Mechanization and automation of production processes". 2023, issue 1 (51). P. 25-28.
2. Sidorov Y.I., biotechnologia acta / Modern biogas technologies. 2013, V. 6. No. 1. P. 46-60.
3. Use of biomethane by road transport [Text] / O. V. Yesipov, A. V. Pikalov // Road transport in the agricultural sector: design, design and technological operation: materials of the All-Ukrainian scientific and practical conference, Kharkiv, May 16-17, 2019 / Kharkiv. National Technical University of Agriculture named after P. Vasylenko. - Kharkiv: KhNTUSG, 2019. P. 66.
4. Thomas Nussbaumer, Michael Oser. Evaluation of biomass combustion based energy systems by cumulative energy demand and energy yield coefficient. Report for International Energy Agency and Swiss Federal Office of Energy, 2004 http://www.ieabcc.nl/publications/Nussbaumer_IEA_CED_V11.pdf.
5. M. Berglund, P. Börjesson. Energy analysis of biogas systems. Proc. of 2nd World Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, 10-14 May 2004, Rome, Italy, P. 687-690.
6. Biogas is one of the most promising alternative energy sources for Ukraine. [jankoy.org.ua/ page.php?id=5078](http://jankoy.org.ua/page.php?id=5078).

7. R. Schultz (2012) Production and use of biogas in Ukraine z.t. / Biogasrate.V. – 2012. P. 74.
8. Kaletnik G.M., Zdyrko N.G., Fabianska V.Yu. (2018). Economics. Finance. Management: current issues of science and practice. [Biogas in households is the key to energy independence of rural areas of Ukraine]. No. 8. P. 7-22. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/efmapnp_2018_8_3.
9. Biogas production in Ukraine. Abstract // <http://referat.parta.ua/referat/117203/>
10. Sakun, L.M., Riznichenko, L.V., Vielkin, B.O. (2020). Perspektyvy rozvytku rynku biohazu v Ukraini ta za kordonom [Prospects for the development of the biogas market in Ukraine and abroad]. *Ekonomika i orhanizatsiia upravlinnia*. Vinnytsia: 1(37), P. 160-170.
11. Vielkin, B. O., Mazharenko, K.P. (2018). Problemy utylizatsii vidkhodiv na rehionalnomu rivni [Problems of waste disposal at the regional level]. *Materialy Mizhnarodnoho forumu «Aktualni problemy ta perspektyvy rozvytku natsionalnoho hospodarstva v umovakh hlobalnoi nestabilnosti»*. Kremenchuk: P 271–273.
12. Poliashenko, D. M., Poliashenko, S. O., Yesipov, O. V. (2019). Otrymannia teplovoi enerhii na osnovi biohazu [Production of heat energy based on biogas]. *Innovatsiini rozrobky v ahrarnii sferi : materialy Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia "Molod i tekhnichniy prohres v APV "*. Kharkiv; T. 2. P. 49.

Козаченко О. В.,
Бакум М. В.,
Піх Є. О.
Михайлов А. Д.,
Крекот М. М.
Державний
біотехнологічний
університет, м. Харків,
Україна
E-mail:
mixaylov@btu.kharkov.ua

**РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ
ВІБРОФРИКЦІЙНОЇ СЕПАРАЦІЇ НАСІННЯ
КОРІАНДРУ**

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-26-119-127>

УДК 631.362

*Козаченко О.В., Бакум М.В., Піх Є.О., Михайлов А.Д., Крекот М.М. **Результати дослідження процесу віброфрикційної сепарації насіння коріандру.***

Анотація. Досягти повного відділення у цільову фракцію біологічно цінного насіння при сепарації насіннєвого матеріалу із використанням єдиного критерію є складним завданням. Ця проблема вирішується застосуванням в якості ознаки поділу комплексу фізико-механічних властивостей компонентів (форми, пружності, фрикційних властивостей), що є можливим при віброфрикційній сепарації насіннєвого матеріалу.

В роботі представлено результати дослідження віброфрикційної сепарації насіння коріандру. Обґрунтування раціональних параметрів процесу сепарації насіннєвого матеріалу на робочих поверхнях віброфрикційного сепаратора забезпечило підвищення виходу кондиційного матеріалу на 27,6% порівнянно з попередніми результатами очищення, а також підвищення показників його посівних якостей та зниження відходів процесу сепарації до 7,4% від маси вихідного матеріалу при тій же продуктивності машини.

Раціональними параметрами віброфрикційного сепаратора для підготовки посівного матеріалу коріандру є амплітуда коливань $A = 1,1$ мм; частота коливань $\omega = 155,0$ с⁻¹; кут спрямованості коливань $\varepsilon = 28,0^\circ$; поздовжній нахил робочих поверхонь $\alpha = 3,0^\circ$; поперечний нахил робочих поверхонь облицьованих брезентом $\beta = 1,9^\circ$. При заданих параметрах встановлена можливість отримання 92,6% від маси вихідного матеріалу кондиційного насіння коріандру за один пропуск через віброфрикційний сепаратор.

Для підвищення ефективності підготовки насіння коріандру у виробничих умовах пропонується включити віброфрикційний сепаратор до складу існуючих технологічних ліній для отримання високоякісного насіння.

Ключові слова: вібросепарація, насіннєва суміш коріандру, віброфрикційний сепаратор, параметри віброфрикційного сепаратора, якість розділення, вібропереміщення.

*Kozachenko O.V., Bakum M.V., Mikhailov A.D., Krekot M.M., Abdulyev M.M., Koziy O.B. **Results of research into process of vibrofrictional separation of coriander seeds.***

Abstract. *Achieving complete separation of biologically valuable seeds into the target fraction during seed material separation using a single criterion is a difficult task. This problem is solved by using as a separation feature a complex of physical and mechanical properties of components (shape, elasticity, frictional properties), which is possible during vibrofrictional separation of seed material.*

The paper presents the results of the study of vibrofrictional separation of coriander seeds. Substantiation of rational parameters of the process of separation of seed material on the working surfaces of the vibrofrictional separator ensured an increase in the yield of conditioned material by 27.6% compared to previous cleaning results, as well as increasing its seeding qualities and reducing separation process waste to 7.4% of the mass of the starting material with the same machine performance.

The rational parameters of the vibrofriction separator for the preparation of coriander seed are the amplitude of oscillations $A = 1.1$ mm; the frequency of oscillations $\omega = 155.0$ s⁻¹; the angle of oscillations $\varepsilon = 28.0^\circ$; the longitudinal inclination of the working surfaces $\alpha = 3.0^\circ$; the transverse inclination of the working surfaces lined with tarpaulin $\beta = 1.9^\circ$. With the given parameters, it is possible to obtain 92.6% of the mass of the starting material of conditioned coriander seeds in one pass through the vibrofriction separator.

To increase the efficiency of coriander seed preparation in production conditions, it is proposed to include a vibrofriction separator in existing technological lines to obtain high-quality seeds.

Key words: *vibro separation, coriander seed mixture, vibrofriction separator, vibrofriction separator parameters, separation quality, vibrodisplacement.*

Постановка проблеми

Сучасні технології післязбирального обробітку насіннєвого вороху, в тому числі й коріандру, спрямовані на його розділення у відповідності із призначенням та відбором найбільш біологічно цінного насіння – посівного матеріалу [1, 2]. При цьому використовують певні ознаки поділу компонентів із застосуванням різноманітних робочих органів насіннеочисних машин [3, 4, 5].

Попередній процес сепарації насіннєвого матеріалу (НМ) передбачає застосування зерноочисної техніки загального призначення – пневмосепаратори, решетні стани, триєрні циліндри та ін., в яких реалізується процес розділення компонентів вороху за аеродинамічними та розмірними характеристиками [6, 7].

Як показує практика, за такими ознаками поділу не завжди можна досягти бажаного результату стосовно виділення із НМ насіння з високою схожістю, енергією проростання, масою 1000 насінин, які, в кінцевому результаті, забезпечують якісні всходи і врожайність сільськогосподарських рослин [8].

Сучасні підходи у забезпеченні одержання високоякісного насіння передбачають застосування нових технічних засобів, що реалізують відмінні ознаки поділу насіння цільової фракції від неякісного, щуплого насіння та засмучувачів.

Одним з таких перспективних напрямків підвищення ефективності виділення з вороху найбільш біологічно цінного насіння слід вважати процес вібросепарації НМ за комплексом фізико-механічних властивостей на неперфорованих фрикційних деках [9, 10, 11].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Вивченню процесів та вирішенню проблеми підвищення ефективності сепарації НМ сільськогосподарських культур із застосуванням вібраційного ефекту присвячена

велика кількість наукових праць теоретичного та прикладного спрямування [12, 13, 14, 15, 16, 17].

В роботі [12] авторами досліджувався процес сепарації дрібнонасінних культур при впливі на компоненти насінневої суміші знакозмінного повітряного потоку, що визначає якість розділення насіння та засмічувачів і продуктивність машин. За результатами проведеного дослідження авторами встановлено відсутність чітко вираженого екстремуму функції впливу означеного чинника, рекомендовано здійснювати прийняття оптимальних конструктивно-режимних параметрів на межі їх існування та застосування в конструкції ВФС аеродинамічних екранів з вертикальною стінкою. Це суттєво підвищує ефективність сепарації.

Теоретичним дослідженням впливу на характер переміщення насіння у зазорі між фрикційними поверхнями віброфрикційного сепаратора та впливу на процес утворюваного коливним рухом робочого органу повітряного потоку присвячена робота [13]. Авторами досліджувався процес плоскопаралельного переміщення насіння, що апроксимовано у вигляді матеріальної частинки, визначені раціональні конструктивно-режимні параметри, що забезпечують мінімізацію негативного впливу повітряного потоку на протікання технологічного процесу сепарації. Визначено інтервали варіювання амплітуди і частоти коливання робочого органу ВФС, що визначають максимальну швидкість переміщення насіння у міждековому просторі машини та, відповідно, продуктивність процесу.

За результатами дослідження [13] авторами обґрунтовано раціональне значення зазору між деками ВФС в межах 3,5-10 мм. Доведено, що при збільшенні зазору між робочими поверхнями сепаратора від 3 до 6 мм швидкість переміщення насіння знижується, а при подальшому збільшенні зазору підвищується і після 12 мм залишається постійною. Одержані в роботі результати дозволяють підвищити якість сепарації компонентів насінневої суміші та сприяють збільшенню продуктивності за рахунок оптимального комплектування фрикційних дек таких насіннєочисних машин.

В дослідженнях [14, 15] представлено результати чисельного моделювання процесу попередньої сепарації насінневої суміші на гвинтовому живильнику ВФС. Авторами отримано візуалізацію процесу переміщення насіння основної культури, насіння бур'янів і рослинних домішок від прийнятих факторів досліджень: кроку витка гвинтової пластини, кута нахилу гвинтової пластини, радіусу точки інжекції насіння та кута повороту гвинтової пластини живильника. В якості критерію оцінки прийнята умова розширення зони розподілу компонентів суміші, яка полягає в тому, що радіус для насіння основної культури r_n повинен бути найбільшим, а радіус для рослинних домішок r_d повинен бути найменшим. За результатами дослідження отримані раціональні конструктивні параметри гвинтового живильника віброфрикційного сепаратора, що дозволяють підвищити якість сепарації НМ та продуктивність ВФС.

В роботі [16] автором досліджувався рух частинки у повітряному потоці між плоскими вертикально розташованими поверхнями, що здійснюють коливний рух, з метою підвищення якості поділу насінневих сумішей. Авторами роботи встановлено, що основними факторами які впливають на процес розділення компонентів при періодичному режимі є швидкість повітряного потоку V_p та коефіцієнт k опору повітряного середовища. Вплив інших параметрів, а саме, частоти і амплітуди коливань, відстані між вібруючими поверхнями виявляється в залежності від реалізації режимів руху частинок з повним або частковим проковзуванням, що зумовлює можливість розділення компонентів НМ.

Дослідження можливості застосування у технологічних лініях післязбиральної обробки насіння гірчиці віброфрикційного сепаратора з наперфорованими деками наведені в роботі [17]. Авторами представлено результати сепарації НМ гірчиці на

ВФС після його попереднього очищення на робочих органах машин загального призначення. За один пропуск НМ через сепаратор отримано $16,9 \pm 0,2$ % від маси вихідного матеріалу, насіннєвого матеріалу, який відповідав вимогам державного стандарту до оригінального насіння та $56,9 \pm 0,2$ % матеріалу, який відповідав вимогам до кондиційного насіння 1-3 репродукції.

Аналіз відомих робіт вказує на актуальність проведення досліджень можливості підвищення посівних якостей НМ сільськогосподарських культур за рахунок його доочищення та сортування на ВФС з неперфорованими фрикційними робочими поверхнями.

Формулювання мети досліджень

Метою даної роботи є обґрунтування раціональних параметрів процесу віброфрикційної сепарації насіннєвого матеріалу коріандра з метою більш повного відділення в цільову фракцію біологічно цінного насіння.

Результати досліджень

Для досліджень прийнята насіннєва суміш коріандра після механізованого збирання та попереднього очищення від легких механічних домішок, подрібненого, щуплого насіння і засмічувачів в повітряному потоці, але за вмістом насіння основної культури та схожістю була некондиційною.

На підставі попередніх досліджень встановлено, що на процес віброфрикційної сепарації насіння коріандру суттєвий вплив мають: амплітуда коливань робочого органу - A , частота коливань - ω , кут спрямованості коливань робочого органу - ε ; поздовжній кут - α і поперечний кут - β нахилу фрикційних площин сепаратора до горизонту. На основі попередніх досліджень можливості здійснення процесу сепарації НМ коріандру були прийняті наступні конструктивно-технологічні параметри віброфрикційного сепаратора (ВФС): $A = 1,0$ мм; $\omega = 165,0$ с⁻¹; $\varepsilon = 28,0^\circ$; $\alpha = 3,1^\circ$; $\beta = 2,2^\circ$.

Крім зазначених конструктивно-технологічних параметрів на процес сепарації НМ коріандру впливає величина подачі вихідного НМ на робочі поверхні, яка при проведенні досліджень становила, в середньому, 170 кг/год.

Результати віброфрикційної сепарації НМ коріандру за один пропуск через ВФС при прийнятих значеннях параметрів роботи сепаратора представлені в таблиці 1.

Згідно ДСТУ 2115-92 Насіння коріандру. Сортіві і посівні якості. Технічні умови (ГОСТ 20455-93) кондиційний матеріал повинен включати насіння основної культури не менше 99,0%, а його схожість 90,0%.

Вихідний матеріал коріандру за вмістом насіння основної культури та його схожістю не відповідав вимогам стандарту.

Аналіз одержаних результатів сепарації НМ коріандру на робочих поверхнях ВФС підтвердив можливість виділення насіння коріандру з високими посівними властивостями.

Так у першу фракцію, що складає 10,3%, виділилось саме виповнене повноцінне насіння коріандру, маса 1000 насінин якого становило 6,9 г, а схожість 92,0%, що на 11,0% вище схожості вихідного матеріалу. Вміст насіння основної культури цій фракції дорівнюється 99,5%, що дещо перевищує вимоги Державного стандарту. Вміст насіння бур'янів зменшився у 9 разів, у порівнянні з вихідним матеріалом, і становить 0,1% від маси фракції.

Таблиця 1

Результати сепарації насіння коріандру при прийнятих значеннях конструктивно-технологічних параметрів ВФС

Показники	Вихідна сіміш	Номер фракції				
		I	II	III	IV	V
Розподілення за фракціями, %	100.0	10.3	24.8	29.1	23.6	12.2
Розподілення зростаючим підсумком, %	100.0	10.3	35.1	64.2	87.8	100.0
Вміст насіння коріандру, %	91.7	99.5	99.3	99.0	83.8	47.9
Вміст неповноцінного насіння, %	7.4	0.4	0.6	0.8	9.3	34.8
Вміст насіння бур'янів, %	0.9	0.1	0.1	0.2	6.9	17.3
Схожість, %	81.0	92.0	91.0	90.0	72.0	51.0
Енергія проростання, %	72.0	82.0	81.0	80.0	61.0	38.0
Маса 1000 насінин, г	5.0	6.9	6.2	5.8	3.1	2.7
Якість сепарації*	Н	К	К	К	Н	Н

* Н – некондиційне; К – кондиційне

До другої і третьої фракцій продуктів сепарації насінневої суміші коріандру виділився також кондиційний матеріал, який схожий за своїми посівними властивостями. Вміст другого приймального становив 24,8% від маси вихідного матеріалу, а третього – 29,1%. Таким чином, в результаті сепарації в перші три приймального виділилось 64,2% від маси вихідного матеріалу кондиційного насіння, яке за всіма посівним показниками відповідає вимогам ДСТУ.

До четвертої фракції виділилось 23,6% маси вихідної суміші, яка містила значну кількість неповноцінного насіння коріандру (9,3% від маси фракції), що знизило як чистоту фракції так і схожість. Разом з тим ця фракція містить 83,8% повноцінного насіння коріандру з масою 1000 насінин 5,8 г, що на 0,7 г вище вихідного матеріалу.

Вміст п'ятої фракції склав 12,2%. До його складу відокремилось переважна більшість насіння бур'янів (17,3% від маси фракції) та неповноцінне насіння основної культури (34,8%). Маса 1000 насінин коріандру становило лише 2,7 г, що майже в 2 рази менше насіння вихідного матеріалу.

Таким чином, за один пропуск через робочі поверхні ВФС отримано 64,2% від маси вихідного матеріалу кондиційного насіння коріандру, що є значним досягненням для господарств, які займаються підготовкою посівного матеріалу.

Аналізуючи результати використання віброфрикційного сепаратора на підготовці посівного матеріалу інших сільськогосподарських культур, слід зазначити, що отримані результати не повною мірою відповідають можливостям даного способу очищення. Для оцінки можливості підвищення ефективності сепарації насінневої суміші коріандру на робочих поверхнях ВФС проведені лабораторні дослідження для обґрунтування раціональних параметрів процесу його роботи.

Визначення раціональних параметрів процесу віброфрикційної сепарації насіння коріандру проводили із застосуванням багатофакторного експерименту. В якості критерію оптимальності обрано максимальний вихід цільової фракції кондиційного

насіння. Умови кодування незалежних змінних і прийняті величини інтервалів варіювання наведені у табл. 2.

Таблиця 2

Інтервали варіювання незалежних змінних

Змінні	A	ω	ε	α	β
Розмірність	мм	с ⁻¹	град.	град.	град.
Умовні позначення	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅
Основний рівень (0)	1.0	165.0	28.0	3.1	2.2
Верхній рівень (+)	1.2	180.0	29.0	4.1	2.7
Нижній рівень (-)	1.1	150.0	27.0	2.1	1.7

Після обробки експериментальних даних рівняння регресії одержали у виді:

$$Q_k = 98,021 + 1,963X_1 - 0,785X_2 + 0,326X_3 - 1,058X_4 - 0,820X_5 - \\ - 1,754X_1X_2 + 0,483X_1X_3 - 1,356X_1X_4 + 1,257X_1X_5 - 1,609X_2X_3 + \\ + 0,841X_2X_4 - 1,514X_2X_5 + 0,643X_3X_4 + 0,654X_3X_5 + 1,107X_4X_5 - \\ - 1,359X_1^2 - 0,862X_2^2 + 1,417X_3^2 + 0,336X_4^2 - 1,087X_5^2.$$

Обробка рівняння дозволила одержати раціональні параметри віброфрикційного сепаратора для доочищенн НМ коріандру: A = 1,1 мм; ω = 155,0 с⁻¹; ε = 28,0°; α = 3,0°; β = 1,9°.

Результати сепарації НМ коріандру із визначеними раціональними параметрами ВФС представлені в таблиці 3.

Таблиця 3

Результати сепарації насіння коріандру при раціональних параметрах ВФС

Показники	Вихідна суміш	Номер фракції				
		I	II	III	IV	V
Розподілення за фракціями, %	100.0	16.9	34.7	31.2	9.8	7.4
Розподілення зростаючим підсумком, %	100.0	16.9	51.6	82.8	92.6	100.0
Вміст насіння коріандру, %	91.7	99.8	99.6	99.4	99.2	21.1
Вміст неповноцінного насіння, %	7.4	-	0.1	0.2	0.3	49.2
Вміст насіння бур'янів, %	0.9	0.2	0.3	0.4	0.5	24.7
Схожість, %	81.0	94.0	93.0	91.0	90.0	62.0
Енергія проростання, %	72.0	83.0	81.0	80.0	78.0	54.0
Маса 1000 насінин, г	5.0	7.4	7.1	5.9	3.5	1.8
Якість сепарації*	Н	К	К	К	К	Н

* Н – некондиційне; К – кондиційне

При раціональних параметрах роботи ВФС при очищенні насінневої суміші коріандру вміст першої фракції збільшився на 6,6%, у порівнянні з попередніми дослідженнями сепарації, а якість НМ також підвищилась: чистота на 0,3%, схожість на 2,0%, а маса 1000 насінин на 0,5 г.

До другої фракції виділилось 34,7% маси вихідного матеріалу, що на 9,9% більше маси другої фракції при попередньому очищенні. За всіма показниками насіннєвий матеріал цієї фракції відповідає вимогам Державного стандарту. Чистота НМ цієї фракції становить 99,6%, а схожість 93,0%, що, відповідно, на 0,6% і 3,0% вище вимог ДСТУ. Маса 1000 насінин 7,1 г, що на 2,1 г більше вихідного матеріалу. Вміст некондиційного насіння коріандру становило лише 0,1%, а насіння бур'янів 0,3% від маси фракції.

Вміст третьої фракції зріс лише на 2,1% і дорівнюється 31,2% від маси вихідного матеріалу. Неповноцінне насіння коріандру цієї фракції становить тільки 0,2%, її чистота 99,4%, а схожість насіння основної культури 91,0%, що цілком відповідає посівним якостям кондиційного матеріалу.

Обговорення

Маса четвертої фракції зменшилась, у порівнянні з попередніми випробуваннями віброфрикційного сепаратора, на 13,8% і становить 9,8% від маси вихідної суміші. Основною особливістю цієї фракції є те, що її вміст за всіма показниками відповідає вимогам до кондиційного посівного матеріалу: чистота насіння 99,2%, а схожість насіння коріандру 90,0%. Слід зазначити, що маса 1000 насінин фракції становить лише 3,5 г, що свідчить про виділення до цієї фракції повноцінного, але дрібного насіння основної культури.

Таким чином, за один пропуск отримано 92,6% кондиційного насіння коріандру, а відходи складають 7,4% від маси вихідної суміші, які надходять до п'ятого приймальника. Маса 1000 насінин цієї фракції тільки 1,8 г, що на 3,2 г менше вихідного матеріалу, а повноцінне насіння становить лише 21,1% від маси фракції, що підтверджує недоцільність його використання в якості посівного матеріалу.

Обґрунтування раціональних параметрів процесу сепарації насіннєвого матеріалу на робочих поверхнях ВФС забезпечило підвищення виходу кондиційного матеріалу на 27,6% порівнянно з попередніми результатами очищення. А також підвищення показників його посівних якостей та зниження відходів процесу сепарації до 7,4% від маси вихідного матеріалу при тій же продуктивності віброфрикційного сепаратора.

Висновки

1. Раціональними параметрами віброфрикційного сепаратора для підготовки посівного матеріалу коріандру є: амплітуда коливань $A = 1,1$ мм; частота коливань $\omega = 155,0$ с⁻¹; кут спрямованості коливань $\varepsilon = 28,0^\circ$; поздовжній нахил робочих поверхонь $\alpha = 3,0^\circ$; поперечний нахил робочих поверхонь облицьованих брезентом $\beta = 1,9^\circ$.
2. Експериментальними дослідженнями встановлена можливість отримання 92,6% від маси вихідного матеріалу кондиційного насіння коріандру за один пропуск через віброфрикційний сепаратор.
3. Для підвищення ефективності підготовки насіннєвого матеріалу коріандру у виробничих умовах пропонується включити віброфрикційний сепаратор до складу існуючих технологічних ліній післязбиральної обробки НМ для отримання високоякісного насіння.

Список використаних джерел

1. Єсіпов О.В., Гринь Є.Л., Потенціал біогазу і біометану з органічних відходів тваринництва. Вісник Сумського національного аграрного університету Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів». 2023, випуск 1 (51). С. 25-28.
2. Сидоров Ю.І. Biotechnologia acta. Сучасні біогазові технології. 2013, V. 6. No1. - С. 46-60.
3. Використання біометану автомобільним транспортом. О. В. Єсіпов, А. В. Пікалов. Автомобільний транспорт в аграрному секторі: проектування, дизайн та технологічна експлуатація : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф., м. Харків, 16-17 трав. 2019 р. Харків. нац. техн. ун-т сіл. госп-ва ім. П. Василенка. Харків : ХНТУСГ, 2019. С. 66.
4. Thomas Nussbaumer, Michael Oser. Evaluation of biomass combustion based energy systems by cumulative energy demand and energy yield coefficient. Report for International Energy Agency and Swiss Federal Office of Energy, 2004 http://www.ieabcc.nl/publications/Nussbaumer_IEA_CED_V11.pdf
5. M. Berglund, P. Börjesson. Energy analysis of biogas systems. Proc. of 2nd World Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, 10-14 May 2004, Rome, Italy, P. 687-690.
6. Біогаз — один з найперспективніших для України альтернативних джерел енергії. — [janko.org.ua/ page.php?id=5078](http://janko.org.ua/page.php?id=5078).
7. Р. Шульц (2012) Виробництво і використання біогазу в Україні з.т. / Biogasrate.V. – 2012. - С. 74
8. Калетнік Г.М., Здирко Н.Г., Фабіянська В.Ю. (2018). Економіка. Фінанси. Менеджмент: актуальні питання науки і практики. [Біогаз в домогосподарствах – запорука енергонезалежності сільських територій України]. № 8. С. 7-22. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/efmapnp_2018_8_3.
9. Виробництво біогазу в Україні. Реферат // <http://referat.parta.ua/referat/117203/>
10. Sakun, L.M., Riznichenko, L.V., Vielkin, B.O. (2020). Perspektyvy rozvytku rynku biohazu v Ukraini ta za kordonom [Prospects for the development of the biogas market in Ukraine and abroad]. Ekonomika i orhanizatsiia upravlinnia. Vinnytsia: 1(37), s. 160-170. (in Ukrainian).
11. Vielkin, B. O., Mazharenko, K.P. (2018). Problemy utylizatsii vidkhodiv na rehionalnomu rivni [Problems of waste disposal at the regional level]. Materialy Mizhnarodnoho forumu «Aktualni problemy ta perspektyvy rozvytku natsionalnoho hospodarstva v umovakh hlobalnoi nestabilnosti». Kremenchuk: S. 271–273. (in Ukrainian).
12. Poliashenko, D. M., Poliashenko, S. O., Yesipov, O. V. (2019). Otrymannia teplovoi enerhii na osnovi biohazu [Production of heat energy based on biogas]. Innovatsiini rozrobky v aharnii sferi : materialy Mizhnarodna naukovopraktychna konferentsiia "Molod i tekhnichniy prohres v APV " m. Kharkiv; T. 2. P. 49.

References

1. Yesipov O.V., Grin E.L. Biogas and biomethane potential from organic waste of livestock. Bulletin of Sumy National Agrarian University Series "Mechanization and automation of production processes". 2023, issue 1 (51). P. 25-28.
2. Sidorov Y.I., biotechnologia acta / Modern biogas technologies. 2013, V. 6. No. 1. P. 46-60.
3. Use of biomethane by road transport [Text] / O. V. Yesipov, A. V. Pikalov // Road

transport in the agricultural sector: design, design and technological operation: materials of the All-Ukrainian scientific and practical conference, Kharkiv, May 16-17, 2019 / Kharkiv. National Technical University of Agriculture named after P. Vasylenko. - Kharkiv: KhNTUSG, 2019. P. 66.

4. Thomas Nussbaumer, Michael Oser. Evaluation of biomass combustion based energy systems by cumulative energy demand and energy yield coefficient. Report for International Energy Agency and Swiss Federal Office of Energy, 2004 http://www.ieabcc.nl/publications/Nussbaumer_IEA_CED_V11.pdf.

5. M. Berglund, P. Börjesson. Energy analysis of biogas systems. Proc. of 2nd World Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, 10-14 May 2004, Rome, Italy, P. 687-690.

6. Biogas is one of the most promising alternative energy sources for Ukraine. [jankoy.org.ua/ page.php?id=5078](http://jankoy.org.ua/page.php?id=5078).

7. R. Schultz (2012) Production and use of biogas in Ukraine z.t. / Biogasrate.V. – 2012. P. 74.

8. Kaletnik G.M., Zdyrko N.G., Fabianska V.Yu. (2018). Economics. Finance. Management: current issues of science and practice. [Biogas in households is the key to energy independence of rural areas of Ukraine]. No. 8. P. 7-22. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/efmapnp_2018_8_3.

9. Biogas production in Ukraine. Abstract // <http://referat.parta.ua/referat/117203/>

10. Sakun, L.M., Riznichenko, L.V., Vielkin, B.O. (2020). Perspektyvy rozvytku rynku biohazu v Ukraini ta za kordonom [Prospects for the development of the biogas market in Ukraine and abroad]. *Ekonomika i orhanizatsiia upravlinnia*. Vinnytsia: 1(37), P. 160-170.

11. Vielkin, B. O., Mazharenko, K.P. (2018). Problemy utylizatsii vidkhodiv na rehionalnomu rivni [Problems of waste disposal at the regional level]. *Materialy Mizhnarodnoho forumu «Aktualni problemy ta perspektyvy rozvytku natsionalnoho hospodarstva v umovakh hlobalnoi nestabilnosti»*. Kremenchuk: P 271–273.

12. Poliashenko, D. M., Poliashenko, S. O., Yesipov, O. V. (2019). Otrymannia teplovoi enerhii na osnovi biohazu [Production of heat energy based on biogas]. *Innovatsiini rozrobky v ahraarii sferi : materialy Mizhnarodna naukovopraktychna konferentsiia "Molod i tekhnichniy prohres v APV "*. Kharkiv; T. 2. P. 49.

Лебедєв С. А.¹,
Лебедєв А. Т.²,
Шевченко І. О.³

¹Харківська філія ДНУ
«УкрНДІПВТ імені
Леоніда Погорілого»,
м. Харків, Україна

²Сумський національний
аграрний університет,
м. Суми, Україна

³Державний
біотехнологічний
університет,
м. Харків, Україна

E-mail:

hfukrndipvt@gmail.com,

tiaxntusg@gmail.com,

igorshvchnk@gmail.com

ТЕХНОЛОГІЧНА АДАПТАЦІЯ ТРАКТОРІВ ЗАГАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ІМПОРТНОГО ВИРОБНИЦТВА В АГРАРНОМУ СЕКТОРІ УКРАЇНИ

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-26-128-136>

УДК 631.27

Лебедєв С.А., Лебедєв А.Т., Шевченко І.О. Технологічна адаптація тракторів загального призначення імпортного виробництва в аграрному секторі України.

Анотація. У статті викладено нові елементи технологічної адаптації тракторів загального призначення імпортного виробництва, найбільш затребуваних в аграрному секторі України. Запропоновано новий алгоритм технологічної адаптації ґрунтообробного агрегату, реалізованого на стерні озимої пшениці трактором New Holland при агрегуванні з луцильником ДЛМ-8,0. Запропонована нова методика баластування трактора за групами технологічного процесу ґрунтообробки, що базується на визначенні маси баласту. Експериментально на тракторі John Deere 8400 доказане твердження, що застосування баласту ефективно до певного підвищення швидкості руху трактора. Розглянуті витрати потужності двигуна на пересування трактора при русі без баласту / з баластом на різних агрофонах.

Ключові слова: трактор, імпортне виробництво, загальне призначення, технологічна адаптація, алгоритм функціонування, баластування, стабільність функціонування.

Lebedev S.A., Lebedev A.T., Shevchenko I.O. Technological adaptation of general-purpose tractors of imported production in agricultural sector of Ukraine.

Abstract. The article presents new elements of technological adaptation of general-purpose tractors of imported production, the most in demand in the agricultural sector of Ukraine. A new algorithm of technological adaptation of the tillage unit implemented on winter wheat stubble by a New Holland tractor when aggregated with a DLM-8.0 huller is proposed. A new method of ballasting the tractor according to groups of the tillage technological process is proposed, which is based on determining the mass of the ballast. Experimentally, the statement that the use of ballast is effective to a certain increase in the

speed of the tractor is proven on the John Deere 8400 tractor. The engine power consumption for tractor movement when moving without ballast / with ballast on different agro backgrounds is considered.

Key words: tractor, imported production, general purpose, technological adaptation, operating algorithm, ballasting, operating stability.

Постановка проблеми

Трактори загального призначення застосовуються під час виконання енергоємних агротехнічних процесів основного обробітку ґрунту, культивуації, сівби тощо, зокрема у складі комбінованих і транспортно-технологічних агрегатів. На ринку тракторів в Україні серед тракторів загального призначення лідирують торгівельні марки John Deere, Case IH, New Holland [1], за ступенем пристосованості тягово-швидкісних властивостей яких до виконання технологічного процесу за рівних умов експлуатації оцінюється їх технологічна адаптація. При цьому необхідне розв'язання наукової проблеми підвищення ефективності використання потенціальних можливостей тракторів імпортного виробництва в аграрному секторі України.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

В основу відомих досліджень і публікацій [2, 3] технологічної адаптації тракторів покладена методика оцінювання технічного рівня тракторів імпортного виробництва у порівнянні із вітчизняними. Запропоновано оцінювати технічний рівень тракторів за показниками енергонасиченості та експлуатаційною питомою витратою палива без взаємозв'язку із технологічним процесом, що виконуються. На необхідність врахування цієї складової під час технологічної адаптації тракторів звертається увага у роботі [4]. Зміст пропонованої статті є розвитком методології технологічної адаптації тракторів загального призначення [3] для тракторів імпортного виробництва в аграрному секторі України.

Формулювання мети досліджень

Метою статті є викладення нових положень технологічної адаптації тракторів загального призначення імпортного виробництва в аграрному секторі України.

Результати досліджень

При технологічній адаптації тракторів оцінюється їх продуктивність, питомі паливні витрати і агротехнологічні властивості [5, 6]. Кодекс 2 ОЕСР (Організація економічного співробітництва і розвитку) [6] нормує методологію випробувань сільськогосподарських тракторів за оцінкою їх експлуатаційних якостей, до яких віднесені потужнісні показники, паливна економічність двигуна і трактора, керованість і стійкість руху. Багато країн не є членами ОЕСР, до яких відноситься Україна, частково або повністю використовують Кодекси ОЕСР для випробувань, проведення тендерів або регулювання питань імпорту тракторів. Багаторічний досвід випробувань тракторів у Харківській філії ДНУ «УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого» [7] дозволив сформулювати їх оціночні показники технологічної адаптації, що включає визначення продуктивності W , питомі паливні витрати g_w (кг/га) і узагальнений показник агротехнічних властивостей A_{mo} на операціях ґрунтообробки:

$$\left. \begin{aligned} W_i &= \xi_N N_e / E_{ni} \\ g_{wi} &= 2,77 g_{en} E_{ni} \\ A_{moi} &= \sum_i^n S_j dj_{ki} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

де ξ_N – рівень використання потужності N_e двигуна;
 E_{ni} – енерговитрати на ширину захвату агрегату (кДж/м²);
 g_{en} – питома витрата палива двигуном;
 S_j, dj_{ki} – коефіцієнти вагомості і рівня одиничних показників.

Встановлені за результатами моделювання і експериментів оптимальні значення W_i, q_{wi} і A_{moi} слугують основою формування алгоритму технологічної адаптації колісних 4К4 тракторів різної комплектації (на одинарних 1К і подвійних 2К колесах, з баластом / без баласту). Дане твердження підтверджене при випробуваннях у Харківській філії УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого ґрунтообробного агрегату у складі трактора New Holland T8.390 і дискового луцильника ДЛМ-8,0 на луценні стерні озимої пшениці (рис. 1).



Технічні характеристики тракторів New Holland T8.390:
 Максимальна потужність, N_e , кВт (к.с.) – 286 (339);
 Питома витрата палива, g_{en} , г/кВт·год. – 215;
 Максимальний крутний момент, Н·м – 1500;
 Запас крутного моменту, % – 67;
 Експлуатаційна вага, G , кг (Н) – 18000 (176580);
 Тип рушіїв (колісна формула) – 4К4;
 Діапазон робочих швидкостей руху, V , км/год. – 12...20.

Рис. 1. Ґрунтообробний агрегат New Holland T8.390 + ДЛМ-8,0 під час випробувань

Визначення тягово-енергетичних показників агрегату New Holland T8.390 + ДЛМ-8,0 при його технологічній адаптації виконана на луценні стерні озимої пшениці на полі з ухилом i – 3%, допустимому буксуванні δ – 16 %, коефіцієнті опору кочення f – 0,09.

Технологічна адаптація даного агрегату за тягово-енергетичними показниками характеризується наступними показниками:

- потужність двигуна, яку можливо реалізувати під час виконання технологічної операції $N_n^g = 140,69...93,84$ кВт;
- тягова потужність трактора, зумовлена його зчпними властивостями $N_{кр}^p = 194,25...299,7$ кВт;
- швидкість агрегату, за якою можливо досягти максимальної тягової потужності $V_{N_{кр}}^{\max} = 6,27$ км/год.;
- максимально можлива тягова потужність, яку реалізує трактор $N_{кр}^{\max} =$

169,71 кВт;

- тяговий ККД трактора при роботі $\eta_t^{\max} = 0,59$;
- питома потужність необхідна для роботи лушильника $N_{\text{пит}} = 12,63$ кВт;
- оптимальний тяговий опір лушильника $R_{\text{ар}} = 58,85$ кН;
- раціональна швидкість роботи агрегату $V_{\text{рац}} = 10,32$ км/год;
- необхідна потужність для роботи агрегату із швидкістю $V_{\text{рац}} - N_{\text{агр}} = 168,7$ кВт;
- коефіцієнт використання максимальної тягової потужності трактора $\eta_{\text{ти}} = 0,98$.

Тягово-енергетичні показники ґрунтообробного агрегату New Holland Т8.390 + ДЛМ-8,0 є основою формування за показниками (1) методології технологічної адаптації тракторів загального призначення імпортного виробництва (табл. 1).

Встановлені за результатами теоретичних і експериментальних досліджень оптимальні значення питомих параметрів тракторів (табл. 1) слугують основою формування алгоритму технологічної адаптації колісних тракторів різної комплектації (на одинарних 1К і подвійних 2К колесах) і агрегатів на їх базі до природно-виробничих умов регіону.

При цьому основними параметрами технологічної адаптації тракторів є номінальні значення робочої швидкості V_n і продуктивності агрегатів W_i на операціях ґрунтообробки різних груп. Дані параметри регламентуються питомими параметрами: масою трактора $m_{\text{пит}}$ (кг/кВт), енерговитратами E_n (кДж/м²), шириною захвату $B_{\text{пит}}$ (м/кВт) або зворотною їй величиною $N_{\text{пит}}$ (кВт/м).

Таблиця 1

Питомі параметри колісних тракторів імпортного виробництва при адаптації до технологій ґрунтообробки

Група та назва операції	K_o , кН/м	ΔK , с ² /м ²	V_n , м/с	Комплектація	A_{mo}		$m_{\text{пит}}$, кг/кВт	E_n , кДж/м ²	$N_{\text{пит}}$, кВт/м
					4К4а	4К4б			
1. Відвальна оранка, глибоке рихлення	13,85	0,18	2,24	1К	0,52	0,60	67-68	28,4	59-61
				2К	0,52	0,59	73-74	27,2	58-60
2. Безвідвальна обробка, чизелювання	5,20	0,11	2,72	1К	0,44	0,59	61-62	11,4	30-31
				2К	0,44	0,58	68-70	10,9	29-30
3. Поверхнева обробка, пряма сівба	3,90	0,08	3,34	1К	0,40	0,58	56-57	8,72	28-29
				2К	0,40	0,56	63-63	8,40	27-28

Позначення: K_o , ΔK – питомий опір агрегатованих сільгоспмашин та його прирощення; V_n – швидкість руху агрегату; A_{mo} – узагальнений показник енергетичних властивостей; питомі параметри маси трактора $m_{\text{пит}}$, енерговитрат E_n і ширини захвату $N_{\text{пит}}$.

$$\left. \begin{aligned} m_{\text{шт}} &= \eta_{\text{ми}} / (g \varphi_{\text{кр}} V_{\text{н}}) 10^{-3}; \\ E_{\text{н}} &= K_o \cdot \mu_{\text{к}} / \eta_{\text{ми}}; \\ B_{\text{шт}} &= \eta_{\text{ми}} / (K_o \mu_{\text{к}} \cdot V_{\text{н}}); \\ N_{\text{шт}} &= E_{\text{н}} V_{\text{н}}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де $\varphi_{\text{кр}}$ – коефіцієнт використання зчіпної ваги;

$$\mu_{\text{к}} = 1 + \Delta K_i (V_{\text{н}}^2 - 1,96);$$

$\eta_{\text{ми}}$ – тяговий ККД трактора.

При технологічній адаптації тракторів істотне значення має їх баластування, яке необхідне:

- забезпечення тяги трактора, яка є достатньою для виконання енергоємних технологічних операцій;
- гарантії, що передній міст має достатню вагу для забезпечення безпеки і стійкості кермової системи, створення достатньої ваги переднього моста, яка є важливою для стійкості під час роботи у полі, а також для транспортування в польових умовах і по дорогах;
- гарантії, що задній міст навантажено достатньо для витягування, гальмування та стійкості, коли навантажувач або інше переднє знаряддя під'єднано до передньої частини трактора;
- баласт необхідно обмежити мінімальним значенням вантажності шини або потужності двигуна трактора.

При використанні рідкого баласту рекомендується розчин води та хлористого кальцію. Якщо його правильно використовувати він не пошкодить шинам, камерам або ободам, заповнення задніх шин до рівня 40 %, передніх до – 75 %, щоб мати більшу вагу і для підвищення їх жорсткості, що допоможе зниженню резонансних коливань трактора.

При баластуванні трактора маса знімного баласту (твердого або рідкого) визначається при технологічній адаптації для операцій ґрунтообробки кожної із трьох груп (див. табл. 1) за залежностями:

$$\left. \begin{aligned} m_{\text{БЗ}} &= m_{\text{Бmin}} = m_{\text{е3}} - m_{\text{ео}}; \\ m_{\text{Б1}} &= m_{\text{Бmax}} = m_{\text{е1}} - m_{\text{ео}}; \\ m_{\text{Б2}} &= m_{\text{е2}} - m_{\text{ео}}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

де $m_{\text{ео}} = (1,05 - 1,06) m_o$ – експлуатаційна маса трактора при конструктивній m_o .

До недавнього часу баластування рекомендувалося [8] реалізовувати у межах (0...23) % від експлуатаційної ваги трактора, то нині за декларацією закордонних фірм – до 100 % і навіть більше. Тобто трактор може бути забаластований масою рівною або більшою за його експлуатаційну. Позитивному результату цього баластування немає ні теоретичного, ні практичного підтвердження. Наприклад, на тракторі John Deere 8R410 (рис. 2) маса баласту на важких тягових роботах 4200 кг при експлуатаційній вазі трактора 18400 кг, тобто 22,8 % [9].

Аналіз результатів оцінки впливу баластування трактора John Deere 8R410 на його тягово-енергетичні показники дозволяє відмітити, неможливість його застосування при технологічній адаптації за трьома групами ґрунтообробки (див. табл. 1), що передбачають коректування маси баласту (3). Ефективність тракторів загального призначення на стабільна при зміні швидкості їх руху. Наприклад, при випробуваннях у тракторній лабораторії університету Небраски (США) [9] трактора John Deere 8400R Diesel (N_e – 252,26 кВт, маса баласту 2673 кг) ефективність баластування доведена для

певних швидкостей руху. На швидкостях руху без баласту/з баластом 5,86 / 5,63 км/год. трактор має тягове зусилля відповідно 131,45 / 161,59 кН, тобто підвищується на 23 %; на швидкостях 8,53 / 8,75 км/год. тягове зусилля знижується на 10 %; на швидкостях вище 10 км/год. підвищення тягового зусилля не підтверджується внаслідок підвищення витрат енергії на пересування трактора.



Номінальна потужність – 302 кВт;
Швидкість руху з важким культиватором – 7,0 км/год.;
Корисна потужність, що подається – 218 кВт;
Витрата дизельного палива – 54,6 кг/год.;
Розподіл навантаження за осями:
передня 8100 кг (44 %);
задня 10300 кг (56 %)

Рис. 2. Трактор John Deere 8R410 на ґрунтообробних роботах

Отже, застосування баласту ефективно до певного підвищення швидкості руху трактора.

Випробування тракторів у лабораторії університету Небраски (США) [9] проводяться на твердій поверхні (бетон, щільний ґрунт), що не дозволяє оцінити енерговитрати на рух трактора по ґрунту, що зминається. Визначення витрат потужності на пересування трактора на різних агрофонах з баластом і без баласту проведено у Харківській філії ДНУ «УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого» на тракторі John Deere 6230 (рис. 3).



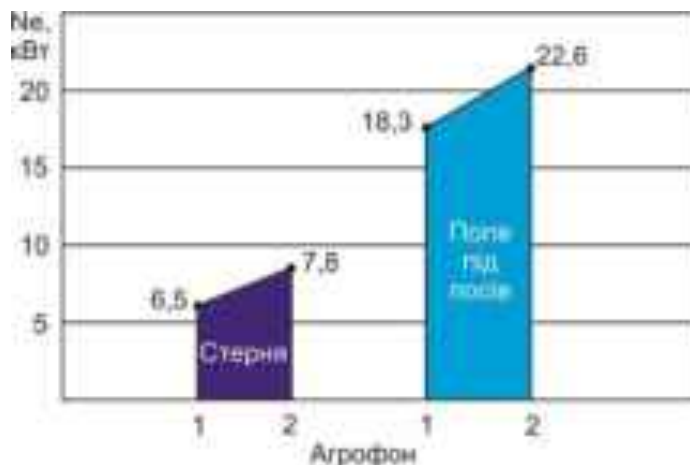
Технічні характеристики:
Номінальна потужність двигуна, кВт (к.с.) – 70 (95);
Вантажопідйомність навішування, кг – 5100;
Маса без баласту, кг – 4390;
Маса з баластом, кг – 5430;
Колісна база, мм – 2400;
Довжина, мм – 4289;
Ширина, мм – 2275;
Висота до верхньої точки від ґрунту, мм – 2714.

Рис. 3. Трактора John Deere 6230 з баластом при випробуваннях

Методика досліджень базується на визначенні тягового зусилля на ведучих колесах трактора за різницею лінійного прискорення [7] відповідно при розгоні і вибігу (вимкнена муфта зчеплення, нейтральна передача трансмісії). При цьому ефективна потужність двигуна оцінюється по добутку тягового зусилля на ведучих колесах трактора на швидкість усталеного руху при розгоні.

Експериментальні дослідження проведені із застосуванням мобільного контрольно-вимірювального комплексу, розробленого у харківських університетах

ХНАДУ та ХНТУСГ імені Петра Василенка за участю Харківської філії ДНУ «УкрНДІПВТ імені Леніода Погорілого» і авторів цієї статі.



Агрофон – стерня колосових культур, поле підготовлене під посів; ґрунт – чорнозем, малогумусний.

Умови випробувань: рельєф поля – вирівняний.

Режими випробувань: рух без баласту; з баластом 1040 кг.

Рис. 4. Витрати потужності N_e на пересування трактора John Deere 6230 при русі без баласту (1), з баластом (2)

Експериментальні дослідження виконані за СОУ 71.2-37-046043090-017:2015 «Сільськогосподарська техніка. Визначення тягових показників тракторів. Метод парціальних прискорень», розробленого Харківської філією ДНУ «УкрНДІПВТ імені Леоніда Погорілого».

Аналіз результатів експериментального дослідження показав, що застосування баласту підвищує витрати потужності на пересування трактора John Deere 6230, які на стерні колосових культур дорівнюють 7,8 кВт (11,14 % від N_e двигуна), на полі, підготовленому під посів, – 22,6 кВт (32,2 % від N_e двигуна). Це призводить до зниження корисної роботи трактора на довжині гону 1000 м на стерні колосових культур на 12,1 %, на полі, підготовленому під посів, – на 33,4 %.

Обговорення

Одночасно відмічено, що замало або забагато баласту призводить до зниження експлуатаційних властивостей трактора. Замало баласту: надмірне обертання коліс, втрати при передачі потужності, зношення шини, втрати палива, нижча продуктивність; забагато баласту: трамбування ґрунту, втрата потужності, збільшення навантаження, втрати палива, нижча продуктивність.

Баластування має істотний вплив на тягове зусилля. Наприклад, при випробуванні тракторів New Holland T6.180 Dynamic Command (N_e – 117 кВт), Case IH Maxxum 145 Active Drive 8 (N_e – 114 кВт), John Deere 8335R (N_e – 246 кВт), проведених у тракторній лабораторії університету Небраски (США) [9], відмічено, що при збільшенні зчіпної ваги трактора масою у межах 10000 кг баластом масою 2000 кг збільшується тягове зусилля на 1000 кг. Такий же ефекти досягається тракторами при роботі з навісними сільгоспмашинами, які додаткова завантажують задню ось трактора. При перевантаженні трактора забезпечується навісною системою підйом сільгоспзнаряддя на декілька сантиметрів, забезпечуючі підвищення навантаження задньої осі і тягового зусилля.

На тракторах загального призначення імпортного виробництва, найбільш затребуваних у аграрному секторі України, наприклад John Deere серії 8R, при їх технологічній адаптації ефективна система Touch SetTM, яка забезпечує стабільність

глибини обробки ґрунту (рис.5).

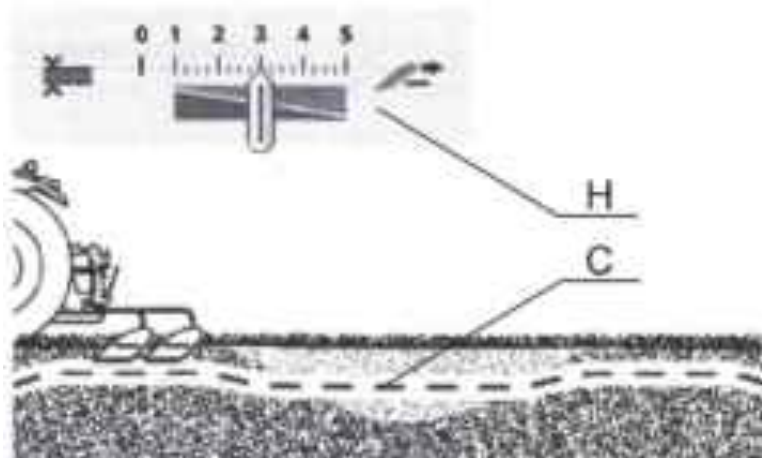


Рис. 5. Середнє значення (С) глибини обробки ґрунту забезпечується системою налаштування (Н), яка розташована в кабіні трактора

Дана система допускає ручне і автоматичне керування глибиною обробки ґрунту із кабіни трактора. При ручному керуванні допустимі верхнє і нижнє значення глибини обробки ґрунту відображається на відповідних індикаторах. Автоматичний режим глибини обробки ґрунту забезпечується системою Command Center™, встановленою в кабіні трактора. Однією із функцій даної системи є оптимальне керування роботою задньої зчипки трактора, яка забезпечує його роботу при максимальному коефіцієнті використання експлуатаційної ваги.

Висновки

1. На ринку тракторів в Україні серед тракторів загального призначення лідирують трактори імпорного виробництва, за ступенем пристосованості яких до виконання технологічного процесу оцінюється їх технологічна адаптація.

2. Сформульовані оціночні показники технологічної адаптації, до яких віднесені продуктивність і питома витрата палива тракторного агрегату, а також узагальнений показник агротехнічних властивостей на операціях ґрунтообробки. На прикладі ґрунтообробного агрегату у складі трактора New Holland T8.390 і дискового лушпильника ДЛМ-8,0 на луценні стерні озимої пшениці обґрунтована методологія технологічної адаптації тракторів імпорного виробництва в аграрному секторі України.

3. Доказана ефективність баластування тракторів загального призначення, яка базується на твердженні про необхідність зміни маси баласту тракторів імпорного виробництва за групами ґрунтообробки. Для тракторів John Deere серії 8R при технологічній адаптації ефективна система Touch Set™, яка забезпечує стабільність глибини обробки ґрунту.

Список використаних джерел

1. Цема Т., Афанасьєва С., Рижкова С. Дослідження елементів технічного регулювання щодо введення в обіг та в експлуатацію сільськогосподарських і лісгосподарських тракторів. Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України. Зб. наук. пр.

УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. 2021. Випуск 29 (43). Дослідницьке. С. 14–28.

2. Лебедев С. Технічний рівень тракторів сільськогосподарського призначення на ринку України. Техніка і технології АПК. 2014. № 11 (52). С. 8-12.

3. Лебедев А., Лебедев С. Технологічна адаптація тракторів загального призначення. Техніка і технології АПК. 2021. № 4 (121). С. 19-21.

4. Лебедев А., Лебедев С., Коробко А. Системний підхід до оцінювання експлуатаційних якостей сільськогосподарських тракторів. Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України. 36. наук. пр. УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. 2022. Випуск 30 (44). Дослідницьке. С. 11–21.

5. ДСТУ 7463:2013. Сільськогосподарська техніка. Трактори сільськогосподарські. Класифікація показників. [Чинний від 2014-01-01]. К., 2013. 11 с. (Національний стандарт України).

6. OECD Standard Code For The Official Testing Of Agricultural And Forestry Tractor Performance. Code 2. 2012. 107 p.

7. Лебедев А.Т., Лебедев С.А., Коробко А.І. Кваліметрія та метрологічне забезпечення випробувань тракторів. Харків : Вид-во «Міськдрук», 2018. 394 с.

8. Надикто В., Кюрчев В. Нові елементи теорії тягової динаміки та експлуатації колісних тракторів. Техніка і технології АПК. 2021. № 4 (117). С. 21-26.

9. Nebraska Tractor Test: веб-сайт. URL: Searching: DigitalCommons@University of Nebraska - Lincoln. (дата звернення: 23.01.2025).

References

1. Tsema T., Afanas'eva S., Ryzhkova S. Doslidzhennya elementiv tekhnichnoho rehulyuvannya shchodo vvedennya v obih ta v ekspluatatsiyu sil's'kohospodars'kykh i lisohospodars'kykh traktoriv. Tekhniko-tekhnologichni aspekty rozvytku ta vyprobuvannya novoyi tekhniky i tekhnolohiy dlya sil's'koho hospodarstva Ukrainy. Zb. nauk. pr. UkrNDIPVT im. L. Pohoriloho. 2021. Vypusk 29 (43). Doslidnyts'ke. pp. 14–28.

2. Lebedyev S. Tekhnichniy riven' traktoriv sil's'kohospodars'koho pryznachennya na rynku Ukrainy. Tekhnika i tekhnolohiyi APK. 2014. № 11 (52). pp. 8-12.

3. Lebedyev A., Lebedyev S. Tekhnologichna adaptatsiya traktoriv zahal'noho pryznachennya. Tekhnika i tekhnolohiyi APK. 2021. № 4 (121). pp. 19-21.

4. Lebedyev A., Lebedyev S., Korobko A. Systemnyy pidkhid do otsinyuvannya ekspluatatsiynykh yakostey sil's'kohospodars'kykh traktoriv. Tekhniko-tekhnologichni aspekty rozvytku ta vyprobuvannya novoyi tekhniky i tekhnolohiy dlya sil's'koho hospodarstva Ukrainy. Zb. nauk. pr. UkrNDIPVT im. L. Pohoriloho. 2022. Vypusk 30 (44). Doslidnyts'ke. pp. 11–21.

5. DSTU 7463:2013. Sil's'kohospodars'ka tekhnika. Traktory sil's'kohospodars'ki. Klasyfikatsiya pokaznykiv. [Chynnyy vid 2014-01-01]. K., 2013. 11 p. (Natsional'nyy standart Ukrainy).

6. OECD Standard Code For The Official Testing Of Agricultural And Forestry Tractor Performance. Code 2. 2012. 107 p.

7. Lebedyev A.T., Lebedyev S.A., Korobko A.I. Kvalimetriya ta metrolohichne zabezpechennya vyprobuvan' traktoriv. Pid red. A.T. Lebedyeva. Kharkiv : Vyd-vo «Mis'kdruk», 2018. 394 p.

8. Nadykto V., Kyurchev V. Novi elementy teorii tyahovoyi dynamiky ta ekspluatatsiyi kolisnykh traktoriv. Tekhnika i tekhnolohiyi APK. 2021. № 4 (117). pp. 21-26.

9. Nebraska Tractor Test: веб-сайт. URL: Searching: DigitalCommons@University of Nebraska - Lincoln. (data zvernennya: 23.01.2025).

**Мигаль В. Д.,
Шевченко І. О.**

Державний
біотехнологічний
університет,
м. Харків, Україна

E-mail:

prof.myhal@gmail.com,
igorshvchnk@gmail.com

СТАН РОЗВИТКУ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ПІДВИЩЕНОЇ НАДІЙНОСТІ

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-26-137-148>

УДК 631.333

Мигаль В.Д., Шевченко І.О. Стан розвитку тягових електродвигунів підвищеної надійності.

Анотація. Розвиток тягових електродвигунів є важливим напрямком удосконалення транспортних машин. Тягові електродвигуни постійно покращуються з погляду споживання електроенергії і надійності та діагностування, а також зменшення витрат на експлуатацію. В цій статті особлива увага приділяється методам вибору типу тягового двигуна, оцінці якості тягових електродвигунів при проектуванні, виготовленні та експлуатації за їх вібраційними характеристиками.

Ключові слова: тяговий електродвигун, підвищення надійності, електромобіль, гібридний автомобіль, якість, вібраційні характеристики.

Mygal V.D., Shevchenko I.O. State of development of traction electric motors of increased reliability.

Abstract. The development of traction motors is an important direction in the improvement of transport vehicles. Traction motors are constantly improving in terms of electricity consumption and reliability and diagnostics, as well as reducing operating costs. This article pays special attention to methods for selecting the type of traction motor, assessing the quality of traction motors during design, manufacture and operation based on their vibration characteristics.

Key words: traction motor, increasing reliability, electric vehicle, hybrid vehicle, quality, vibration characteristics.

Постановка проблеми

Автомобіль є одним із найбільш ефективним, доступним і затребуваним транспортним засобом. Ефективне використання автомобілів залежить від проектної якості, якості виготовлення і експлуатації. При створенні автомобіля відбувається постійний пошук засобів підвищення їх продуктивності, зменшення витрат палива, автоматизації робочих процесів, швидкості, навантаження, забезпечення високого рівня економічності і екологічності, підвищення керованості і комфортабельності автомобілів, ефективною експлуатації, безпеки функціонування, підвищення тягово-швидкісних якостей, витрат на технічне обслуговування, ремонт та експлуатаційних матеріалів.

Вирішення цих задач вимагає часткової або повної заміни конструкції автомобіля, належних дорожньо-транспортних умов і інфраструктури, телематизації та інтелектуалізації автомобільного транспорту [1, 2, 3].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Задачі підвищення економічності і екологічності автомобілів частково вирішуються використанням альтернативних палив, гібридних установок або створення приводу автомобіля на електричній тязі [4, 5]. При створенні електромобілів і гібридних автомобілів основною проблемою є розроблення надійного електродвигуна. При автоматизації робочих процесів є розробка мехатронних систем керування автомобілем (рульове керування, трансмісія і т.п.) [2]. Тому розробка електромобілів стала національною стратегією деяких країн, наприклад Китаю, Японії [6, 7].

Суттєвими можливостями модернізації існуючих автомобілів став розвиток автомобільного електротранспорту, зростання цін на нафтопродукти, підвищення екологічних норм, нові розробки тягових електродвигунів, електроніки і виробництві акумуляторів [8, 9].

Формулювання мети досліджень

Мета роботи – узагальнення розвитку автомобілів, розробка рекомендацій по вибору тягових електродвигунів та створення тягових електродвигунів заданої надійності для автомобілів за їх вібраційними характеристиками.

Результати досліджень

1. Структурний склад електричного приводу автомобіля.

У загальному випадку, склад електричного приводу автомобіля можна надати компонентними варіантами його основних функціональних елементів.

Первинним джерелом електричної енергії на електромобілях є тягові електродвигуни і тягова акумуляторна батарея.



Рис. 1. Структурний склад електроприводу автомобіля

Використання електричної тяги стало пріоритетним напрямком розвитку якісної структури АТЗ завдяки ряду переваг електродвигунів (ЕД) перед ДВЗ в транспортних режимах:

- високий коефіцієнт корисної дії (до 95 %);
- висока питома потужність і низька ціна;
- простота використання і керування;
- екологічність при експлуатації;
- надійність і довговічність;
- переважно повітряне охолодження;
- мінімальна вага трансмісії (не вимагає КПП);
- можливість рекуперації енергії в режимі генератора;
- максимальні показники обертаючого моменту M і потужності N в широкому діапазоні швидкостей обертання.

В електромобілях, у якості тягових можуть використовуватися різні типи електродвигунів. Широке застосування знайшли оборотні машини постійного і змінного (синхронні, асинхронні) струму з вентильним керуванням [10].

2. Типи використовуваних тягових електродвигунів, їх переваги і недоліки.

Аналіз існуючих розробок показав, що найбільш практичне застосування в електроприводі електромобілів і гібридних автомобілів отримали тягові електродвигуни таких типів:

- вентильні електродвигуни з постійними магнітами (ВЕДПМ) (permanent magnet motors (PMM));
- вентильні електродвигуни з електромагнітним збудженням (ВЕДЕМ) (permanent magnet motors with electromagnetic excitation (PMMEE));
- асинхронні частотно-керовані електродвигуни (АЧКЕД) (asynchronous frequency-controlled motors (AFCM)).

Дещо раніше широко застосовувалися тягові колекторні електродвигуни постійного струму (permanent-magnet synchronous motor). На сьогодні вони не можуть успішно конкурувати зі згаданими електродвигунами. Порівняння достоїнств і недоліків цих двигунів з урахуванням експлуатаційних вимог дає описані далі результати. Найвищий ККД мають ВЕДПМ. ВЕДЕМ і АЧКЕД мають дещо менший ККД, їх вагогабаритні параметри гірші ніж у ВЕДПМ, однак, низка достоїнств ВЕДЕМ і АЧКЕД робить їх застосування обґрунтованим і конкурентоздатним [10, 11, 12].

Відносно недорогими і широко розповсюдженими є синхронні електричні машини з електромагнітним збудженням, оскільки вони застосовуються як генератори змінного струму, в тому числі і як автомобільні генератори. Вони застосовуються у якості тяговий у сучасних електромобілях (наприклад, електромобілі Renault).

У якості тягових ЕД на транспортних засобах знайшли застосування вентильні електродвигуни наступних типів:

- асинхронний з короткозамкненим ротором АДКР;
- синхронний з поверхневими постійними магнітами СДПМП;
- синхронний із вбудованими постійними магнітами СДПМВ;
- синхронний реактивний з постійними магнітами СРД-ПМ;
- синхронний двигун з обмоткою збудження СДОЗ.

ВЕД це синхронна електрична машина, у якої є датчики положення ротора. Вона живиться через інвертор на основі сучасних силових ключів й управляється за допомогою мікроконтролера з використанням мінімум двох ACS: по положенню ротора та по граничному фазному струму. Інколи додають ACS по кутовій швидкості (круїз-контроль). Синхронні електричні машини бувають із збудженням від постійних

магнітів і з електромагнітним збуренням. Найбільш широко застосовують ВЕД на основі синхронної електричної машини з висококоерцитивними постійними магнітами на роторі. Такі ВЕД мають більш високий ККД і кращі електричні характеристики. Однак, вони мають високу вартість. Крім того, недоліком таких ВЕД є малий діапазон швидкостей обертання ротора. Оскільки швидкість ідеального холостого ходу пропорційна напрузі живлення якоря та зворотно пропорційна магнітному потоку збурення ротора, для розширення швидкісного діапазону, при неможливості управляти магнітним потоком, потрібне збільшення напруги живлення. У деяких, відносно невеликим межах, векторне управління може послабити потік збурення в таких електродвигунах, що дає можливість розширити діапазон робочих обертів, але це призводить до нераціонального використання електроенергії і зниження ККД.

Відносно недорогими і широко розповсюдженими є синхронні електричні машини з електромагнітним збуренням, оскільки вони застосовуються як генератори змінного струму в тому числі і як автомобільні генератори. Також вони застосовуються як тягові у сучасних електромобілях. Саме це тип електричних машин був вибраний для виготовлення ВЕД тягового електроприводу базового автомобіля, переобладнаного в гібридний. Незважаючи на дещо гірші значення ККД, ВЕД на основі синхронної електричної машини з електромагнітним збуренням, окрім невисокої вартості, має низку інших важливих переваг:

- можливість організувати регулювання обертів у другій зоні електродвигуна шляхом управління потоком збурення. Це дає можливість розширити робочий діапазон швидкостей обертання ротора при фіксованій напрузі живлення. А значить, дасть можливість збільшити передатне число від ВЕД до ведучих коліс. У результаті вдається підвищити пусковий крутильний момент і зберегти потрібну максимальну швидкість;
- забезпечує суттєво менший гальмівний момент у знеструмленому стані, що покращує накат електромобіля або гібридного автомобіля;
- можливість простого й ефективного управління ВЕД в режимі генератора при рекуперації шляхом регулювання порівняно невеликого струму збурення;
- можливість роботи без перенапруження силової електроніки при кутовій швидкості, що набагато перевищує кутову швидкість ідеального холостого ходу. Такий режим необхідний у гібридних автомобілях під час примусового холостого ходу ВЕД при русі автомобіля з допомогою ДВЗ на високій швидкості. ВЕД з постійними магнітами має ЕРС обертання пропорційну кутовій швидкості, і, значить, повинен мати силові ключі з робочою напругою у 3-4 рази більшою, ніж напруга тягової батареї. Це призводить до суттєвого збільшення вартості інвертора і зниження його ККД. У ВЕД з електромагнітним збуренням при вимкненні струму обмотки збурення перенапруги не виникає, тому робоча напруга ключів повинна бути тільки на 20 % вищою за робочу напругу тягової батареї.

Усі переваги ВЕДЕМ перед ВЕДПМ мають і АЧКЕД. При цьому і асинхронна електрична машина має більш просту і технологічну конструкцію, крім того необхідний датчик кутової швидкості тягового АЧКЕД простіший і дешевший за датчик абсолютного положення ротора, який необхідний для тягових ВЕДПМ і ВЕДЕМ. Більш складний алгоритм векторного регулювання АЧКЕД ускладнює мікропроцесорне управління, але сьогодні це не призводить до суттєвого підвищення ціни електроприводу. Перераховані аргументи роблять АЧКЕД одним з найбільш привабливих для застосування в якості тягового електродвигуна електромобілів та гібридних автомобілів.

У зв'язку зі складними умовами експлуатації тягового електродвигуна важливим завданням є забезпечення мінімальних шумів і вібрацій. Тому різні дослідники займаються вивченням причин виникнення і пошуку способів мінімізації даної

проблеми: розробки способів зменшення електромагнітних вібрацій трифазових асинхронних двигунів. Досліджується вплив вібрації та шуму на асинхронних двигун з короткозамкнутим ротором з подвійним похилим ротором (of Squirrel-Cage Induction Machine With Double Skewed Rotor). Визначено, що двигун працює безшумно, коли частота вібрації і частота електромагнітних силових хвиль знаходяться далі від власної частоти сердечника статора.

Розроблені трансмісії на основі синхронного двигуна з постійними магнітами (PMSM) з векторним управлінням. Для покращення зворотного зв'язку щодо швидкості та надійності контролера двигуна був розроблений нечіткий самоналаштовуваний ПІД-регулятор (A fuzzy self-tuning PID controller). Це дає можливість зменшити пульсації крутного моменту, спричинені зміною навантаження та зміною сигналу управління.

Залежно від призначення електроприводу регулювання швидкості обертання і зміна навантаження АЧКЕД виконується векторним або скалярним управлінням. У статичному (усталеному) режимі роботи електроприводу обидва цих варіанти регулювання практично еквівалентні. Але векторне регулювання забезпечує оптимальний режим роботи електродвигуна не тільки в стаціонарних режимах, але і в перехідних (динамічних) режимах. Таким чином попереджається затягування переходу на новий оптимальний режим при різких змінах навантаження або кутової швидкості, та, крім того, захищаються силові електронні ключі від перенапружень і перенавантажень по струму. У тяговому електроприводі електромобіля або гібридного автомобіля тривалість перехідних електромагнітних процесів, як правило, набагато менша, ніж тривалість перехідних процесів режиму руху транспортного засобу. Це дає можливість у більшості випадків розглядати тяговий електропривод як статичний об'єкт.

Тяговий асинхронний двигун з короткозамкнутим ротором в електромобілі навіть під час роботи у скалярному режимі контролера частоти-напруги поєднує в собі низку переваг. А саме: він є найпростішою електричною машиною змінного струму; має хороші пускові та регульовальні властивості двигуна постійного струму. Але, так як в асинхронному двигуні при векторному регулюванні є можливість роздільного управління моментом і полем, то це дає можливість гнучко адаптувати механічну характеристику під умови руху. Тому векторне управління більш перспективне саме в асинхронному тяговому електроприводі.

Значення компонентів вектора напруги статора в нерухомій трифазовій системі координат (фазних напруг) формуються при допомозі широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Частота ШІМ вибирається з мінімуму втрат у феромагнітному матеріалі та силових електронних ключах. Алгоритм ШІМ (векторна ШІМ) у сучасних АЧКЕД забезпечує максимальне використання напруги джерела постійного струму, що дає можливість зменшити фазні струми, а, значить, і теплові втрати у фазних обмотках. При векторній ШІМ реалізація вектора фазних напруг здійснюється за допомогою базових векторів у трифазній системі координат

Поряд з цим важливими критеріями вибору електродвигуна є мінімальна вартість, мінімальна маса, мінімум провідникових і феромагнітних матеріалів. Цього можна досягти, підвищуючи робочі оберти електродвигуна. В електромобілях і гібридних автомобілях робота електродвигуна, як правило, відбувається в широкому діапазоні обертів електродвигуна. Асинхронна електрична машина має просту і міцну конструкцію ротора, що дає можливість розширити робочий діапазон в область високих обертів і тим самим оптимізувати АЧКЕД за вказаними критеріями. Оскільки у зв'язку зі складними умовами експлуатації з підвищенням обертів тягового електродвигуна ускладнюється завдання забезпечення мінімальних вібрації та шумів.

Асинхронна електрична машина має просту й міцну конструкцію ротора, що дає можливість розширити робочий діапазон в область високих обертів і тим самим оптимізувати АЧКЕД за вказаними критеріями.

3. Вибір електродвигуна для тягового електроприводу.

Правильний вибір тягового електроприводу електромобіля або гібридного транспортного засобу дає можливість отримати необхідні технічні, екологічні та експлуатаційні.

При проектуванні тягових електродвигунів використовують різні критерії оптимальності. Для тягового двигуна електромобіля або гібридного автомобіля основним критерієм оптимальності можуть бути мінімальні втрати або максимум ККД. Це пов'язано з тим, що збільшення ККД напряду впливає на збільшення пробігу електромобіля протягом одного циклу розряду акумуляторної батареї (АБ). При цьому відбувається найбільш повне використання енергії АБ для корисної роботи. Досягненню цієї мети також служить здатність електродвигуна забезпечити рекуперативне гальмування і забезпечити мінімальний опір обертанню у знеструмленому стані. Цим критерієм достатньо добре задовольняє АЧКЕД.

Слід відмітити, що ККД у ВЕДПМ дещо вищий, ніж у АЧКЕД, однак, опір обертанню у знеструмленому стані в АЧКЕД суттєво менший. Електричне гальмування з рекуперацією енергії в АБ найбільш просто й ефективно досягається у ВЕДЕМ. В АЧКЕД здійснення цього режиму вимагає більш складних алгоритмів управління.

На рис. 2 представлені порівняльні характеристики, перерахованих типів вентильних двигунів при обмеженому струмі статора [10].

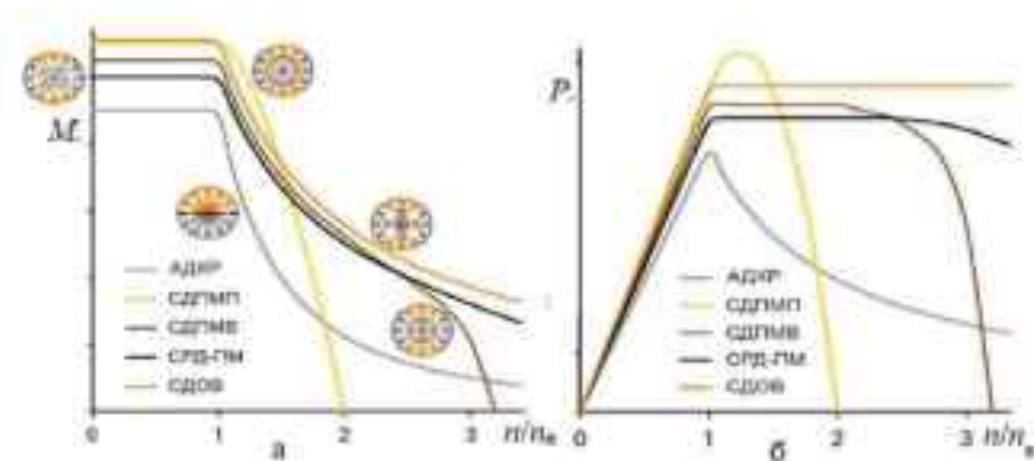


Рис. 2. Механічні характеристики електродвигунів різних типів:
а – моментні; б – потужнісні

Вентильні системи синхронних і асинхронних двигунів відрізняються за ознакою напруги живлення – постійного струму BLDC і змінного PMAC струму.

Згідно наведеним характеристикам, найбільш придатними для застосування у якості тягових агрегатів на автомобілі є електродвигуни типу СРД-ПМ і СДОВ. Такі двигуни забезпечують високий ККД в широкому робочому діапазоні.

4. Розробка рекомендацій по створенню електродвигунів підвищеної надійності і ресурсу.

Незважаючи на переваги використання тягових електродвигунів в автомобілях їх ресурс не задовольняє вимогам надійності, забезпечення мінімальних шуму і вібрації.

Тяговий електродвигун автомобілів експлуатується з довільним чергуванням розгону, гальмування і руху з усталеною швидкістю, подоланням підйомів і спусків, короточасний паркування на зупинках, заторах, світлофорах, перехрестях і «випадкового» механічного і електричного навантаження на систему тягового електроприводу [13]. Така динаміка роботи тягового електродвигуна у перехідних режимах призводить до збурення високих рівнів вібрації. В результаті, частка втомних поломок автомобільних деталей електродвигуна, викликаних вібрацією, становить від 60 % до 88 % від загальної кількості поломок.

Тому підвищення надійності і ресурсу автомобілів на електричній тязі залежить від створення тягових електродвигунів з рівнями вібрації, які не впливають шкідливо на технічний стан електродвигуна.

Джерела вібрації електромагнітного, механічного та аеродинамічного походження асинхронних двигунів детально розглянуті в роботах [14, 15], рис. 3. Вібрація електродвигуна є природною реакцією на дію внутрішніх і зовнішніх збурюючих сил. Висока універсальність, чутливість та вибірковість сигналів вібрації дає можливість діагностувати окремі дефекти і несправності та взаємозв'язок механічних, магнітних та електричних системах на холостому ходу при різних швидкостях і навантаженнях.

У вібраційному сигналі міститься інформація про стан компонентів структурних, функціональних і динамічних властивостей електродвигуна, що визначають його технічний стан, показником досконалості конструкції і технології виробництва [15, 16].

За вібраційними характеристиками електродвигунів при проектуванні визначають технічний рівень прийнятих рішень в виробництві, технічний рівень технологій виготовлення і складання електродвигуна. В експлуатації за допустимими рівнями прирощення вібрації [15, 17].

Відомі складні теоретичні методи розрахунків допустимих і заданих рівнів вібрації. Вони мають недостатню достовірність, оскільки не можуть урахувати багато конструктивних, технологічних і динамічних чинників технічного стану, які існують в реальних ЕД. Вплив цих чинників на реальну якість ЕД вимагає проведення великого обсягу експериментальних робіт, які полягають у доведенні ЕД до проектного технічного рівня шляхом розробки конструктивних і технологічних способів зниження вібрації макетних і дослідних зразків, вузлів та електродвигуна. Такі заходи дають можливість підвищити їх безвідмовність, довговічність, ресурс, зменшити шкідливий вплив на людину та довкілля, знизити витрати на технічне обслуговування автомобілів у цілому [15, 17, 18].

Створення асинхронних електродвигунів із заданими рівнями вібрації, а значить і надійності, пов'язане з оптимізацією численних конструктивних і технологічних завдань. З точки зору підвищення надійності та ресурсу найнебезпечнішими є вібрації в діапазоні частот від робочої частоти обертання до 10 кГц.

Для проектування асинхронних тягових електродвигунів розроблені методи нормування вібраційних характеристик в області частот від 5 Гц до 10000 Гц [15, 19], розроблені методи визначення допустимої вібрації [12, 15] і три класу вібрації (рис. 4) для якісної оцінки технічного рівня електродвигунів при частоті обертання 3000 хв^{-1} .



Рис. 3. Причини та джерела вібрації електромагнітного, механічного та аеродинамічного походження асинхронного електродвигуна

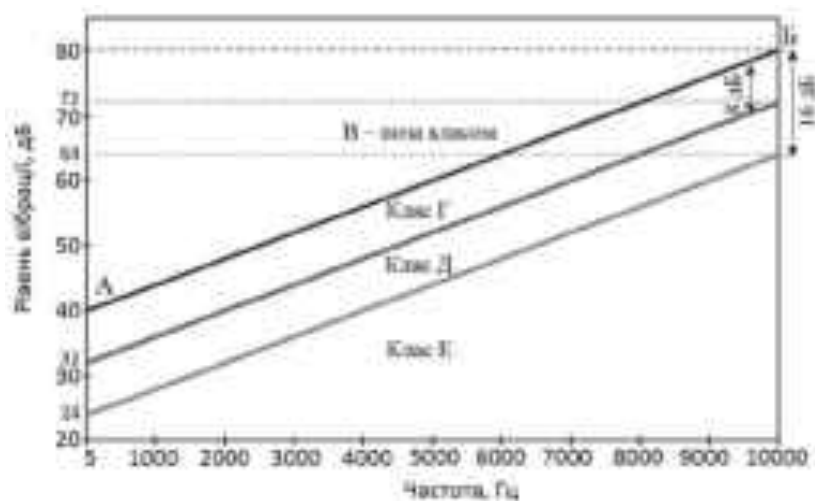


Рис. 4. Діапазони класів вібрації електродвигунів

Електродвигуни класу В з рівнями вібрації вище 48 дБ на частоті 5 Гц і 80 дБ на частоті 10 кГц мають знижену надійність порівняно з класом вібрації Г.

Клас Г з рівнями вібрації <40 дБ на частоті 5 Гц і <80 дБ на частоті 10 кГц.

Клас Д з рівнями вібрації <32 дБ на частоті 5 Гц і <72 дБ на частоті 10 кГц.

Клас Е з рівнями вібрації <24 дБ на частоті 5 Гц і <64 дБ на частоті 10 кГц.

Двигуни з рівнями вібрації вище прямої АБ (клас В) до використання в електромобілях не рекомендуються через високі рівні вібрації, які знижують надійність, прискорюють процеси спрацювання і шкідливо впливають на надійність електродвигуна і довкілля.

За рівні вібрації прийняті третьоктавні значення віброприскорень в децибелах (дБ) в області частот від 5 Гц до 10 кГц в режимі холостого ходу. В цій області частот проявляються вібрації, збурюванні всіма дефектами електродвигуна (рис. 3, 5).

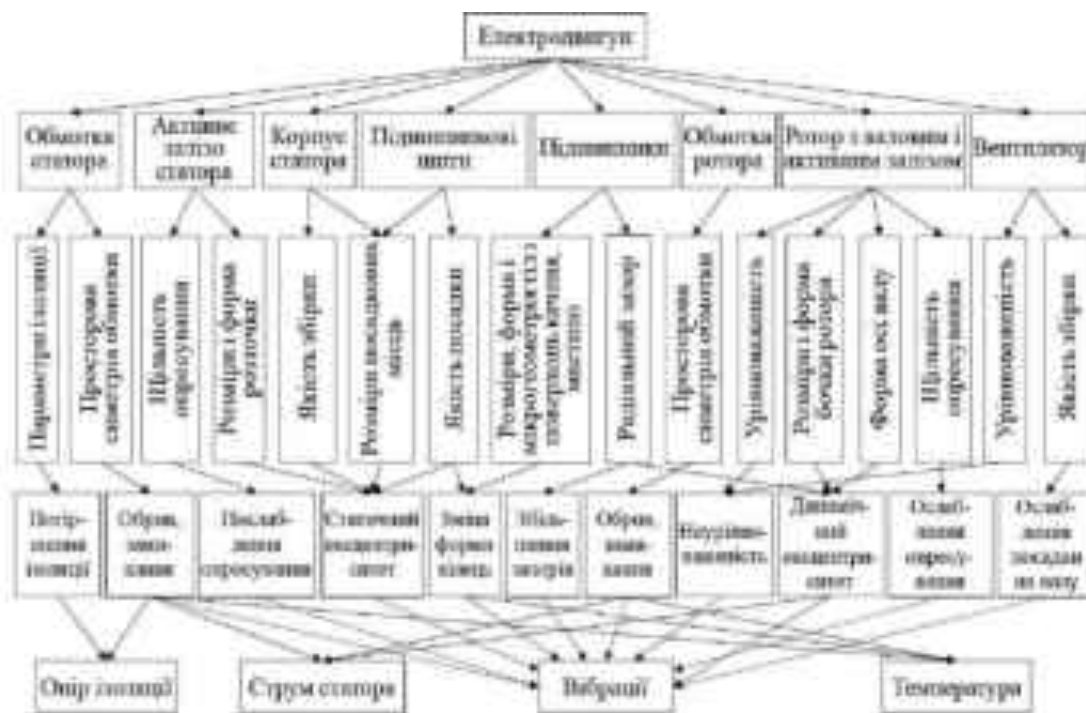


Рис. 5. Віброакустична граф-модель асинхронного електродвигуна

Перевищення норм вібрації розглядається як параметрична відмова електродвигуна. Експериментальне визначення допустимої вібрації і зв'язок вібрації з ресурсом машини показано в роботі [15].

Обговорення

Визначене обладнання, методи і засоби контролю вібрації електродвигунів на відповідність нормам вібрації при проектуванні, встановленні і в експлуатації електродвигунів [12, 15, 19].

Розроблені методи проектування і доведення електродвигунів до заданих рівнів вібрації шляхом: призначення підшипників визначеного класу вібрації [20], конструктивних параметрів деталей підшипникових вузлів [15, 20]. Параметрів деталей електромагнітних систем: форми паза магнітопроводу ротора і статора, зазору між магнітопроводом статора і ротора, скосу пазів ротора, відбудови власних частот деталей електродвигуна [15], оптимізації жорсткості ротора. Удосконалення технології

виготовлення складання підшипникових вузлів і складання електродвигунів з двох незалежно контрольованих вузлів [15, 20].

Висновки

1. Основним критерієм оцінки якості тягових електродвигунів є їх вібраційні характеристики в діапазоні частот від 5 Гц до 10000 Гц.
2. Рівень конструкторсько-технологічної якості створених тягових електродвигунів оцінюються за розподіленими класами рівнів вібрації.
3. Розроблені засоби доведення конструкції електродвигуна до заданого класу вібрації.
4. Описані методи і обладнання випробування і вимірювання вібрації.

Список використаних джерел

1. Мигаль В.Д. Інтелектуальні системи в технічній експлуатації автомобілів: монографія. Х.: Майдан. 2018. 262 с.
2. Мигаль В.Д. Мехатронні та телематичні системи автомобілів: навч. посібник. Х.: Майдан. 2017. 314 с.
3. Мигаль В.Д., Шуляк М.Л., Шевченко І.О. Інтелектуальні системи тракторів і автомобілів, сервісний супровід: підручник. Х.: ДБТУ, Майдан. 2023. 246 с.
4. Hnatov A., Arhun S., Tarasov K., Hnatova H., Mygal V., Patlins A. Researching the model of electric propulsion system for bus using Matlab Simulink. Presented at the 2019 IEEE 60th Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON): Riga, Latvia, October 7 2019. P. 1-6.
5. Burch I., Gilchrist J. Survey of Global Activity to Phase out Internal Combustion Engine Vehicles. Center of Climate Protection: Santa Rosa, CA, USA. 2018.
6. Du J., Ouyang M., Chen J. Prospects for Chinese Electric Vehicle Technologies in 2016-2020: Ambition and Rationality. Energy. 2017. 120. P. 584-596, doi:10.1016/j.energy.2016.11.114.
7. Anman M. Government Policy and the Development of Electric Vehicles in Japan. Energy Policy. 2006. 34. P. 433-443.
8. Arhun S., Migal V., Hnatov A., Ponikarovska S., Hnatova A., Novichonok S. Determining the quality of electric motors by vibro-diagnostic characteristics. EAI Endorsed Trans. Energy Web. vol. 7. no. 29. 2020. doi: 10.4108/EAI.13-7-2018.164101.
9. Zarma T.A., Galadima A.A., Aminu M.A. Review of Motors for Electric Vehicles. Journal of Scientific Research and Reports. Oct. 2019. P. 1-6. doi: 10.9734/jsrr/2019/v24i630170.
10. Бороденко Ю.М., Гнатов А.В., Аргун І.В. Мехатронні системи автомобіля. Частина 1. Силовий привід: підручник. Харків, ХНАДУ. 2023. 297 с.
11. Shymuk D., Hnatov A., Arhun S., Ponikarovska S., Mygal V., Kunicina N. Solving the problem of balancing and complete compensation of reactive power for a three-phase power supply system. EAI Endorsed Trans. Energy Web. 7. 2020. <https://doi.org/10.4108/EAI.13-7-2018.163093>.
12. Migal V., Arhun S., Hnatov A., Dvadenko V., Ponikarovska S. Substantiating the criteria for assessing the quality of asynchronous traction electric motors in electric vehicles and hybrid cars. J. Korean Soc. Precis. Eng. 36. 2019. P. 989-999. <https://doi.org/10.7736/KSPE.2019.36.10.989>.
13. Hnatov A., Arhun S., Mygal V., Bisenieks M., Grants R., Ulianets O. Prospects for the Use of Electric Drives in Urban Passenger Vehicle Transport in Ukraine. Presented at the

2023 IEEE 64th Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON 2023 – Proceedings. 2023.

14. Mygal V., Arhun S., Shuliak M., Hnatov A., Kalinin E., Mysiura M. Functional and Engineering Methods of Upgrading the Quality of Induction Traction Electric Motors. EAI Endorsed Trans. Energy Web. 8. 2021. P. 1-9. <https://doi.org/10.4108/eai.29-1-2021.168537>.

15. Мигаль В.Д., Аргун Ш.В. Вібраційна діагностика машин: проектування, виготовлення, експлуатація: монографія. Харків: Мачулін. 2024. 441 с.

16. Migal V., Arhun S., Shuliak M., Hnatov A., Trunova I., Shevchenko I. Assessing design and manufacturing quality of tractor gearboxes by their vibration characteristics. JVC Journal Vib. Control. 29. 2023. P. 1218–1228. <https://doi.org/10.1177/10775463211060899/>.

17. Migal V., Arhun S., Hnatov A., Shuliak M. Evaluating the Quality of Design and Manufacture of Agricultural Tractors by Vibration Characteristics. Presented at the Transport Means - Proceedings of the International Conference. 2022.

18. Arhun S., Migal V., Hnatov A., Hnatova H., Ulyanets O. System approach to the evaluation of the traction electric motor quality. EAI Endorsed Trans. Energy Web. 7. 2020. <https://doi.org/10.4108/eai.13-7-2018.162693>.

19. Migal V., Arhun S., Hnatov A., Ulyanets O., Shevchenko I. Requirements for vibroacoustic methods of the quality assessment of vehicles traction electric motors. Noise Vib. Worldw. 2024. <https://doi.org/10.1177/09574565241243390>.

20. Migal V., Lebedev A., Shuliak M., Kalinin E., Arhun S., Korohodskyi V. Reducing the vibration of bearing units of electric vehicle asynchronous traction motors. JVC Journal Vib. Control. 27. 2021. P. 1123-1131. <https://doi.org/10.1177/1077546320937634>.

References

1. Myhal' V.D. Intel'ektual'ni systemy v tekhnichnyi ekspluatatsiyi avtomobiliv: monohrafiya, Kh.: Maydan, 2018, 262 p.

2. Myhal' V.D. Mekhatronni ta telematychni systemy avtomobiliv: navch. posibnyk, Kh.: Maydan, 2017, 314 p.

3. Myhal' V.D., Shulyak M.L., Shevchenko I.O. Intel'ektual'ni systemy traktoriv i avtomobiliv, servisnyy suprovod: pidruchnyk, Kh.: DBTU, Maydan, 2023, 246 p.

4. Hnatov A., Arhun S., Tarasov K., Hnatova H., Mygal V., Patlins A. Researching the model of electric propulsion system for bus using Matlab Simulink. Presented at the 2019 IEEE 60th Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON): Riga, Latvia, October 7 2019, pp. 1-6.

5. Burch I., Gilchrist J. Survey of Global Activity to Phase out Internal Combustion Engine Vehicles, Center of Climate Protection: Santa Rosa, CA, USA, 2018.

6. Du J., Ouyang M., Chen J. Prospects for Chinese Electric Vehicle Technologies in 2016-2020: Ambition and Rationality. Energy, 2017, 120, pp. 584-596, doi:10.1016/j.energy.2016.11.114.

7. Anman M. Government Policy and the Development of Electric Vehicles in Japan. Energy Policy, 2006, 34. pp. 433-443.

8. Arhun S., Migal V., Hnatov A., Ponikarovska S., Hnatova A., Novichonok S. Determining the quality of electric motors by vibro-diagnostic characteristics. EAI Endorsed Trans. Energy Web., vol. 7, no. 29, 2020, doi: 10.4108/EAI.13-7-2018.164101.

9. Zarma T.A., Galadima A.A., Aminu M.A. Review of Motors for Electric Vehicles. Journal of Scientific Research and Reports, Oct. 2019, pp. 1-6, doi: 10.9734/jsrr/2019/v24i630170.

10. Borodenko Yu.M., Hnatov A.V., Arhun Sh.V. Mekhatronni systemy avtomobilya.

Chastyna I. Sylovyy pryvid: pidruchnyk, Kharkiv, KHNADU, 2023, 297 p.

11. Shymuk D., Hnatov A., Arhun S., Ponikarovska S., Mygal V., Kunicina N. Solving the problem of balancing and complete compensation of reactive power for a three-phase power supply system. EAI Endorsed Trans. Energy Web, 7, 2020, <https://doi.org/10.4108/EAI.13-7-2018.163093>.

12. Migal V., Arhun S., Hnatov A., Dvadnenko V., Ponikarovska S. Substantiating the criteria for assessing the quality of asynchronous traction electric motors in electric vehicles and hybrid cars, J. Korean Soc. Precis. Eng., 36, 2019, P. 989-999, <https://doi.org/10.7736/KSPE.2019.36.10.989>.

13. Hnatov A., Arhun S., Mygal V., Bisenieks M., Grants R., Ulianets O. Prospects for the Use of Electric Drives in Urban Passenger Vehicle Transport in Ukraine, Presented at the 2023 IEEE 64th Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON 2023, Proceedings, 2023.

14. Mygal V., Arhun S., Shuliak M., Hnatov A., Kalinin E., Mysiura M. Functional and Engineering Methods of Upgrading the Quality of Induction Traction Electric Motors, EAI Endorsed Trans. Energy Web, 8, 2021, pp. 1-9, <https://doi.org/10.4108/eai.29-1-2021.168537>.

15. Myhal' V.D., Arhun Sh.V. Vibratsiyna diahnostyka mashyn: proektuvannya, vyhotovlennya, ekspluatatsiya: monohrafiya, Kharkiv: Machulin, 2024, 441 p.

16. Migal V., Arhun S., Shuliak M., Hnatov A., Trunova I., Shevchenko I. Assessing design and manufacturing quality of tractor gearboxes by their vibration characteristics, JVC Journal Vib. Control, 29, 2023, pp. 1218–1228. <https://doi.org/10.1177/10775463211060899/>.

17. Migal V., Arhun S., Hnatov A., Shuliak M. Evaluating the Quality of Design and Manufacture of Agricultural Tractors by Vibration Characteristics, Presented at the Transport Means - Proceedings of the International Conference, 2022.

18. Arhun S., Migal V., Hnatov A., Hnatova H., Ulyanets O. System approach to the evaluation of the traction electric motor quality, EAI Endorsed Trans. Energy Web, 7, 2020, <https://doi.org/10.4108/eai.13-7-2018.162693>.

19. Migal V., Arhun S., Hnatov A., Ulianets O., Shevchenko I. Requirements for vibroacoustic methods of the quality assessment of vehicles traction electric motors, Noise Vib. Worldw., 2024, <https://doi.org/10.1177/09574565241243390>.

20. Migal V., Lebedev A., Shuliak M., Kalinin E., Arhun, Korohodskyi V. Reducing the vibration of bearing units of electric vehicle asynchronous traction motors, JVC Journal Vib. Control, 27, 2021, pp. 1123-1131, <https://doi.org/10.1177/1077546320937634>.

**Шевченко І. О.,
Макаренко М. Г.,
Блезнюк О. В.**
Державний
біотехнологічний
університет,
м. Харків, Україна
E-mail:
igorshvchnk@gmail.com,
mak_nk@ukr.net,
bleznyuk@ukr.net

**ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ
АВТОМОБІЛЬНИХ ТРАНСМІСІЙ
НА ОСНОВІ ІНТЕГРОВАНОГО АНАЛІЗУ
ВІБРАЦІЙНИХ І АКУСТИЧНИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ
ПЕРЕДОВИХ МЕТОДІВ ШТУЧНОГО
ІНТЕЛЕКТУ ТА МОДЕЛЮВАННЯ
ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ**

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-26-149-162>

УДК 629.113.018.27

Шевченко І.О., Макаренко М.Г., Блезнюк О.В. Прогнозування технічного стану автомобільних трансмісій на основі інтегрованого аналізу вібраційних і акустичних характеристик із застосуванням передових методів штучного інтелекту та моделювання перехідних процесів.

Анотація. У статті представлено інноваційну методологію прогнозування технічного стану автомобільних трансмісій, яка базується на інтегрованому аналізі вібраційних і акустичних характеристик із використанням передових методів штучного інтелекту та чисельного моделювання перехідних процесів. Розроблений підхід дозволяє ідентифікувати дефекти на ранніх стадіях та враховує динамічну природу реальних умов експлуатації. Застосовано метод кінцевих елементів (FEM) для створення цифрових моделей динаміки систем, а також алгоритми глибокого навчання (CNN, LSTM) для аналізу даних і прогнозування залишкового ресурсу компонентів трансмісій. Результати дослідження демонструють зниження витрат на технічне обслуговування та підвищення надійності транспортних засобів. Запропонована методика може бути впроваджена в автомобільну промисловість, сервісні компанії та науково-дослідні установи.

Ключові слова: автомобільні трансмісії, штучний інтелект, чисельне моделювання, метод кінцевих елементів, глибоке навчання, вібраційний аналіз, акустичні характеристики.

Shevchenko I.O., Makarenko M.G., Bleznyuk O.V. Forecasting the technical condition of automobile transmissions based on integrated analysis of vibration and acoustic characterizing using advanced methods of artificial intelligence and modeling of transient processes.

Abstract. The technical state prediction of automotive transmissions plays a pivotal role in ensuring the reliability, safety, and cost-effectiveness of modern vehicles. Automotive transmissions operate under variable and often harsh conditions, which makes early detection of defects and accurate life prediction critical challenges in vehicle maintenance. This study presents a comprehensive methodology for diagnosing and forecasting the technical state of automotive transmissions by leveraging advanced signal analysis, state-of-the-art artificial intelligence techniques, and mathematical modeling of transient processes.

The proposed approach begins with the acquisition of high-precision multi-source data, including vibration, acoustic, and thermal signals collected under real-world operational conditions. Signal preprocessing methods, such as noise reduction and feature extraction using Fourier and Wavelet Transform techniques, are applied to isolate diagnostically significant features. Advanced machine learning algorithms-including neural networks, support vector machines, and ensemble methods such as Random Forest and Gradient Boosting - are employed to classify defect types and predict the remaining useful life of components. Complementary mathematical modeling techniques, including finite element analysis and numerical solutions for nonlinear systems, are used to simulate the dynamics of transmission components under variable loads.

Experimental validation demonstrates the methodology's effectiveness in diagnosing early-stage defects and providing accurate life predictions, significantly reducing unscheduled downtimes. The integration of this methodology into automated monitoring systems improves diagnostic precision and optimizes maintenance schedules, enhancing overall vehicle reliability and safety.

Future research will focus on extending this methodology to accommodate emerging vehicle technologies, such as electric and hybrid powertrains, while addressing the challenges of explainability in AI-driven diagnostics.

Key words: automotive transmissions, artificial intelligence, numerical modeling, finite element method, deep learning, vibration analysis, acoustic characteristics.

Постановка проблеми

Сучасні автомобільні трансмісії є складними технічними системами, які працюють у змінних умовах навантажень. Існуючі методи діагностики не завжди забезпечують достатню точність для виявлення дефектів на ранніх стадіях, що підвищує ризики дорогих ремонтів і зниження продуктивності.

Запропоноване дослідження вирішує цю проблему через інтеграцію аналізу вібраційних та акустичних характеристик із моделями перехідних процесів. Новизна підходу полягає в одночасному використанні штучного інтелекту (глибокі нейронні мережі CNN, LSTM) та чисельного моделювання (FEM), що дозволяє виявляти дефекти ще до їхнього впливу на загальну роботу трансмісії. Методика також враховує вплив нелінійних і стохастичних факторів, які є характерними для реальних умов експлуатації.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Забезпечення безперебійної роботи автомобільних трансмісій є однією з ключових задач сучасної транспортної інженерії. Зважаючи на складність конструкції трансмісій і вплив змінних експлуатаційних умов, виникає потреба в інноваційних підходах до прогнозування їхнього технічного стану.

Проблема прогнозування полягає в необхідності забезпечення високої надійності трансмісій за умов зростання вимог до їхньої ефективності, довговічності та зменшення витрат на технічне обслуговування. Дефекти в трансмісійних системах можуть призводити до значних втрат продуктивності та збільшення витрат, що робить цю задачу важливою як з наукового, так і з практичного погляду.

Останні дослідження у сфері діагностики демонструють значний прогрес у використанні сучасних підходів до аналізу технічного стану автомобільних трансмісій. Наприклад, Smith et al. (2019) детально розглядають методи вібраційного аналізу, які дозволяють виявляти механічні дефекти на основі частотних характеристик сигналів.

Lee et al. (2020) дослідили застосування штучного інтелекту, зокрема нейронних мереж, для автоматизації процесу діагностики та прогнозування стану вузлів трансмісії. Водночас, Chen et al. (2021) продемонстрували ефективність чисельного моделювання методом кінцевих елементів (FEM) у відтворенні динамічної поведінки систем трансмісії.

Однак, попри досягнутий прогрес, ці підходи мають певні обмеження. Зокрема, вони часто не враховують динамічну природу перехідних процесів, які є особливо важливими для точного прогнозування поведінки трансмісії в реальних експлуатаційних умовах. Саме тому інтеграція вібраційного аналізу, штучного інтелекту та чисельного моделювання із врахуванням перехідних процесів є необхідною для вирішення поставленої проблеми.

Формулювання мети досліджень

Завдання даного дослідження полягає в теоретичному підході з формування інтегрованої методології прогнозування технічного стану автомобільних трансмісій через комплексний аналіз вібраційних і акустичних сигналів, застосування характеристик перехідних процесів та впровадження сучасних методів штучного інтелекту і чисельного моделювання.

Результати досліджень

Проведений аналіз підходів до діагностики автомобільних трансмісій показав, що існуючі методи підрозділяються на докласичні, ґрунтовані на аналізі одного типу даних (наприклад, вібраційних чи акустичних), та інтегровані, що поєднують дані різних типів.

Докласичні методи, такі як аналіз спектрів вібрацій або акустичних характеристик, базуються на використанні традиційних алгоритмів спектрального аналізу, які дозволяють ідентифікувати явні дефекти, що зумовлюють значні зміни у спектральних параметрах. Проте, ці підходи демонструють низьку чутливість до прихованих дефектів або до дефектів, які перебувають на початковій стадії розвитку, через недостатню роздільну здатність методів та обмеженість моделей, що враховують лише лінійні зміни параметрів.

Інтегровані підходи вирізняються високою чутливістю завдяки комплексному аналізу даних з різних джерел, таких як вібраційні, акустичні сигнали та математичні моделі. Такий підхід дозволяє не лише виявляти дефекти різних типів і масштабів, а й враховувати їхній вплив на загальний технічний стан системи. Зокрема, інтеграція різних джерел даних знижує ймовірність пропуску прихованих дефектів, забезпечуючи більш точне прогнозування стану трансмісії в умовах різної складності експлуатації.

Однак, ці методи мають також і обмеження. Так, докласичні підходи мають обмежену здатність до адаптації під змінні умови експлуатації, такі як вагові навантаження, температурні коливання та динамічні зміни процесів. Це зумовлюється тим, що більшість таких методів спирається на статичні моделі, які не враховують нелінійні ефекти та не забезпечують ефективного реагування на складні режими роботи, наприклад, при швидких переходах між режимами або в умовах нестабільних впливів навколишнього середовища.

Адаптивність інтегрованих та заснованих на штучному інтелекті методів, зокрема таких, що застосовують методи машинного навчання та штучного інтелекту, забезпечують високу адаптивність до змінних умов експлуатації. Завдяки здатності до самостійного навчання на основі отриманих даних, ці системи коригують параметри

аналізу у реальному часі. Це дозволяє оперативно враховувати зміну динаміки роботи трансмісії, вплив температурних коливань, вагових навантажень та інших зовнішніх факторів. Такий підхід сприяє не лише коректному виявленню дефектів, але й зменшує ризик помилкових діагностичних висновків, що є особливо важливим для забезпечення безперебійної експлуатації транспортних засобів.

Сучасні високоточні сенсорні системи є важливим інструментом для забезпечення високої достовірності та всебічності даних, необхідних для діагностики автомобільних трансмісій. Їхня здатність працювати в реальних експлуатаційних умовах дозволяє враховувати численні змінні фактори, такі як динамічна природа навантажень, вплив температурних змін, вологість і механічні вібрації, які можуть значно впливати на працездатність і технічний стан трансмісії. Ці сенсорні системи забезпечують отримання високоякісних сигналів, що є особливо важливим для точного аналізу та виявлення можливих дефектів.

До основних типів сенсорів, що застосовуються для збору сигналів, належать різні класи високочутливих пристроїв, здатних працювати у складних експлуатаційних умовах та забезпечувати надійні й точні вимірювання.

Вібраційні сенсори забезпечують високоточне вимірювання механічних коливань у широкому діапазоні частот. Ці пристрої дозволяють виявляти як поверхневі, так і приховані дефекти в елементах трансмісії завдяки аналізу спектральних характеристик та виявленню аномалій у вібраційних сигналах. Використання сучасних вібраційних сенсорів забезпечує не лише локалізацію дефектів, але й дає змогу оцінити динамічний стан системи загалом.

Акустичні сенсори надають можливість проведення детального аналізу звукових сигналів, які генеруються компонентами трансмісії під час її роботи. Завдяки використанню цих сенсорів вдається ідентифікувати аномалії, що свідчать про потенційні дефекти, такі як нерівномірний знос, надмірне тертя чи пошкодження зубчастих механізмів. Особливістю акустичних сенсорів є їх здатність працювати у широкому частотному діапазоні, що дозволяє виявляти як низькочастотні, так і високочастотні сигнали, пов'язані з різними типами несправностей.

Температурні сенсори відслідковують теплові зміни, що можуть свідчити про підвищене тертя або інші дефекти.

Сучасні високоточні сенсори забезпечують високу роздільну здатність і стабільність вимірювань навіть у складних умовах, таких як висока вологість або коливання температури. Це сприяє мінімізації похибок у даних та підвищує надійність діагностичних висновків. Завдяки високій чутливості сучасні сенсорні системи дозволяють забезпечити комплексний збір даних, що точно відображають зміну умов експлуатації, таких як динамічні навантаження, зміни швидкості обертання, температурні коливання та інші впливи зовнішнього середовища. Це забезпечує можливість адаптації діагностичних систем до різних режимів роботи автомобільних трансмісій, підвищуючи точність прогнозування технічного стану.

А інтеграція сенсорних систем із передовими методами штучного інтелекту створює основу для автоматизованого аналізу даних безпосередньо в точці їх збору. Це дозволяє ефективно обробляти великі обсяги інформації у режимі реального часу, зменшуючи затримки в діагностиці та підвищуючи швидкість реагування на аномальні ситуації. Завдяки алгоритмам машинного навчання можна адаптувати аналіз до змінних умов експлуатації, враховуючи специфіку отриманих сигналів, таких як вібраційні, акустичні чи температурні, що значно покращує точність виявлення та прогнозування потенційних дефектів.

Однак, реальні умови експлуатації вимагають регулярного калібрування сенсорних систем для забезпечення їх точності та з метою підвищення точності

діагностики важливо впроваджувати алгоритми обробки сигналів, що дозволяє мінімізувати вплив шумів та артефактів.

Попередня обробка сигналів є невід'ємним етапом аналізу даних у процесі діагностики автомобільних трансмісій. Цей етап спрямований на виділення ключових параметрів сигналів для підвищення точності подальшого аналізу та мінімізації впливу шумів та інших перешкод.

Застосування FFT (Швидкого перетворення Фур'є, Fast Fourier Transform) є базовим методом аналізу сигналів, що дозволяє швидко і ефективно перетворювати сигнал з часової області в частотну. Цей метод забезпечує детальний аналіз частотних компонентів, що є ключовими для виявлення аномалій і дефектів у роботі автомобільних трансмісій. FFT дозволяє ідентифікувати основні частотні компоненти, виявити нелінійності у спектральному розподілі та аналізувати динамічні зміни спектра.

Завдяки розкладанню сигналу на спектральні складові, FFT забезпечує точне виявлення характерних частот, що є ключовими для діагностики технічного стану трансмісії. Ці частоти можуть сигналізувати про такі поширені дефекти, як знос підшипників, дисбаланс компонентів або резонансні явища. Додатково, аналіз основних частот дозволяє ідентифікувати кореляції між спектральними характеристиками і режимами експлуатації, що покращує точність прогнозування.

Використання FFT дозволяє також ефективно ідентифікувати частотні компоненти, які не відповідають типовому спектральному розподілу для нормального режиму роботи. Такі компоненти можуть сигналізувати про нерівномірність в роботі окремих елементів трансмісії, що є наслідком прихованих дефектів, таких як мікротріщини, деформації зубців шестерень або нестабільна робота підшипників. Додатково, аналіз таких аномалій дозволяє уточнити природу дефекту і його потенційний вплив на загальний технічний стан системи.

В цілому цей метод дозволяє ретельно відслідковувати зміну частотних характеристик сигналів у режимах перехідних процесів, таких як запуск, зупинка або різкі зміни навантаження трансмісії. Завдяки високій часовій і частотній роздільній здатності FFT, вдається точно ідентифікувати аномалії, які виникають внаслідок нестабільності механічних компонентів, тертя або резонансних явищ. Аналіз динамічних змін спектра є важливим для оцінки адаптивності системи до змінних умов експлуатації та попередження аварійних ситуацій.

FFT є одним із найбільш поширених методів аналізу сигналів у частотній області. Він дозволяє ідентифікувати частотні компоненти сигналів, виявити резонансні частоти та оцінити енергетичні характеристики.

Завдяки розкладанню сигналу на спектральні складові, FFT дозволяє з високою точністю виявляти характерні частоти, що відображають нормальні або аномальні процеси у роботі трансмісії. Ці частоти слугують індикаторами типових дефектів, таких як дисбаланс, механічний знос чи нерівномірність навантаження. Крім того, спектральний аналіз дає змогу визначати енергетичний вклад кожної частоти, що є важливим для оцінки ступеня впливу дефекту на загальний технічний стан системи.

Аналіз спектральної відповіді сигналу дозволяє точно визначити частоти, на яких можуть виникати резонансні явища, що вказують на можливі дефекти або відхилення в роботі системи. Резонанси є важливими індикаторами проблем, таких як пошкодження підшипників, зношення зубців шестерень або структурні деформації. Крім того, виявлення резонансних частот дозволяє передбачати потенційні зони підвищеного навантаження, які можуть спричинити прискорене зношення або вихід з ладу компонентів трансмісії.

Визначення спектральної потужності сигналу є необхідним аспектом аналізу вібраційних і акустичних даних, що дозволяє отримати кількісні показники енергетичного стану системи. Цей аналіз дає змогу виявляти аномалії, пов'язані з підвищеною активністю на певних частотах, які можуть сигналізувати про дефекти, такі як зношення компонентів, надмірне тертя або мікротріщини. Крім того, енергетичні характеристики дозволяють оцінити рівень загального навантаження на систему, забезпечуючи основу для прогнозування її подальшого стану.

Також може використовуватись Wavelet Transform (Вейвлет-перетворення), яке є одним із найпотужніших методів аналізу сигналів у часово-частотній області, що забезпечує детальну локалізацію подій у часі та спектрі. Основними перевагами цього методу є його здатність адаптивно аналізувати сигнали із складною структурою, що робить його незамінним для діагностики перехідних процесів і виявлення короткочасних аномалій.

Завдяки використанню вейвлетів можна визначити момент часу, коли виникають аномалії у сигналі, що є особливо важливим для аналізу перехідних процесів.

Він також дозволяє одночасно аналізувати низькочастотні та високочастотні компоненти сигналу, що забезпечує комплексне розуміння його структури. А завдяки здатності до виділення короткочасних сигналів, метод ефективний для виявлення імпульсів, що можуть бути ознаками тріщин, ударів або інших дефектів.

Для досягнення максимальної точності та ефективності аналізу сигналів у діагностиці автомобільних трансмісій доцільно використовувати інтеграцію FFT і Wavelet Transform. Цей комбінований підхід надає змогу отримати всебічне розуміння стану системи, завдяки одночасному аналізу частотних характеристик та часової локалізації подій.

Інтеграція FFT для формування загальної спектральної картини та Wavelet Transform для високоточної часово-частотної локалізації дозволяє досягти всебічного розуміння технічного стану системи. Цей підхід дає змогу не лише ідентифікувати основні частотні компоненти, але й визначити часові аспекти появи аномалій, що особливо важливо для аналізу перехідних процесів і прогнозування потенційних несправностей.

Інтеграція методів дозволяє також мінімізувати вплив шумів і виділити ключові параметри сигналів для подальшого аналізу. Крім того поєднання методів забезпечує високу гнучкість і адаптацію до змінних умов роботи трансмісій.

При моделюванні перехідних процесів створюються цифрові моделі динаміки трансмісій із врахуванням нелінійних факторів.

Це особливо важливо, оскільки перехідні процеси мають вирішальне значення для комплексної оцінки динамічного стану трансмісій, так як саме в цих умовах виявляються найважливіші характеристики їхньої роботи. Під час різких змін режимів, таких як запуск двигуна, зупинка чи раптове підвищення навантаження, виникають динамічні ефекти, які здатні виявити приховані дефекти та аномалії. Ці явища, що зазвичай залишаються непомітними у стабільних режимах роботи, включають нерівномірне тертя, мікротріщини та інші початкові стадії пошкоджень, що впливають на довговічність та ефективність трансмісії.

Моделювання динаміки трансмісій передбачає створення цифрових моделей, які максимально точно імітують їхню реальну роботу. Ці моделі враховують широкий спектр фізичних та механічних параметрів, включаючи нелінійні фактори, які суттєво впливають на поведінку системи під час перехідних процесів. Основна мета такого моделювання - отримати детальне розуміння динамічних взаємодій між компонентами трансмісії для виявлення потенційних несправностей на ранніх стадіях та оптимізації її експлуатаційних характеристик, таких як нелінійних характеристик компонентів

(врахування тертя в підшипниках та зубчастих зчепленнях, нелінійної жорсткості матеріалів, які використовуються в компонентах трансмісії та динамічного розподілу навантаження в різних частинах системи).

Крім того цифрові моделі дозволяють імітувати взаємодію механічних компонентів з електронними системами управління, такими як системи автоматичного перемикавання передач або контролю стабільності. Моделі враховують вплив зовнішніх факторів, таких як температура, вологість, вібрації та нерівності дорожнього покриття, що значно впливає на динаміку трансмісії.

Використання спеціалізованого програмного забезпечення, такого як MATLAB, Simulink, або ANSYS, забезпечує можливість створення складних багаторівневих моделей, які враховують динамічну взаємодію компонентів трансмісії. Завдяки високій обчислювальній потужності цих платформ можна моделювати як лінійні, так і нелінійні фактори, включаючи вплив тертя, жорсткості матеріалів, теплові ефекти та інші змінні. Це дозволяє проводити симуляції у різних сценаріях експлуатації, що є особливо важливим для точного аналізу та прогнозування поведінки системи у реальних умовах.

Метод кінцевих елементів (FEM) є одним із найточніших і найбільш адаптивних інструментів для моделювання складних фізичних процесів у трансмісіях. Цей метод дозволяє враховувати складну геометрію компонентів, їхні матеріальні властивості, контактні взаємодії, а також вплив нелінійних чинників, таких як тертя, пластична деформація або температурні коливання. FEM забезпечує можливість проведення високоточних симуляцій перехідних процесів, дозволяючи передбачати критичні зони навантаження, локалізувати потенційні дефекти та аналізувати їхній вплив на загальну динаміку системи. Використання FEM є особливо цінним для оптимізації конструкції та підвищення надійності трансмісії.

Використання алгоритмів машинного навчання для аналізу перехідних процесів дозволяє створювати високоточні адаптивні моделі, які автоматично оновлюються на основі отриманих експлуатаційних даних. Завдяки методам кластеризації, регресії та нейронних мереж моделі здатні враховувати нелінійні взаємодії компонентів трансмісії та зовнішніх факторів, таких як температурні коливання або динамічні навантаження. Ці моделі забезпечують можливість прогнозування майбутніх станів системи, аналізу трендів у поведінці компонентів і виявлення прихованих аномалій, які можуть свідчити про початкові стадії розвитку дефектів.

З метою визначення відхилень у перехідних процесах здійснюється ідентифікація ключових параметрів (аналіз таких параметрів, як швидкість обертання, амплітуда вібрацій, спектральний склад сигналів, дозволяє визначати аномалії, які можуть бути ознаками дефектів, таких як нерівномірне навантаження чи знос компонентів) та прогнозування потенційних несправностей (цифрові моделі, інтегровані з алгоритмами штучного інтелекту, дозволяють прогнозувати розвиток несправностей, використовуючи історичні дані перехідних процесів). Найефективнішими алгоритмами є:

- нейронні мережі, що використовуються для розпізнавання складних відхилень та аномалій у великих обсягах даних, включаючи багатовимірні часові ряди;
- методи кластеризації, що забезпечують сегментацію даних на основі схожості їхніх характеристик, що допомагає виявляти групи аномальних значень;
- регресійні моделі, що дозволяють прогнозувати тренди та оцінювати ймовірність розвитку дефектів у майбутньому.

Інтеграція цих алгоритмів із цифровими моделями забезпечує можливість автоматичного оновлення прогнозів у режимі реального часу, враховуючи динамічні зміни в експлуатаційних умовах. Завдяки поєднанню сучасних методів машинного навчання та обчислювальних моделей можна адаптивно реагувати на зміни параметрів

роботи системи, ідентифікуючи критичні зони ризику до моменту виникнення несправностей. Це дозволяє підвищити ефективність експлуатації трансмісії, оптимізувати технічне обслуговування та значно зменшити ризик непередбачених відмов, що є особливо важливим для забезпечення надійності транспортних засобів.

Перевагами цифрового моделювання є точність діагностики (враховують широкий спектр факторів, що підвищує точність виявлення дефектів та їхніх причин), адаптивність (моделі можуть адаптуватися до змін у поведінці трансмісії під час експлуатації), економічність (значно скорочуються витрати на фізичні експерименти та випробування, забезпечуючи при цьому високу надійність результатів).

Алгоритми машинного навчання (ML) відкривають нові можливості для діагностики автомобільних трансмісій, забезпечуючи здатність аналізувати великі обсяги багатограних даних, виявляти приховані закономірності та швидко адаптуватися до змінних умов експлуатації. Їхнє впровадження дозволяє не лише підвищити точність і швидкість ідентифікації дефектів, але й створити прогнозні моделі, що враховують нелінійні динамічні процеси та складні взаємозв'язки між різними компонентами системи. Такі алгоритми здатні виявляти ранні ознаки деградації, моделювати поведінку системи в майбутньому та підтримувати оптимальні графіки технічного обслуговування.

Основні етапи застосування машинного навчання включають наступні етапи.

1. Збір даних (отримуються: з високоточних сенсорних систем, таких як вібраційні, акустичні або температурні датчики, залучаються історичні дані про роботу трансмісії, включаючи інформацію про попередні несправності та умови експлуатації, а також використовуються великі обсяги даних (Big Data), що забезпечує можливість створення більш точних моделей).

2. Попередня обробка даних (видалення шумів за допомогою методів фільтрації, таких як медіанний фільтр або Wavelet Transform, нормалізація даних для приведення параметрів до однакового масштабу та виділення ключових характеристик сигналів за допомогою FFT або Wavelet Transform).

3. Розробка моделей, яка включає класифікацію, регресію та кластеризацію.

Класифікація використовується для ідентифікації типу дефекту або його відсутності. Найпоширеніші алгоритми є дерева рішень, SVM (машини опорних векторів) та ансамблеві методи (Random Forest, Gradient Boosting).

Регресія забезпечує кількісну оцінку рівня зносу ключових компонентів трансмісії, враховуючи динамічні експлуатаційні умови, та прогнозує тривалість їхнього залишкового ресурсу з використанням математичних моделей, побудованих на основі аналізу часових рядів і багатфакторних залежностей.

Алгоритми - лінійна регресія для побудови простих моделей із високою інтерпретованістю, нейронні мережі для обробки складних нелінійних взаємозв'язків у великих наборах даних, а також методи байесової регресії, які забезпечують інтеграцію апіорної інформації та врахування невизначеностей у прогнозах.

Кластеризація дозволяє автоматично виявляти групи аномальних даних без попереднього маркування, шляхом аналізу схожості між параметрами у багатовимірному просторі. Це дозволяє сегментувати великі обсяги даних на кластери, що вказують на можливі відхилення від нормального функціонування, без необхідності попередньої ручної анотації чи маркування даних.

Алгоритми - k-means, який базується на мінімізації відстаней між точками в кластері та їхнім центром, забезпечуючи просту і швидку сегментацію, і DBSCAN, який виділяє кластери на основі щільності даних, дозволяючи ефективно працювати з нерівномірно розподіленими даними та виявляти аномалії.

Під час навчання використовуються дані, поділені на навчальну та тестову вибірки. Застосовуються методи перехресної валідації для підвищення узагальнювальної здатності моделей. Оптимізація виконується за допомогою алгоритмів, таких як Grid Search або Bayesian Optimization, для налаштування гіперпараметрів.

Оцінка продуктивності здійснюється: основні метрики - точність (accuracy) — частка правильно класифікованих об'єктів у загальній кількості; повнота (recall) — здатність моделі виявляти всі релевантні випадки дефектів; F1-міра — гармонійне середнє між точністю та повнотою, що забезпечує збалансовану оцінку; середньоквадратична помилка (RMSE) — середнє значення квадратів відхилень прогнозованих значень від реальних, що дозволяє оцінити точність регресійних моделей.

Валідація моделей проводиться з використанням ретельно підібраних тестових даних, що відображають реальні експлуатаційні умови. Це дозволяє оцінити здатність моделей до узагальнення, точність їхньої роботи на нових даних, а також виявити можливі недоліки або області для покращення. Додатково застосовуються сценарії стрес-тестування для оцінки стабільності моделей у випадках екстремальних змін параметрів.

Переваги алгоритмів машинного навчання є швидкість і точність, адаптивність, прогнозування та виявлення прихованих залежностей.

Алгоритми машинного навчання відкривають нові горизонти в діагностиці та прогнозуванні технічного стану автомобільних трансмісій. Їхнє впровадження дозволяє не лише підвищити точність діагностики, але й забезпечити своєчасного виявлення потенційних несправностей шляхом обробки великих обсягів даних у реальному часі. Крім того, ці алгоритми сприяють оптимізації технічного обслуговування через створення адаптивних моделей, які враховують нелінійні процеси та складні взаємозв'язки між параметрами. Подальші дослідження мають зосередитися на розвитку більш ефективних методів навчання моделей, інтеграції їх у складні багаторівневі діагностичні системи та забезпеченні їхньої пояснюваності для покращення прийняття рішень.

Для ефективного вирішення багатокomпонентного завдання прогнозування технічного стану автомобільних трансмісій необхідне застосування інтегрованого підходу. Він поєднує сучасні методи аналізу даних, алгоритми машинного навчання та чисельне моделювання перехідних процесів. Тому необхідна науково обґрунтована методологія, яка враховує складну взаємодію механічних, термодинамічних і електронних процесів у трансмісіях, різноманітність експлуатаційних умов та вплив зовнішніх факторів, таких як вібрації, температурні зміни та механічні навантаження.

Основними етапами розробки методології є аналіз об'єкта дослідження, розробка моделі збору та обробки даних, математичне моделювання та інтеграція методів штучного інтелекту, валідація методології.

Визначення основних компонентів трансмісії, які підлягають аналізу, включає ідентифікацію ключових елементів, таких як підшипники, зубчасті передачі, вали, муфти та інші механічні складові. Особливу увагу приділяють компонентам, які зазнають високих механічних навантажень, є критично важливими для передачі крутного моменту та найчастіше піддаються зносу або пошкодженням. Детальний аналіз кожного елемента включає оцінку їхньої геометрії, матеріальних властивостей та характеру взаємодії в умовах експлуатації. Дослідження характеру експлуатаційних навантажень охоплює аналіз змінних моментів, що виникають під час роботи трансмісії, і вивчення впливу циклічних та динамічних навантажень на компоненти. Особливу увагу приділяють дослідженню вібрацій, які можуть свідчити про

нерівномірність у роботі зубчастих передач, тертя в підшипниках та інших механізмах. Температурні впливи вивчаються з урахуванням змін у матеріальних властивостях компонентів та їх впливу на загальну стабільність і довговічність системи.

Ідентифікація типових дефектів, таких як знос, тріщини та розбалансування, здійснюється шляхом аналізу вібраційних, акустичних і температурних характеристик компонентів трансмісії. Знос може проявлятися у вигляді збільшення амплітуди вібрацій або аномалій у спектральному складі сигналів. Тріщини зазвичай супроводжуються специфічними високочастотними імпульсами, що виявляються за допомогою акустичної емісії або вейвлет-аналізу. Розбалансування викликає періодичні зміни у вібраційних сигналах із характерними гармоніками, які дозволяють точно визначити джерело проблеми. Аналіз цих дефектів забезпечує глибоке розуміння їхнього впливу на функціональність трансмісії, включаючи зниження ефективності передачі крутного моменту та підвищення ризику аварійного виходу з ладу.

Визначення параметрів, які слід вимірювати для діагностики, охоплює комплексний підхід до вибору ключових фізичних величин, що відображають стан трансмісії. До таких параметрів належать: вібраційні сигнали для виявлення механічних аномалій і нерівномірностей у роботі компонентів; акустичні сигнали, що дозволяють аналізувати звукозворотні процеси й локалізувати дефекти, такі як тріщини чи зношення; температурні сигнали, які інформують про нагрівання через підвищене тертя чи некоректне змащування. Інтеграція цих параметрів у систему діагностики забезпечує всебічну оцінку стану трансмісії в реальних умовах експлуатації.

Використання високоточних сенсорів для збору даних у реальних експлуатаційних умовах включає застосування сучасних технологій вимірювання, які забезпечують точність і стабільність отримуваних даних. Сенсори повинні бути адаптовані до складних умов експлуатації, таких як коливання температур, механічні вібрації, вологість і забруднення. Особлива увага приділяється сенсорам вібрації, що дозволяють відстежувати механічні аномалії, акустичним сенсорам, які ідентифікують звукові дефекти, та температурним датчикам, що забезпечують моніторинг теплового стану компонентів трансмісії. Дані, зібрані такими сенсорами, слугують основою для аналітичних і прогнозних моделей, підвищуючи точність діагностики та ефективність прогнозування технічного стану систем.

Розробка математичних моделей, що описують динаміку трансмісії в умовах змінних навантажень, включає створення багаторівневих моделей, які враховують нелінійні взаємодії компонентів, вплив тертя, коливання температури та динамічні ефекти, пов'язані зі змінами режимів роботи. Такі моделі використовують методи кінцевих елементів (FEM), чисельне інтегрування диференціальних рівнянь та алгоритми оптимізації для забезпечення високої точності опису динаміки системи в різних експлуатаційних сценаріях.

Інтеграція алгоритмів машинного навчання для аналізу та класифікації стану компонентів передбачає використання передових підходів, таких як нейронні мережі, дерева рішень, методи опорних векторів (SVM) і ансамблеві методи, зокрема Random Forest та Gradient Boosting. Ці алгоритми здатні ідентифікувати складні залежності в даних, розпізнавати патерни, характерні для певних дефектів, та класифікувати стан компонентів із високою точністю. Додатково вони забезпечують автоматичне навчання на нових даних, підвищуючи адаптивність та ефективність діагностики навіть у змінних експлуатаційних умовах.

Використання методів глибокого навчання для побудови прогнозних моделей включає застосування нейронних мереж різної архітектури, таких як багатошарові перцептрони (MLP), згорткові нейронні мережі (CNN) та рекурентні нейронні мережі (RNN). Ці методи дозволяють враховувати нелінійні залежності між параметрами,

ідентифікувати приховані патерни в багатовимірних даних та прогнозувати майбутній стан системи з високою точністю. Глибокі нейронні мережі здатні адаптуватися до динамічних змін умов експлуатації, що забезпечує надійне та своєчасне виявлення потенційних несправностей.

При влідації передбачається проведення серії експериментів для перевірки точності математичних моделей та алгоритмів аналізу даних, порівняння результатів прогнозування із реальними даними про технічний стан трансмісії та оптимізація моделей на основі отриманих результатів для підвищення їхньої точності та стабільності.

Обговорення

Головними елементами методології є системний підхід, адаптивність, інтеграція даних та прогнозування. Це забезпечує комплексний аналіз і дозволяє виявляти неочевидні залежності.

Перспективами впровадження методології є: зниження експлуатаційних витрат, підвищення надійності транспортних засобів, інтеграція з автоматизованими системами управління.

Оптимізація графіків технічного обслуговування на основі точних прогнозів дозволяє зменшити кількість незапланованих ремонтів, мінімізуючи час простою транспортного засобу. Завдяки впровадженню адаптивних моделей прогнозування стає можливим своєчасне виявлення потенційних несправностей, що дозволяє уникнути надмірних витрат на термінові ремонти та забезпечити раціональне використання ресурсів для обслуговування. Це сприяє підвищенню економічної ефективності експлуатації автомобілів у довгостроковій перспективі.

Крім того своєчасне виявлення дефектів відіграє вирішальну роль у зниженні ризику аварійних ситуацій, що дозволяє забезпечити стабільність роботи транспортних засобів у різноманітних експлуатаційних умовах. Використання методів інтегрованого аналізу даних та прогнозування дає змогу ідентифікувати навіть приховані несправності на ранніх стадіях їх розвитку. Це сприяє підвищенню загального рівня безпеки експлуатації та збільшенню довговічності транспортних засобів.

В цілому розроблена методологія передбачає використання у складі автоматизованих систем моніторингу технічного стану, що дозволяє здійснювати безперервний збір і аналіз даних у реальному часі. Інтеграція з такими системами дає змогу оперативно діагностувати стан компонентів трансмісії, прогнозувати можливі несправності та автоматизувати прийняття рішень щодо технічного обслуговування. Це значно підвищує ефективність моніторингу, зменшує ризик людських помилок та забезпечує своєчасне реагування на критичні ситуації.

Висновки

1. Розробка та впровадження інтегрованої методології прогнозування технічного стану автомобільних трансмісій має суттєве значення для підвищення надійності, ефективності та безпеки транспортних засобів. В рамках дослідження виконано комплексний аналіз основних аспектів діагностики трансмісій, зокрема, застосування сучасних методів обробки сигналів, машинного навчання та математичного моделювання. На основі отриманих результатів можна зробити наступні висновки.

2. Запропонована методологія передбачає використання багатоджерельного аналізу, який інтегрує вібраційні, акустичні та температурні сигнали для отримання цілісної картини технічного стану трансмісії. Такий підхід дозволяє виявляти приховані

дефекти та аномалії, враховуючи взаємозалежності між різними типами сигналів. Завдяки цьому забезпечується точна діагностика в умовах експлуатації, де компоненти системи піддаються змінним механічним, термодинамічним і зовнішнім впливам.

3. Використання передових алгоритмів машинного навчання, зокрема нейронних мереж, методів опорних векторів (SVM) і ансамблевих підходів, таких як Random Forest та Gradient Boosting, дозволило значно підвищити точність, швидкість та надійність ідентифікації дефектів трансмісії. Нейронні мережі продемонстрували особливу ефективність у моделюванні складних нелінійних взаємозв'язків, властивих технічному стану компонентів, а також у прогнозуванні залишкового ресурсу. Додатково, впровадження методів кластеризації, таких як k-means та DBSCAN, дало змогу автоматично сегментувати дані, ідентифікувати аномалії без попереднього маркування та адаптуватися до змінних умов експлуатації.

4. Розроблені математичні моделі, що враховують динаміку роботи трансмісії в умовах змінних навантажень, базуються на використанні методів кінцевих елементів (FEM), чисельного розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь та багатофакторного аналізу. Ці моделі забезпечують точне моделювання перехідних процесів, зокрема врахування впливу температурних коливань, тертя, вібрацій і деформацій компонентів. Такий підхід дозволяє не лише аналізувати складні нелінійні взаємозв'язки між компонентами, але й прогнозувати їхню поведінку у критичних експлуатаційних умовах, що підвищує точність діагностики та ефективність технічного обслуговування.

5. Застосування запропонованої методології дозволило досягти значного підвищення точності діагностики, особливо на ранніх стадіях розвитку несправностей. Це забезпечило можливість виявлення навіть прихованих дефектів до моменту їхнього критичного впливу на систему, що знизило кількість аварійних ситуацій та позапланових ремонтів. Оптимізація графіків технічного обслуговування стала можливою завдяки впровадженню адаптивних моделей прогнозування, що враховують змінні умови експлуатації. Такий підхід сприяв не лише підвищенню загальної ефективності роботи транспортних засобів, але й значному зменшенню експлуатаційних витрат та підвищенню рівня безпеки.

6. Методологія довела свою високу ефективність при інтеграції в автоматизовані системи моніторингу технічного стану. Завдяки безперервному збору, обробці та аналізу даних у реальному часі такі системи забезпечують повний контроль за станом трансмісії, що дозволяє оперативно реагувати на будь-які аномалії чи відхилення від норми. Це не лише мінімізує ризик людського фактора, але й забезпечує зменшення часу простою транспортного засобу, підвищення надійності експлуатації та точності технічного обслуговування.

7. Для подальшого вдосконалення методології необхідно зосередити увагу на кількох ключових напрямках. По-перше, адаптація моделей до нових типів транспортних засобів, включаючи електромобілі та гібридні системи, вимагає врахування їх специфічних конструктивних і експлуатаційних характеристик. По-друге, розширення обсягів даних для навчання дозволить підвищити узагальнювальну здатність моделей і врахувати більше сценаріїв використання трансмісії у реальних умовах. По-третє, інтеграція методів пояснювальної аналітики (Explainable AI) є важливим аспектом для підвищення інтерпретованості прогнозів, що сприятиме більшій довірі до моделей з боку кінцевих користувачів та кращому розумінню причин виявлення аномалій.

8. Результати дослідження підтверджують високу ефективність запропонованої методології для практичного застосування у сфері технічного обслуговування транспортних засобів. Вона забезпечує інтеграцію сучасних методів діагностики, таких

як машинне навчання, багатоджерельний аналіз сигналів та математичне моделювання, що значно підвищує точність і надійність виявлення дефектів. Крім того, методологія сприяє оптимізації витрат на технічне обслуговування за рахунок своєчасного прогнозування несправностей, зменшення аварійних ситуацій та забезпечення більшого рівня безпеки транспортних засобів, що відповідає ключовим вимогам сучасної автомобільної індустрії.

Список використаних джерел

1. Smith J., Johnson P. Vibration Analysis Techniques for Mechanical Fault Detection. Mechanical Systems Journal, 2019.
2. Lee K., Park D. Application of Deep Learning in Fault Prediction for Automotive Transmissions. AI in Engineering, 2020.
3. Chen H., Zhou Q. Numerical Modeling of Dynamic Behavior in Transmission Systems Using FEM. Advanced Mechanics, 2021.
4. Brown T., White S. Adaptive Diagnostics in Variable Operational Environments. Transportation Science, 2022.
5. Miller R., Green L. Acoustic Characteristics in Transmission Fault Detection. Journal of Sound and Vibration, 2018.
6. Davis M., Clark R. Multi-Dimensional Signal Processing for Mechanical Systems. Mechanical Review, 2019.
7. Wang T., Li Y. Advances in Vibration-Based Fault Detection. Engineering Vibration, 2020.
8. Patel V., Singh R. AI-Driven Diagnostics for Vehicle Systems. AI Applications in Mechanics, 2021.
9. Zhao L., Wang Z. FEM-Based Acoustic Modeling in Transmission Systems. Journal of Acoustics and Dynamics, 2018.
10. Kim H., Choi J. Predictive Maintenance Strategies Using Machine Learning. Maintenance Science, 2020.
11. Taylor P., Morgan D. Stochastic Models for Dynamic System Diagnostics. System Modeling Journal, 2021.
12. Zhang X., Chen L. Integration of AI and Numerical Modeling for System Reliability. AI Mechanics Journal, 2022.
13. Novak J., Brown G. Wavelet Transform Techniques for Condition Monitoring. Signal Analysis Journal, 2019.
14. Kaur S., Sharma T. Real-Time Monitoring of Automotive Transmissions. Journal of Transportation Engineering, 2021.
15. Wilson A., Thomas H. Efficiency Optimization through Diagnostics. Automotive Systems Journal, 2020.
16. Lee K., Park D. Application of Deep Learning in Fault Prediction for Automotive Transmissions. AI in Engineering, 2020.
17. Chen H., Zhou Q. Numerical Modeling of Dynamic Behavior in Transmission Systems Using FEM. Advanced Mechanics, 2021.
18. Brown T., White S. Adaptive Diagnostics in Variable Operational Environments. Transportation Science, 2022.

References

1. Smith J., Johnson P. Vibration Analysis Techniques for Mechanical Fault Detection. Mechanical Systems Journal, 2019.

2. Lee K., Park D. Application of Deep Learning in Fault Prediction for Automotive Transmissions. *AI in Engineering*, 2020.
3. Chen H., Zhou Q. Numerical Modeling of Dynamic Behavior in Transmission Systems Using FEM. *Advanced Mechanics*, 2021.
4. Brown T., White S. Adaptive Diagnostics in Variable Operational Environments. *Transportation Science*, 2022.
5. Miller R., Green L. Acoustic Characteristics in Transmission Fault Detection. *Journal of Sound and Vibration*, 2018.
6. Davis M., Clark R. Multi-Dimensional Signal Processing for Mechanical Systems. *Mechanical Review*, 2019.
7. Wang T., Li Y. Advances in Vibration-Based Fault Detection. *Engineering Vibration*, 2020.
8. Patel V., Singh R. AI-Driven Diagnostics for Vehicle Systems. *AI Applications in Mechanics*, 2021.
9. Zhao L., Wang Z. FEM-Based Acoustic Modeling in Transmission Systems. *Journal of Acoustics and Dynamics*, 2018.
10. Kim H., Choi J. Predictive Maintenance Strategies Using Machine Learning. *Maintenance Science*, 2020.
11. Taylor P., Morgan D. Stochastic Models for Dynamic System Diagnostics. *System Modeling Journal*, 2021.
12. Zhang X., Chen L. Integration of AI and Numerical Modeling for System Reliability. *AI Mechanics Journal*, 2022.
13. Novak J., Brown G. Wavelet Transform Techniques for Condition Monitoring. *Signal Analysis Journal*, 2019.
14. Kaur S., Sharma T. Real-Time Monitoring of Automotive Transmissions. *Journal of Transportation Engineering*, 2021.
15. Wilson A., Thomas H. Efficiency Optimization through Diagnostics. *Automotive Systems Journal*, 2020.
16. Lee K., Park D. Application of Deep Learning in Fault Prediction for Automotive Transmissions. *AI in Engineering*, 2020.
17. Chen H., Zhou Q. Numerical Modeling of Dynamic Behavior in Transmission Systems Using FEM. *Advanced Mechanics*, 2021.
18. Brown T., White S. Adaptive Diagnostics in Variable Operational Environments. *Transportation Science*, 2022.

**Козаченко О. В.,
Волковський О. М.**
Державний
біотехнологічний
університет,
м. Харків, Україна
E-mail:
o.v.kozachenko21@gmail.com

**РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ
ДОСЛІДЖЕНЬ ПРУЖНОГО СТОЯКА
ДИСКАТОРА З РЕГУЛЯТОРОМ
ЖОРСТКОСТІ**

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-26-163-176>

УДК 631.313.022.2

Козаченко О.В., Волковський О.М. Результати експериментальних досліджень пружного стояка дискатора з регулятором жорсткості.

Анотація. Наведено результати експериментальних випробувань пружного стояка з регулятором жорсткості в лабораторних умовах. За результатами виконаних експериментальних досліджень отримано динаміки тягового зусилля рами P_1 , тягових зусиль верхньої і крайньої точок пружного стояка дискового робочого органу P_2 і P_3 , а також кутів орієнтації трьохосового акселерометра α , β , γ для кожного досліді згідно плану Бокса-Бенкіна трьох факторів (кут клиноподібної вставки пружного стояка дискового робочого органу θ , глибина входження дискового робочого органу в ґрунт h і швидкість руху v) на трьох рівнях варіації. За результатами обробки одержаних при випробуваннях пружного стояка з регулятором жорсткості експериментальних даних з використанням програми Wolfram Cloud отримано залежності у вигляді рівнянь регресії другого порядку середнього значення тягового зусилля рами P_1 , його середньоквадратичного відхилення σ_1 , частоти коливань робочого органу ω , середнього значення зусилля у верхній (P_2) і крайньої (P_3) точок пружного стояка дискового робочого органу від кута клиноподібної вставки стояка дискового робочого органу θ , глибини входження дискового робочого органу в ґрунт h і швидкості руху v . Проведенням оптимізації одержаного рівняння для частоти коливань дискового робочого органу за умови мінімізації тягового зусилля рами отримано значення факторів досліджень: $\theta = 1,81^\circ$, $h = 0,06$ м, $v = 1$ м/с. При цьому мінімальна частота коливань дискового робочого органу $\omega_{\min} = 51,6$ Гц.

Ключові слова: дискатор, обробіток ґрунту, опір ґрунту, сферичний диск, пружний стояк, регулятор жорсткості, кут атаки диска, частота коливань диска.

Kozachenko O.V., Volkovsky O.M. Results of experimental studies of elastic riser of discator with stiffness regulator.

Abstract. The results of experimental tests of an elastic riser with a stiffness regulator in laboratory conditions are presented. According to the results of the performed experimental studies, the dynamics of the traction force of the frame P_1 , the traction forces of the upper and extreme points of the elastic riser of the disk working body P_2 and P_3 , as well as the orientation angles of the three-axis accelerometer α , β , γ for each experiment according to the Box-Benkin plan of three factors (the angle of the wedge-shaped insert of the elastic riser of the disk working body θ , the depth of entry of the disk working body into the soil h and the speed of movement v) at three levels of variation were obtained. According to the results of processing the experimental data obtained during the tests of the elastic riser

with a stiffness regulator using the Wolfram Cloud program, the dependences in the form of second-order regression equations of the average value of the frame traction force P_1 , its root-mean-square deviation σ_1 , the frequency of oscillations of the working body ω , the average value of the force at the upper (P2) and extreme (P3) points of the elastic riser of the disk working body from the angle of the wedge-shaped insertion of the riser of the disk working body, the depth of entry of the disk working body into the soil h and the speed of movement v . By optimizing the obtained equation for the frequency of oscillations of the disk working body under the condition of minimizing the frame traction force, the values of the research factors were obtained: $\theta = 1.81^\circ$, $h = 0.06$ m, $v = 1$ m/s. In this case, the minimum frequency of oscillations of the disk working body $\omega_{min} = 51.6$ Hz.

Key words: disc harrow, soil cultivation, soil resistance, spherical disc, elastic riser, stiffness regulator, disc attack angle, disc oscillation frequency.

Постановка проблеми

Обробіток ґрунту дисковими робочими органами у сучасних технологіях виробництва сільськогосподарських культур передбачає створення сприятливих умов для розвитку кореневої системи рослин при мінімізації витрат енергії на виконання роботи. При цьому вимоги агротехніки до поверхневого обробітку передбачають утворення певного гранулометричного складу ґрунтових агрегатів при роботі дискових знарядь із дотриманням заданої глибини обробітку ґрунту [1, 2].

Вирішенню означеної проблеми в значній мірі сприяло використання індивідуального кріплення дискових робочих органів на пружних стояках до рами ґрунтообробних знарядь. Це дозволило змінити характер силової взаємодії сферичного диска з ґрунтовим середовищем за рахунок його коливного руху, підвищити показники якості і знизити енергоємність процесу [3, 4, 5].

Незважаючи на широке розповсюдження у сучасних технологіях поверхневого обробітку ґрунту дискових знарядь з робочими органами на пружній підвісці, невирішеним питанням залишається нерівномірність обробітку ґрунту по глибині кожним сферичним диском, що залежить від жорсткості пружного стояка і опору ґрунту щодо заданих умов роботи, який змінюється, навіть в межах одного поля, в досить широких межах [6].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Дослідженню дискових робочих органів ґрунтообробних знарядь, встановлених на пружних стояках присвячена значна кількість наукових праць [7, 8, 9]. Основним їх спрямуванням є зменшення тягового опору в певних умовах ґрунту, рівномірності глибини обробітку при визначених швидкостях та забезпечення якісних показників роботи знарядь і відсутності забивання робочих органів налиплим ґрунтом і рослинними рештками.

У роботі І.А. Шевченка [7] запропоновані механіко-математичні моделі щодо взаємодії пружного робочого органу з ґрунтом та алгоритм побудови амплітудно-частотної характеристики пружного стояка при припустимому відхиленні від встановленої глибини обробітку ґрунту та умові збереження його коливальних властивостей. Дослідження автора стосуються S-подібних пружних стояків, що визначає обмеженість їх практичного використання.

Залежності для визначення відхилень пружних стояків дискових робочих органів різних конфігурацій із використанням методу Мора отримані О.І. Гапоненком в [8]. В якості визначального конструктивного параметра обрано коефіцієнт жорсткості

пружного стояка знаряддя у вертикальній площині. При цьому одержані автором дані базувалися на розв'язанні плоскої задачі. Це суттєво обмежує використання розроблених математичних моделей.

К.В. Сєдих в роботі [9] обґрунтував форму пружного стояка дискового ґрунтообробного знаряддя у вигляді спіралі Архімеда. Із урахуванням параметрів геометричної форми, автором одержані відповідні вирази для коефіцієнтів жорсткості, довжини і кута відхилення пружного стояка знаряддя. При цьому, як недолік даного дослідження, слід зазначити обмеженість у регулюванні геометричних параметрів пружного стояка під час налаштування для різних типів ґрунтів дискових робочих органів ґрунтообробних знарядь.

Не можна обійти увагою сучасні підходи у вивченні процесів взаємодії дискових робочих органів ґрунтообробних знарядь із ґрунтовим середовищем шляхом застосування чисельного моделювання [10, 11, 12]. Це забезпечує одержання більш точних характеристик із візуалізацією процесів напружено-деформованого стану пружних стояків з дисковими робочими органами.

Для адаптації для різних ґрунтових умов, авторами запропоновано конструкцію дискатора [13] з пружним стояком та регулятором жорсткості, виконано тривимірне моделювання напружено-деформованого стану пружного стояка дискатора з регулятором жорсткості і обґрунтовано діапазони його раціональних конструктивних параметрів [14]. Це зумовлює доцільність проведення експериментальних досліджень пружного стояка дискатора з регулятором жорсткості з метою перевірки правильності, уточнення і доповнення одержаних теоретичних висновків.

Формулювання мети досліджень

Метою проведення експериментальних досліджень є перевірка правильності та доповнення одержаних теоретичних висновків процесу взаємодії дискового робочого органу на пружному стояку з регулятором жорсткості при поверхневому обробці ґрунту.

Результати досліджень

У відповідності з програмою експерименту розроблена загальна методика проведення експериментальних досліджень, що передбачала використання загальновідомих методичних підходів щодо випробування сільськогосподарської техніки [15].

Дослідження дискових робочих органів на пружному стояку та регулятором жорсткості проводили на випробувальному ґрунтовому каналі, схема та загальний вигляд якого представлена на рис. 1. Основну раму 2 експериментальної установки встановлено на напрямні ролики 3 на рейкових напрямних 1. Для встановлення досліджуваних дискових робочих органів на пружному стояку з регулятором жорсткості на основній рамі 2 встановлена начіпна рухома рама 4. Переміщення експериментальної установки здійснювався від приводної станції 9 через трос 9 з можливістю реверсування і зміни швидкості руху. Коробка передач приводної станції дозволяє одержувати потрібну швидкість переміщення лабораторної установки з досліджуваними робочими органами в інтервалі від 0,5 м/с до 2,6 м/с з можливістю реверсування при холостих проходах. Задана глибина ходу дискового робочого органу в ґрунті встановлюється за допомогою регульовального опорного колеса шляхом фіксації в заданому положенні відносно рами. Переведення рухомої рами 4 лабораторної установки з досліджуваними дисковими робочими органами в робоче і

транспортне положення (при реверсуванні) здійснюється застосуванням гідравлічної системи керування 7. Для фіксації тягового опору установки з досліджуваними дисковими робочими органами встановлений тензодатчик 10.

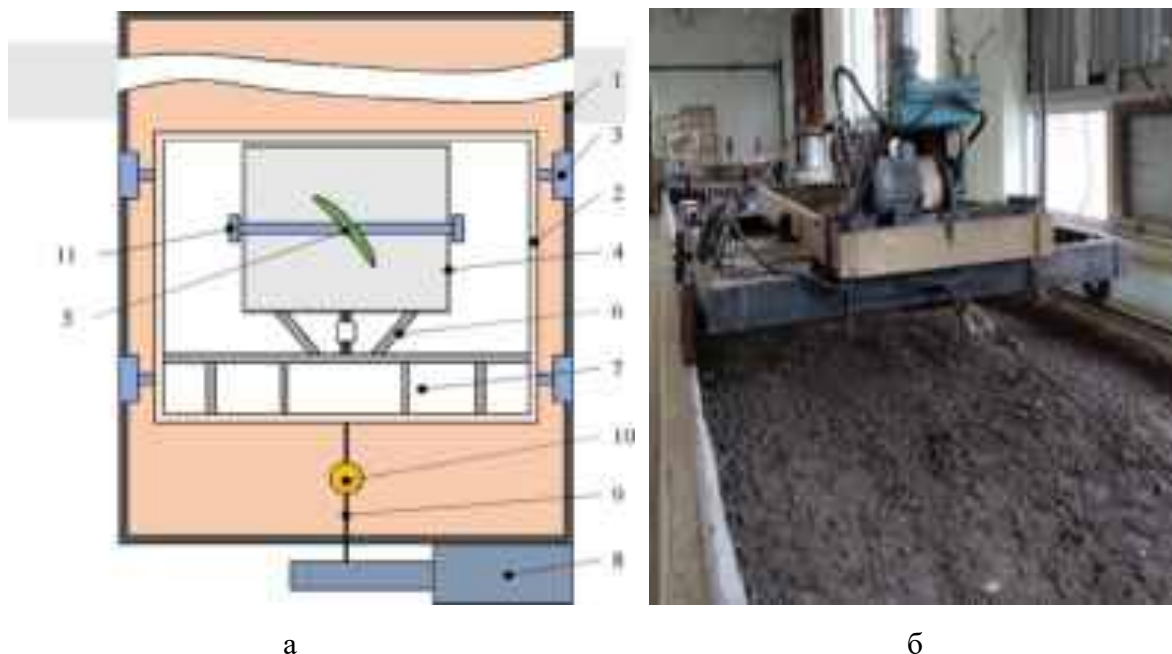


Рис. 1. Схема (а) та загальний вигляд ґрунтового каналу (б) з обладнанням для випробування робочих органів ґрунтообробних машин: 1 – напрямна поверхня; 2 – рама; 3 – ролики; 4 – начіпна рухома рама; 5 – дискові робочі органи; 6 – начіпна система; 7 – гідроначіпна система; 8 – приводна станція; 9 – канат; 10 – тензодатчик; 11 – опорне колесо

Перед проведенням дослідів та протягом проведення випробувань ґрунтообробних робочих органів визначали фізико-механічні властивості ґрунту в ґрунтовому каналі за допомогою вимірювального обладнання.

При проведенні експерименту основними контрольованими конструктивно-режимними параметрами були швидкість руху установки, глибина ходу робочого органу та конструктивні параметри регулятора жорсткості пружного стояка кріплення робочих органів, контролювалась також своєчасність включення вимірювальної і реєструючої апаратури.

За кілька днів до початку проведення експериментів ґрунт зволожували і спускали на глибину 20 см. Перед проведенням чергової серії експериментів її ущільнювали за допомогою водоналивного катку, заміряли твердість і брали вихідні проби на вологість. Вологість ґрунту під час проведення експерименту знаходилась у межах 19–21%.

Розташування датчиків на пружному стояку з регулятором жорсткості наведено на рис. 2. Використано чотири датчики: один датчик тягового зусилля рами (P_1); два тензометричні датчики на стояку (P_2 , P_3); один інерційний вимірювальний пристрій (трьохосового акселерометра).

Експериментальні дослідження в ґрунтовому каналі проводились на різних швидкостях руху v : 1,0 м/с, 1,7 м/с та 2,4 м/с, глибина входження дискового робочого органу в ґрунт мала наступні значення h : 0,06 м, 0,10 м та 0,14 м. При цьому змінювали кут клиноподібної вставки θ : -6° , 0° , 6° .



Рис. 2. Розташування датчиків на випробувальній установці: 1 – датчик тягового зусилля рами (P_1); 2 – тензометричний датчик на стояку (P_2); 3 – тензометричний датчик на стояку (P_3); 4 – інерційний вимірювальний пристрій.

В якості критеріїв обрано: середнє значення сили з датчика тягового зусилля рами P_1 ; середньоквадратичне значення сили з датчика тягового зусилля рами σ_1 ; частота коливань робочого органу ω ; середнє значення сили з датчика зусилля верхньої точки стояка P_2 ; середнє значення сили з датчика зусилля крайньої точки стояка P_3 ;

Для визначення оптимальних умов проведення процесу було застосовано метод математичного планування експерименту. Зокрема, використовувався план Бокса-

Бенкена, який дозволяє ефективно дослідити вплив кількох факторів одночасно при мінімальній кількості експериментів. Планування здійснювалося для трьох незалежних факторів, кожен із яких варіювався на трьох рівнях. Загальна кількість дослідів відповідно до цього плану склала 15. Такий підхід забезпечує можливість побудови адекватної математичної моделі процесу та виявлення оптимальних умов для досягнення максимального виходу та якості продукту.

При проведенні експериментальних досліджень дискових робочих органів на пружному стояку з регулятором жорсткості в лабораторних умовах використано вимірювальну систему (ВС), що розроблена професором Р.В. Антощенковим [16, 17] в Державному біотехнологічному університеті.

В результаті експериментальних досліджень отримані залежності динаміки тягового зусилля рами P_1 , тягових зусиль верхньої і крайньої точок пружного стояка P_2 і P_3 , а також кутів орієнтації трьохосового акселерометра α , β , γ для кожного досліду. Приклад зазначених залежностей наведено на рис. 3–4.

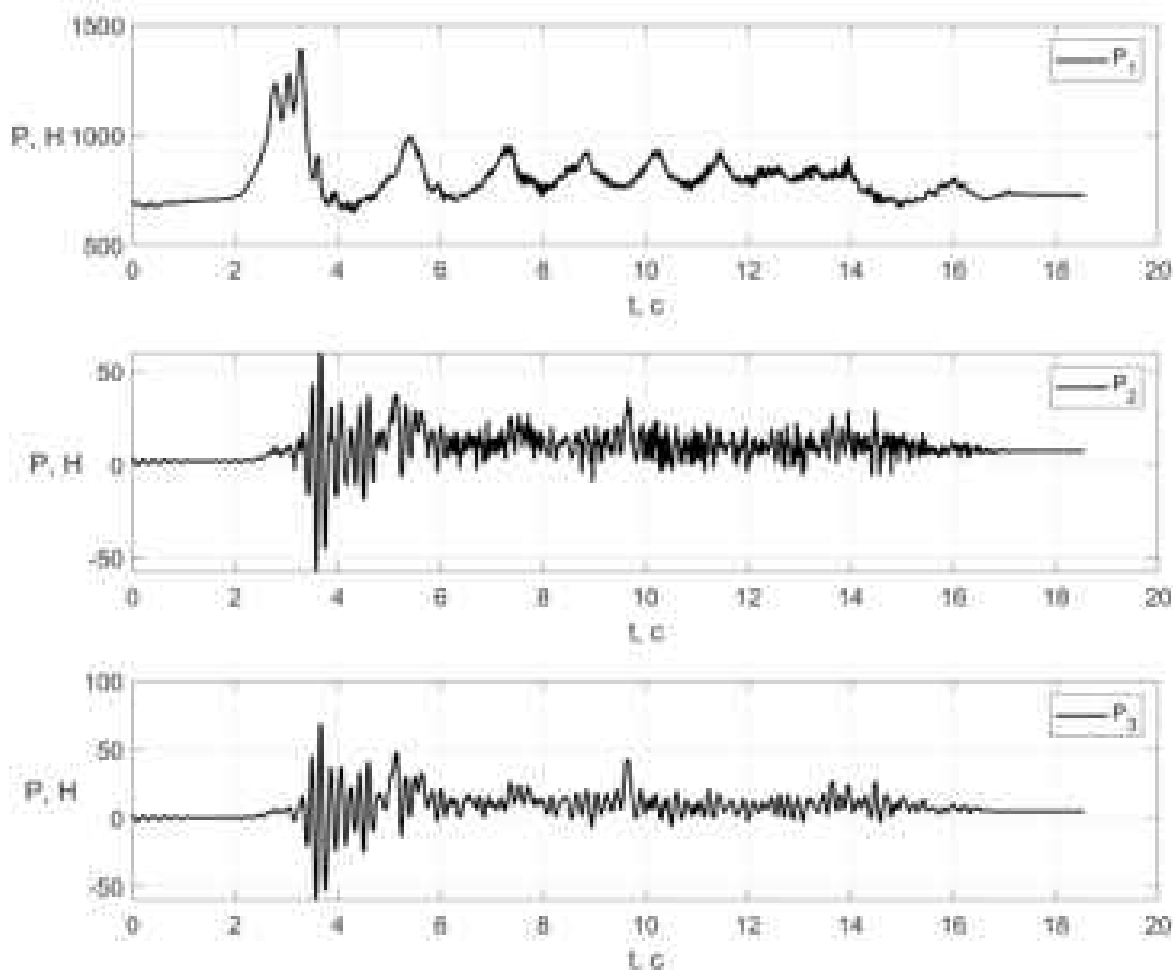


Рис. 3. Залежності динаміки тягових зусиль P_1 , P_2 , P_3 при $v = 1,0$ м/с, $h = 0,06$ м, $\theta = 0^\circ$

З графіків 3–4 видно флуктуацію тягових зусиль, що підтверджує коливання дискового робочого органу на пружному стояку. Провівши розрахунок середніх значень, середньоквадратичних відхилень та частот коливань складено масив узагальнених даних.

Згідно обраної методики у програмі Wolfram Cloud визначено рівняння регресії середнього значення сили з датчика тягового зусилля рами:

$$P_1 = 1179,57 - 250,437 x_1 - 372,646 x_{12} + 170,263 x_2 - 39,875 x_1 x_2 - 63,3958 x_{22} + 160,1 x_3 + 13,95 x_1 x_3 + 17,9 x_2 x_3 - 89,4208 x_{32}, \quad (1)$$

де x_1, x_2, x_3 – закодовані значення факторів: кута клиноподібної вставки стояка дискового робочого органу θ , глибини входження дискового робочого органу в ґрунт h , швидкості руху v відповідно.

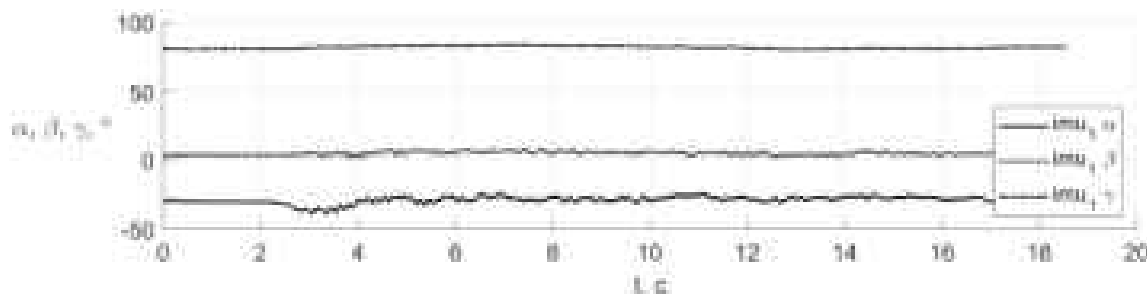


Рис. 4. Залежності кутів орієнтації трьохосового акселерометра α, β, γ при $v = 1,0$ м/с, $h = 0,06$ м, $\theta = 0^\circ$

Провівши відхилення незначущих коефіцієнтів регресії за критерієм Стюдента (t-Statistic) і перетворюючи закодовані у реальні значення факторів отримуємо:

$$P_1 = -558,528 + 12181,0 h - 39622,4 h_2 + 849,185 V - 182,491 V_2 - 41,7396 \theta - 10,3513 \theta_2. \quad (2)$$

Графічна інтерпретація залежності (2) у вигляді поверхонь відгуків наведено на рис. 5.

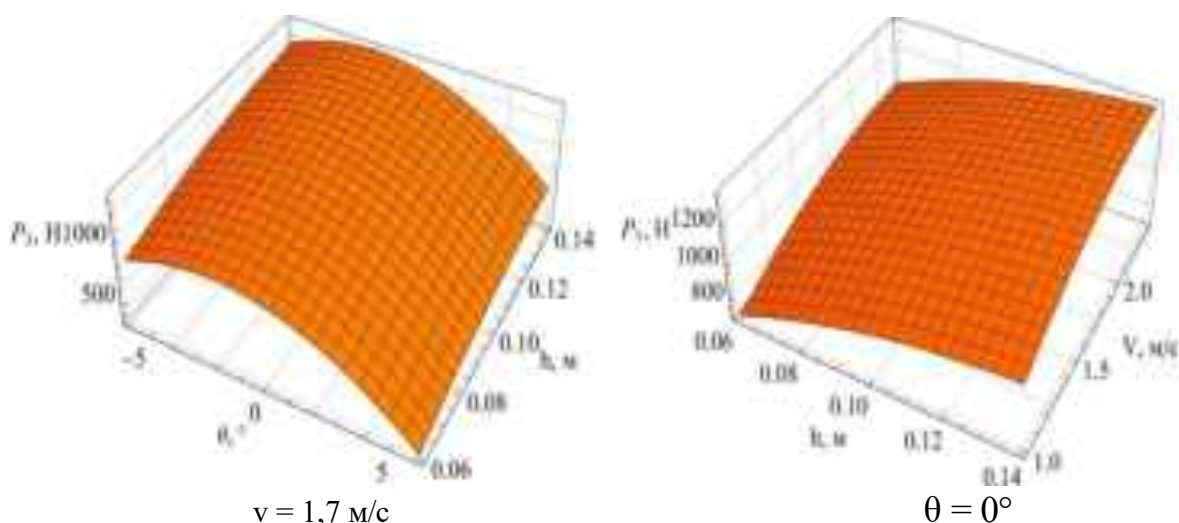


Рис. 5. Залежність середнього значення сили з датчика тягового зусилля рами P_1 від кута клиноподібної вставки стояка дискового робочого органу θ , глибини входження дискового робочого органу в ґрунт h і швидкості руху v

Члени рівняння, що містять змінну h , описують залежність тягового зусилля від глибини входження диска в ґрунт. Спостерігається квадратична залежність: перший член $12181,0 \cdot h$ вказує на лінійне збільшення тягового зусилля з ростом глибини, тоді як другий член $-39622,4 \cdot h_2$ зменшує тягове зусилля при збільшенні глибини. З фізичної точки зору, це може означати, що на в діапазоні глибини від 0,06 м до 0,14 м, коли диск лише входить у ґрунт, сила опору росте лінійно, оскільки більше ґрунту контактує з робочою поверхнею.

Другі два члени рівняння, що містять V , характеризують вплив швидкості руху диска і показують квадратичне збільшення тягового зусилля із збільшенням швидкості, що вказує на збільшення сили опору через більший контакт з ґрунтом при більш швидкому русі.

Члени рівняння, що включають кут нахилу θ , мають негативні коефіцієнти: $-41,7396 \cdot \theta$ та $-10,3513 \cdot \theta^2$. Це означає, що зростання кута нахилу клиноподібної вставки стояка дискового робочого органу в обидві сторони зменшує тягове зусилля. З фізичного боку це можна пояснити тим, що при більших кутах нахилу диск менш ефективно проникає в ґрунт, що знижує його здатність рухати ґрунт вперед, оскільки сила тертя та опору стає меншою.

Провівши оптимізацію рівняння (2) за умови мінімізації тягового зусилля рами отримуємо значення факторів досліджень: $\theta = 6^\circ$, $h = 0,06$ м, $v = 1$ м/с. При цьому $P_{1\min} = 73,3$ Н.

Відповідно до описаної методики, у програмному середовищі Wolfram Cloud побудовано рівняння регресії середньоквадратичного відхилення сили, зафіксованої датчиком тягового зусилля рами

$$\sigma_1 = 93,5333 - 17,175 x_1 - 20,1667 x_1^2 + 16,0 x_2 - 1,25 x_1 x_2 + 3,68333 x_2^2 + 13,825 x_3 - 0,5 x_1 x_3 + 1,35 x_2 x_3 - 5,06667 x_3^2. \quad (3)$$

Після виключення незначущих коефіцієнтів регресії згідно з критерієм Стюдента (t-Statistic) та перетворення закодованих значень факторів у реальні одержуємо:

$\sigma_1 = 19,9583 + 400,1 h + 19,75 V - 2,8625 \theta - 0,560185 \theta^2.$	(4)
---	-----

Графічне представлення залежності (4) у формі поверхонь відгуку подано на рис. 6.

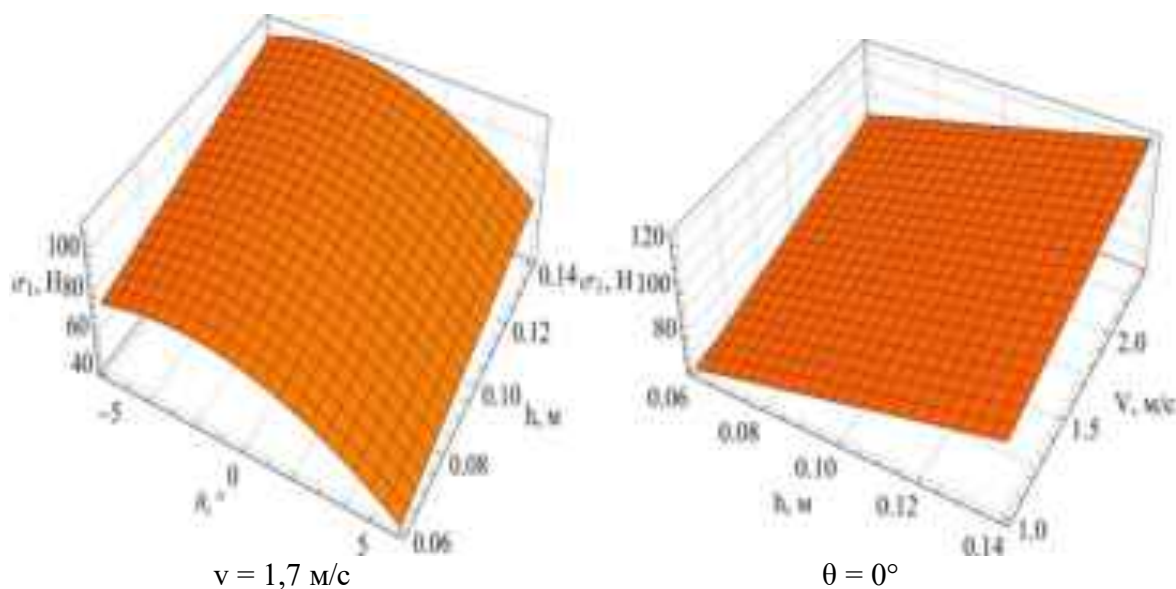


Рис. 6. Залежність середньоквадратичного значення сили, зафіксованої датчиком тягового зусилля рами σ_1 від кута клиноподібної вставки стояка дискового робочого органу θ , глибини входження дискового робочого органу в ґрунт h і швидкості руху v

Залежність (4) має змішаний характер: вона включає як лінійні члени (по h , V , θ), так і квадратичний член по куту θ , що дозволяє відобразити нелінійний вплив цього параметра на силу опору.

Збільшення глибини обробки h і швидкості руху агрегату V призводить до збільшення середньоквадратичного відхилення сили σ_1 , що пояснюється підвищенням

інтенсивності деблокованого зминання ґрунту, зростанням сили тертя та збільшенням об'єму ґрунту, що підлягає деформації під дією робочого органу.

Для кута клиноподібної вставки стояка дискового робочого органу θ спостерігається оптимум (найбільше значення) в середині діапазону варіювання ($\theta = -2,55^\circ$). Таку залежність можна пояснити наявністю повороту дискового робочого органу (тобто кутом атаки) вздовж лінії його руху, що істотно впливає на характер взаємодії з ґрунтом. При зміні кута θ змінюється положення площини різання та напрям вектора реакції ґрунту, що, своєю чергою, впливає на ефективність проникнення диска та опір, який виникає. У певному діапазоні значення θ забезпечується оптимальне поєднання глибини проникнення, сили розпушування та мінімального опору, тоді як відхилення від цього діапазону призводить до зростання сили опору через погіршення умов різання або зростання фронтального тиску ґрунту на диск. Провівши оптимізацію рівняння (4) за умови мінімізації середньоквадратичного відхилення тягового зусилля рами отримуємо значення факторів досліджень: $\theta = 6^\circ$, $h = 0,06$ м, $v = 1$ м/с. При цьому $\sigma_{1\min} = 26,4$ Н.

У програмному середовищі Wolfram Cloud отримано рівняння регресії для середніх значень сил, зафіксованих датчиками тягового зусилля у верхній (P_2) та крайній (P_3) точках стояка

$$P_2 = 74,2 - 11,175 x_1 - 8,025 x_{12} + 24,7 x_2 - 0,35 x_1 x_2 - 1,125 x_{22} + 11,35 x_3 - 2,55 x_1 x_3 - 2,6 x_2 x_3 - 0,625 x_{32}, \quad (5)$$

$$P_3 = 37,5333 - 5,6 x_1 - 3,40417 x_{12} + 14,0125 x_2 + 0,1 x_1 x_2 + 1,52083 x_{22} + 6,1875 x_3 - 1,65 x_1 x_3 - 1,125 x_2 x_3 + 0,570833 x_{32}. \quad (6)$$

За результатами статистичного аналізу рівнянь (5) і (4.6), після видалення статистично незначущих коефіцієнтів регресії на основі критерію Стюдента (t-Statistic) та перетворення закодованих факторів у їхні реальні значення, отримано наступне:

$$P_2 = -15,1143 + 617,5 h + 16,2143 V - 1,8625 \theta - 0,222917 \theta^2. \quad (7)$$

$$P_3 = -12,5247 + 350,313 h + 8,83929 V - 0,933333 \theta - 0,0945602 \theta^2. \quad (8)$$

Графічне представлення залежностей у вигляді поверхонь відгуку подано на рис. 7.

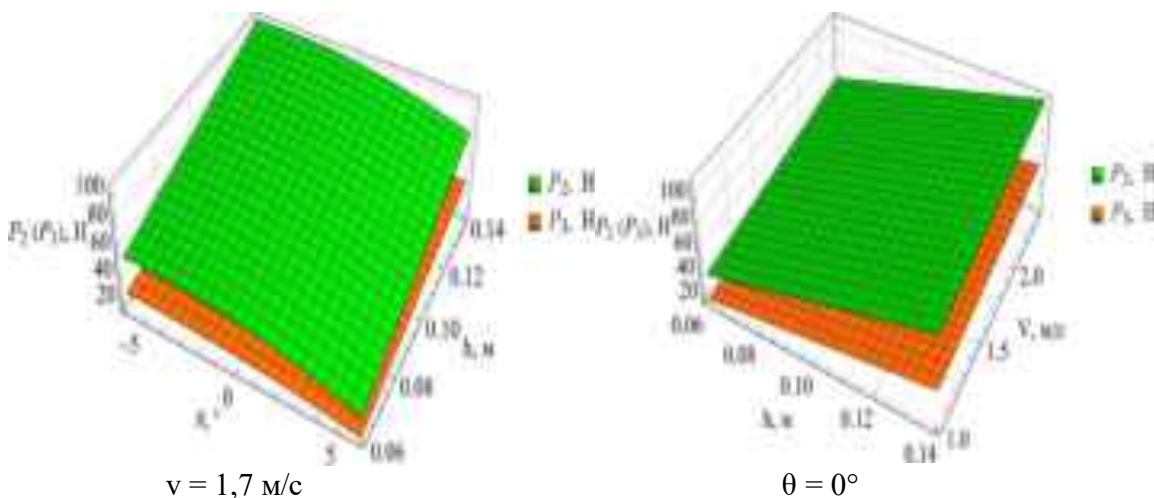


Рис. 7. Залежність середніх значень сил, зафіксованих датчиками тягового зусилля у верхній (P_2) та крайній (P_3) точках стояка від кута клиноподібної вставки стояка дискового робочого органу θ , глибини входження дискового робочого органу в ґрунт h і швидкості руху v

Як для P_2 , так і для P_3 , глибина входження дискового робочого органу в ґрунт (h) має позитивний вплив на величину тягового зусилля. Це проявляється в наявності позитивних коефіцієнтів при h (617,5 для P_2 та 350,313 для P_3). Фізично це можна пояснити тим, що при збільшенні глибини обробітку збільшується об'єм ґрунту, який обробляється, що потребує більшого зусилля для його переміщення. Тобто, диск вступає в більший об'єм ґрунту, що збільшує сумарний опір, який необхідно подолати для руху агрегату.

Швидкість руху агрегату (V) також позитивно впливає на величину тягового зусилля в обох точках. Коефіцієнти при V складають 16,2143 для P_2 і 8,83929 для P_3 . Це пояснюється тим, що зі збільшенням швидкості збільшується інерційний опір і тертя між робочим органом і ґрунтом. При більшій швидкості руху зростає енергія, яку потрібно затратити для переміщення диска по ґрунту, оскільки тертя та інші механізми опору, як правило, зростають з підвищенням швидкості.

Вплив кута θ на тягове зусилля має складну природу. Для обох рівнянь спостерігається негативний лінійний ефект (коефіцієнти $-1,8625$ для P_2 і $-0,933333$ для P_3), що означає, що з ростом кута клиноподібної вставки стояка дискового робочого органу тягове зусилля зменшується. Це може бути пов'язано з тим, що зі збільшенням кута зменшується опір ґрунту до руху робочого органу, оскільки диск з більшим кутом вставки може "легше" розрізати ґрунт, забезпечуючи більш ефективне проникнення. Однак, одночасно з цим у рівнянні спостерігається також квадратичний термін ($-0,222917 \theta_2$ для P_2 і $-0,0945602 \theta_2$ для P_3), який вказує на наявність оптимуму для кута θ . Тобто, після досягнення певного кута, подальше збільшення кута вставки може привести до зростання тягового зусилля через збільшення фронтального опору та зміну характеру взаємодії диска з ґрунтом, що веде до неефективного розрізання і підвищення опору.

Провівши оптимізацію рівнянь (7) і (8) за умови мінімізації тягового зусилля рами отримуємо значення факторів досліджень: $\theta = 6^\circ$, $h = 0,06$ м, $v = 1$ м/с. При цьому $P_{2\min} = 18,95$ Н і $P_{3\min} = 8,32$ Н.

Відповідно до обраної методики, у середовищі Wolfram Cloud побудовано рівняння регресії для частоти коливань робочого органу

$$\omega = 57,2667 - 1,475 x_1 + 2,44167 x_{12} + 3,075 x_2 - 0,8 x_1 x_2 - 0,758333 x_{22} + 1,15 x_3 + 0,6 x_1 x_3 + 0,35 x_2 x_3 - 1,25833 x_{32}. \quad (9)$$

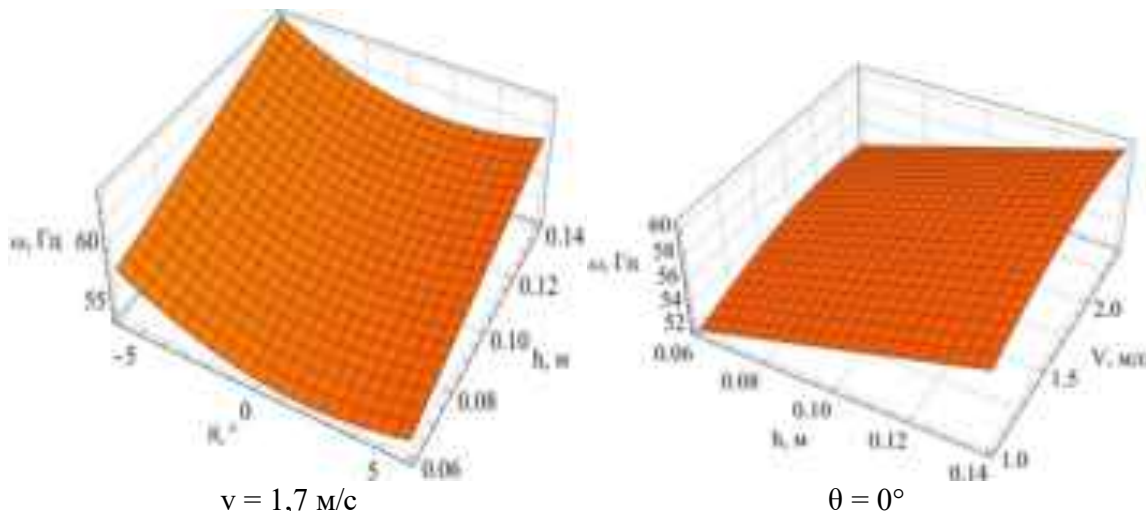


Рис. 8. Залежність частоти коливань робочого органу ω від кута клиноподібної вставки стояка дискового робочого органу θ , глибини входження дискового робочого органу в ґрунт h і швидкості руху v

Після вилучення статистично незначущих коефіцієнтів згідно з критерієм Стьюдента (t-Statistic) та перетворення закодованих факторів у їхні реальні значення отримано:

$$\omega = 39,3647 + 76,875 h + 10,3741 V - 2,56803 V^2 - 0,245833 \theta + 0,0678241 \theta^2. \quad (10)$$

Графічна інтерпретація залежності (10) у вигляді поверхонь відгуків наведено на рис. 8. Перш за все, значний позитивний коефіцієнт при глибині входження h (76,875) свідчить про сильний вплив цього параметра на зростання частоти коливань. Це пояснюється тим, що при більшій глибині обробітку збільшується опір ґрунту, що призводить до зростання коливальних процесів у робочому органі внаслідок перерозподілу зусиль і реакцій ґрунтового середовища. Робочий орган, занурюючись глибше, стикається з більшим об'ємом ґрунту, який чинить опір нерівномірно, що й спричиняє активніші коливання.

Обговорення

Швидкість руху V має змішаний вплив, що проявляється в наявності як лінійного додатного члена ($10,3741 V$), так і квадратичного від'ємного ($-2,56803 V^2$). Така форма залежності свідчить про існування оптимальної швидкості, при якій частота коливань досягає максимального значення, після чого починає зменшуватись. На початку зростання швидкості збільшується динамічний вплив ґрунту на робочий орган – зростає інерція, сили взаємодії і, як наслідок, коливальні процеси. Проте при надмірно високих швидкостях робочий орган частково втрачає контакт із ґрунтом через ефект розпушення, що знижує амплітуду та частоту збурень, а також може спрацьовувати демпфування конструкцією стояка або навіски.

Кут клиноподібної вставки θ впливає на частоту коливань нелінійно. Лінійний член ($-0,245833 \theta$) свідчить про зменшення частоти коливань зі зростанням кута, що можна пояснити більш плавною взаємодією диска з ґрунтом при збільшених кутах атаки. Проте квадратичний член ($0,0678241\theta^2$) вказує на те, що після досягнення певного значення θ зменшення частоти припиняється і починається зворотна тенденція – частота коливань знову зростає. Такий характер залежності обумовлений тим, що при невеликих кутах покращується проникнення в ґрунт, що зменшує збурення, але при занадто великих кутах зростає лобовий опір і динамічні реакції ґрунту, що знову активізує коливання.

Провівши оптимізацію рівняння (10) за умови мінімізації тягового зусилля рами отримуємо значення факторів досліджень: $\theta = 1,81^\circ$, $h = 0,06$ м, $v = 1$ м/с. При цьому $\omega_{\min} = 51,6$ Гц.

Висновки

1. В результаті експериментальних досліджень отримано динаміки тягового зусилля рами P_1 , тягових зусиль верхньої і крайньої точок пружного стояка дискового робочого органу P_2 і P_3 , а також кутів орієнтації трьохосового акселерометра α , β , γ для кожного дослідження згідно плану Бокса-Бенкіна трьох факторів (кут клиноподібної вставки пружного стояка дискового робочого органу θ , глибина входження дискового робочого органу в ґрунт h і швидкість руху v) на трьох рівнях варіації.

2. В результаті обробки експериментальних даних з використанням програми Wolfram Cloud отримано залежності у вигляді рівнянь регресії другого порядку середнього значення тягового зусилля рами P_1 , його середньоквадратичного відхилення σ_1 , частоти коливань робочого органу ω , середнього значення зусилля у верхній (P_2) і крайньої (P_3) точок пружного стояка дискового робочого органу від кута клиноподібної

вставки стояка дискового робочого органу θ , глибини входження дискового робочого органу в ґрунт h і швидкості руху v .

3. За результатами проведення оптимізації рівняння (10) за умови мінімізації тягового зусилля рами отримано значення факторів досліджень: $\theta = 1,81^\circ$, $h = 0,06$ м, $v = 1$ м/с. При цьому мінімальна частота коливань дискового робочого органу $\omega_{\min} = 51,6$ Гц.

Список використаних джерел

1. Гуков Я. С. Механіко-технологічне обґрунтування енергозберігальних засобів для механізації обробітку ґрунту в умовах України: автореф. дис... докт. техн. наук 05.20.01. Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства». Глеваха, 1998. 32 с.
2. Шевченко І. А. Обґрунтування технологій та технічних засобів для обробітку ґрунтів на базі їх агрофізичних показників [Текст]: дис... докт. техн. наук: 05.05.11. Шевченко Ігор Аркадійович; Таврійський державний агротехнологічний університет. Мелітополь, 2003. 403с.
3. Пащенко В. Ф., Онишко М. І., Дорожко І. М., Сєдих К. В. Визначення якісних показників роботи експериментального дискового лушпильника. Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка. Механізація с.-г. виробництва. Харків. 2011. Вип. 107 (1. X). С. 195–198.
4. Адамчук В. В., Булгаков В. М., Надикто В. Т., Кувачов В. П., Ігнат'єв Є. І., Ольт Ю. Теорія стійкого руху дискової борони. Механізація та електрифікація сільського господарства Глеваха: ННЦ «ІМЕСГ». 2021. Вип. 14 (113). С. 10–22.
5. Сєдих К. В. Оцінка структурного складу ґрунту після обробітку експериментальним дисковим лушпильником. Загальнодержавний збірник. Механізація та електрифікація сільського господарства: 2017. Вип. 6 (105). – С. 44–49.
6. Ґрунтообробні агрегати на основі дискових робочих органів: монографія / [Г.В.Теслюк, Б.А. Волик, С.П. Сокол, О.М. Кобець, А.М. Семенюта]. Дніпропетровськ: ТОВ «Акцент ПП», 2016. 144 с.
7. Шевченко І. А. Керування агрофізичним станом ґрунтового середовища. К.: Видавничий дім «Вініченко». 2016. - 320 с.
8. Гапоненко О. І. Обґрунтування параметрів пружних стояків дискових ґрунтообробних агрегатів [Текст]: дис... канд. техн. наук за спеціальністю 05.05.11 Гапоненко Олександр Іванович; Державна наукова установа «Український науково-дослідний інститут прогнозування та випробування техніки і технологій для сільськогосподарського виробництва імені Леоніда Погорілого». Дослідницьке, 2016. 228 с.
9. Сєдих К. В. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів дискатора з пружними стійками [Текст]: дис... канд. техн. наук 05.05.11 /Сєдих Костянтин Володимирович; Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка. Харків, 2021. 248 с.
10. Сімсон Е. А., Хавин В. Л., Ягудин Д. С. Оптимізація індивідуальної пружинної стійки дискової борони.. Інженерія природокористування, 2 (6). 2016. С. 81–84.
11. Kobets A., Aliiev E., Tesliuk H., Aliieva O. (2023). Simulation of the interaction between the working bodies of tillage machines and the soil in Simcenter STAR-CCM+. Machinery & Energetics, 14 (1), 9–23. DOI: 10.31548/machinery/1.2023.09.

12. Алієв Е. Б. Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва: підручник. Київ: Аграрна наука, 2023. 340 с. ISBN 978-966-540-584-9. DOI: 10.31073/978-966-540-584-9.
13. Патент України на корисну модель 153663, МПК А01В 23/06. Дискатор / Козаченко О. В., Бакум М. В., Волковський О. М., Крекот М. М. (Україна). № у 2023 00183; Заявл. 19.01.2023. Опубл. 09.08.2023. Бюл. № 32.
14. Козаченко О.В., Волковський О.М. Моделювання напружено-деформованого стану пружного стояка дискатора з регулятором жорсткості. Вібрації в техніці та технологіях. 2024 № 1 (112). С. 11-22. DOI: 10.37128/2306-8744-2024-1-2. [in Ukrainian].
15. ДСТУ 7080:2009. Якість ґрунту. Проведення польових дослідів. Основні вимоги. [Чинний від 2010-07-01]. Київ: Держспоживстандарт України, 2010. 12 с. (Національний стандарт України).
16. Antoshchenkov, R., Bogdanovich, S., Halych, I., Cherevatenko, H. Determination of dynamic and traction-energy indicators of all-wheel-drive traction-transport machine. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2023. 1 (7 (121)), 40–47. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.270988>.
17. R. Antoshchenkov, V. Antoshchenkova, V. Kis, D. Smitskov. Increasing accuracy of measuring functioning parameters of agricultural units. Engineering for Rural Development, 2023, 22. pp. 210–215.

References

1. Gukov Y. S. (1998). Mekhaniko-tekhnologichne obhruntuvannya enerhozberihal'nykh zasobiv dlya mekhanizatsiyi obrobitku rruntu v umovakh Ukrayiny [Mechanical-technological substantiation of energy-saving means for mechanizing soil cultivation in Ukraine]: Extended abstract of doctoral dissertation (Ph.D.) in Technical Sciences, 05.20.01. Natsional'nyy naukovyy tsentr «Instytut mekhanizatsiyi ta elektryfikatsiyi sil's'koho hospodarstva». Hlevakha. 32 p. [in Ukrainian].
2. Shevchenko I. A. (2003). Justification of technologies and technical means for soil cultivation based on their agrophysical indicators. Dis... Dr. technical Sciences: 05.05.11. Tavria State Agro-Technological University. 403 p. [in Ukrainian].
3. Pashchenko V. F., Onyshko M. I., Dorozhko I. M., Siedykh K. V. (2011). Vyznachennya yakisnykh pokaznykiv roboty eksperymental'noho dyskovoho lushchyl'nyka [Determination of qualitative indicators of the operation of an experimental disk harrow]. Visnyk KhNTUSG imeni Petra Vasylenka. Mekhanizatsiya s.-h. vyrobnytstva. Kharkiv. Vyp. 107 (1. Kh). S. 195–198. [in Ukrainian].
4. Adamchuk V. V., Bulhakov V. M., Nadykto V. T., Kuvachov V. P., Ihnat'yev YE. I., Ol't YU. (2021). Teoriya stiykoho rukhu dyskovoyi borony [Theory of steady motion of a disk harrow]. Mekhanizatsiya ta elektryfikatsiya sil's'koho hospodarstva. Hlevakha: NNTS «IMESH». Vyp. 14 (113). S. 10–22. [in Ukrainian].
5. Sedykh K. V. (2017). Evaluation of the structural composition of the soil after processing with an experimental disc harrow. Mechanization and electrification of agriculture: [national collection], 6 (105): 44–49. [in Ukrainian].
6. Teslyuk G. V., Volyk B. A., Sokol S. P., Kobets O. M., Semenyuta A. M. (2016). Soil tillage units based on disc working bodies: monograph. DDAEU 144 p. [in Ukrainian].
7. Shevchenko I. A. (2016) Management of the agrophysical state of the soil environment. K.: Vinichenko Publishing House. 320 p. [in Ukrainian].
8. Gaponenko O. I. (2016). Justification of the parameters of the elastic risers of disk tillage units. Diss... candidate technical of Sciences by specialty 05.05.11. State scientific institution "Ukrainian Research Institute of Forecasting and Testing of Equipment and

Technologies for Agricultural Production named after Leonid Pohorily". 228 с. [in Ukrainian].

9. Sedykh K. V. (2021). Justification of the structural and technological parameters of the diskator with elastic racks. Diss... candidate technical of Sciences by specialty 05.05.11. Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Petro Vasylenko. 248 с. [in Ukrainian].

10. Simson E. A., Khavin V. L., Yagudin D. S. (2016). Optimization of the generatrix of the individual spring strut of a disc harrow. *Environmental Engineering*, 2 (6): pp. 81–84. [in Ukrainian].

11. Kobets A., Aliiev E., Tesliuk H., Aliieva O. (2023). Simulation of the interaction between the working bodies of tillage machines and the soil in Simcenter STAR-CCM+. *Machinery & Energetics*, 14 (1), 9–23. DOI: 10.31548/machinery/1.2023.09. [in English].

12. Aliiev E. B. (2023). Numerical modeling of agro-industrial production processes: a textbook. Kyiv: Agrarian Science, 340 p. ISBN 978-966-540-584-9. DOI: 10.31073/978-966-540-584-9. [in Ukrainian].

13. Kozachenko O. V., Bakum M. V., Volkovskiy O. M., Krekot M. M. (2023). Patent of Ukraine for utility model 153663. Diskator. IPC (2023.01) A01B 23/00, A01B 23/06 (2006.01). Applicant: State Biotechnological University, No. u 2023 00183. Application. 19.01.2023. Publ. 09.08.2023, Bull. No. 32. [in Ukrainian].

14. Kozachenko O.V., Volkovsky O.M. Modeling the stress-strain state of an elastic riser of a diskator with a stiffness regulator. *Vibrations in Engineering and Technologies*. 2024 No. 1 (112). P. 11-22. DOI: 10.37128/2306-8744-2024-1-2. [in Ukrainian].

15. DSTU 7080:2009. Soil quality. Conducting field experiments. Basic requirements. [Valid from 2010-07-01]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2010. 12 p. (National standard of Ukraine).

16. Antoshchenkov, R., Bogdanovich, S., Halych, I., Cherevatenko, H. Determination of dynamic and traction-energy indicators of all-wheel-drive traction-transport machine. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2023. 1 (7 (121)), 40–47. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.270988>. [in Ukrainian].

17. R. Antoshchenkov, V. Antoshchenkova, V. Kis, D. Smitskov. Increasing accuracy of measuring functioning parameters of agricultural units. *Engineering for Rural Development*, 2023, 22. pp. 210–215. [in Ukrainian].

Ляшенко С. О.,
Фесенко А. М.,
Кісь В. М.

Державний
біотехнологічний
університет,
м. Харків, Україна
E-mail:
alla.ecology3006@gmail.com

**ІНТЕГРАЦІЯ СИСТЕМ ЕКОЛОГІЧНОГО
МОНІТОРИНГУ ТА БЕЗПЕКИ ПРАЦІ
В УМОВАХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ
ПІДПРИЄМСТВ**

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-26-177-185>

УДК 631.45

Ляшенко С.О., Фесенко А.М., Кісь В.М. Інтеграція систем екологічного моніторингу та безпеки праці в умовах енергетичних підприємств.

Анотація. У статті розглядається питання інтеграції систем екологічного моніторингу та безпеки праці на енергетичних підприємствах. Розглянуто сучасні технології IoT та Big Data, що дозволяють забезпечити єдину інформаційну систему для реального часу стану навколишнього середовища та умов праці. Визначено основні напрямки впровадження сучасних інтегрованих технологій у системи екологічного моніторингу та безпеки праці. Проведено аналіз тенденцій у сфері безпеки в процесі впровадження сучасних безпекових технологій. Розкрито ризики та переваги таких інтеграцій з використанням прикладів з української практики.

Ключові слова: екологічний моніторинг, безпека праці, технології IoT та Big Data, оцінка виробничих ризиків.

Liashenko S.O., Fesenko A.M., Kis V.M. Integration of environmental monitoring and occupational safety systems in context of energy enterprises.

Abstract. The article addresses the integration of environmental monitoring and occupational safety systems at energy enterprises. It examines modern technologies such as IoT and Big Data, which enable the creation of a unified information system for real-time tracking of environmental conditions and workplace safety. The main directions for implementing advanced integrated technologies in environmental monitoring and occupational safety systems are identified. The study analyzes current safety trends during the adoption of modern safety technologies. It also highlights the risks and advantages of such integrations, using examples from Ukrainian practice.

Key words: environmental monitoring, occupational safety, IoT technologies, Big Data, occupational risk assessment.

Постановка проблеми

У сучасних умовах, коли питання безпеки праці та дотримання стандартів набувають дедалі більшого значення, організації змушені активно змінювати свої підходи відповідно до нових вимог. Одним із прогресивних рішень є впровадження інтегрованої системи HSE (Health, Safety, and Environment), яка охоплює заходи з охорони праці, безпеки, охорони здоров'я та захисту довкілля.

Систематичний аналіз і модернізація системи охорони праці є необхідними для

підтримання належного рівня захищеності працівників. Такі зміни часто зумовлені оновленням нормативно-правової бази, впровадженням нових технологій або процесів, а також зростанням випадків виробничого травматизму чи професійних хвороб. Зниження працездатності персоналу та невідповідність сучасним стандартам також свідчать про необхідність змін. Проведення аудитів дозволяє виявити вразливі місця, що потребують вдосконалення, а формування культури безпеки стає ключовим елементом побудови ефективної системи охорони праці.

Питання охорони праці та екологічної безпеки традиційно розглядаються окремо, однак сучасні технології дають можливість їх інтеграції в єдину систему моніторингу на підприємствах [1].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Дослідження, проведені за підтримки EU Horizon 2020 та World Bank, свідчать про позитивний вплив комплексної системи середовищного і трудового моніторингу на рівень безпеки та екологічності [1-3].

Необхідність у інтеграції пояснюється потребою системного підходу до подолання ризиків: як небезпек для людини, так і для довкілля.

Формулювання мети досліджень

Метою роботи є підвищення ефективності процесів інтеграції систем екологічного моніторингу та безпеки праці на сучасних енергетичних підприємствах, що дозволить виявити основні напрямки, переваги та критичні місця такої інтеграції.

Для досягнення поставленої мети необхідно проаналізувати існуючий досвід інтеграції систем екологічного моніторингу та безпеки праці та різних підприємствах, вивчити інформаційні ресурси, що використовуються для цієї інтеграції, визначити рівень ефективності даної системи та намітити шляхи поглиблення такої інтеграції екологічних та безпекових досліджень.

Результати досліджень

Для узгодження даних із різних джерел і інтеграції в єдину базу з аналітикою на реальних даних за основу взято IoT-системи і сервіси Big Data.

IoT-системи або Інтернет речей (IoT, Internet of Things) це мережа фізичних пристроїв, оснащених датчиками, програмним забезпеченням та іншими технологіями, які з'єднані між собою через Інтернет. У контексті виробничої безпеки IoT включає:

- датчики для вимірювання температури, вологості, рівня шуму, концентрації шкідливих газів тощо;
- засоби стеження за місцезнаходженням працівників;
- «розумні» носимі пристрої, які контролюють пульс, втому, положення тіла.

Ці пристрої забезпечують безперервний моніторинг умов праці та оперативне виявлення потенційно небезпечних ситуацій.

Аналітика великих даних (Big Data) це процес обробки та аналізу надзвичайно великих масивів інформації, які неможливо обробити традиційними методами. У виробничій сфері Big Data виконує такі функції:

- обробка даних з IoT-пристроїв у режимі реального часу;
- виявлення закономірностей, які свідчать про небезпеку (наприклад, коливання температури перед аварією);
- прогнозування ризиків завдяки використанню штучного інтелекту та

алгоритмів машинного навчання.

Згідно з дослідженням McKinsey (2023-2025), використання Big Data у виробничій безпеці дозволяє скоротити кількість інцидентів на 20–30%, а час реагування на надзвичайні ситуації – до 40% [4].

Одним із способів інтеграції охорони праці та екологічної відповідальності є система HSE (охорона здоров'я, безпека та довкілля) для модернізації управління на промислових підприємствах. Ефективне впровадження HSE базується на комплексному підході, який охоплює такі основні етапи:

1. Оцінка ризиків і побудова системи превентивних заходів.

Першочерговим етапом є всебічний аналіз небезпек і професійних ризиків, що дозволяє ідентифікувати критичні загрози для персоналу та довкілля. На основі результатів оцінювання формуються цільові профілактичні заходи в межах HSE-системи.

2. Інтеграція міжнародних стандартів.

Запровадження системи управління охороною праці та навколишнім середовищем відповідно до стандартів ISO 45001 (охорона праці) та ISO 14001 (екологічне управління) забезпечує високий рівень відповідності нормативним вимогам, створює стабільну інфраструктуру безпеки та закладає підґрунтя для подальших удосконалень.

3. Формування культури безпеки.

Ключовим аспектом HSE є розвиток усвідомленого ставлення працівників до безпеки праці. Проведення систематичного навчання, залучення персоналу до процесів ухвалення рішень, мотивація до дотримання стандартів безпеки – все це сприяє формуванню відповідальної культури безпеки. Активна участь працівників у вдосконаленні системи охорони праці разом із навчальними заходами сприяє зміцненню внутрішньої культури безпеки на підприємстві.

4. Постійний моніторинг, аудит та зворотний зв'язок.

Регулярний моніторинг стану безпеки, періодичні внутрішні та зовнішні аудити дозволяють оперативно виявляти недоліки, вчасно вживати коригувальні заходи й підтримувати ефективність системи HSE на високому рівні.

5. Екологічна інтеграція в управлінські безпекові процеси.

Врахування екологічного чинника в прийнятті рішень дає змогу зменшити негативний вплив на довкілля, раціонально використовувати ресурси та зміцнювати екологічну репутацію підприємства.

6. Впровадження інноваційних технологій.

Майбутній розвиток HSE в Україні пов'язується з цифровою трансформацією. Застосування технологій Industry 4.0, автоматизованого моніторингу, інтелектуальних систем аналізу ризиків та цифрових платформ у сферах медицини, екології та енергетики дозволяє забезпечити високі стандарти безпеки та ефективності.

Можна зробити висновок, що системний розвиток HSE сприяє не лише зменшенню ризиків виробничого травматизму та впливу на довкілля, а й покращенню продуктивності, підвищенню задоволеності працівників і формуванню позитивного іміджу підприємства. Постійне вдосконалення системи HSE дозволяє адаптуватися до законодавчих змін, впроваджувати новітні технології та забезпечувати стабільне функціонування підприємства в умовах конкурентного середовища.

Результати наукових досліджень вказують на зниження рівня викидів та кількості інцидентів після впровадження інтегрованих систем моніторингу на підприємствах.

Прикладом успішного впровадження HSE-системи є діяльність ПАТ «Укрнафта», де впровадження інтегрованої системи управління охороною праці,

безпекою та охороною довкілля дозволило суттєво знизити рівень виробничого травматизму та екологічних інцидентів. Зокрема, компанія провела модернізацію обладнання відповідно до міжнародних стандартів ISO 45001 (охорона праці) та ISO 14001 (екологічне управління), запровадила систему звітності та регулярного моніторингу небезпечних факторів. Було також налагоджено навчання персоналу з акцентом на превентивні заходи, а в рамках культури безпеки впроваджено внутрішні комунікаційні кампанії та мотиваційні програми для підвищення свідомого ставлення працівників до власної безпеки [5].

У результаті – скорочення кількості нещасних випадків на 35% протягом двох років та зменшення викидів шкідливих речовин на 20% завдяки екологічним ініціативам. Це свідчить про ефективність комплексного підходу до інтеграції системи HSE в реальні виробничі умови. Аналіз інтеграції систем екологічної безпеки та безпеки праці наведений у таблиці 1.

Таблиця 1

Впровадження HSE-системи в ПАТ «Укрнафта» [5]

Показник / Захід	До впровадження HSE	Після впровадження HSE	Результат / Коментар
Стан виробничої безпеки	Часті порушення, інциденти	Зменшення аварійності на 35%	За 2 роки після модернізації обладнання
Охорона навколишнього середовища	Наднормові викиди	Зменшення викидів на 20%	Завдяки переходу на енергоефективне обладнання
Наявність сертифікації	Відсутня	ISO 45001, ISO 14001	Підвищення міжнародної довіри до підприємства
Навчання персоналу з безпеки	Епізодичне	Регулярне, з практичними тренуваннями	Формування культури безпеки
Система моніторингу та аудиту	Відсутня або фрагментарна	Створена централізована система	Постійне виявлення та усунення ризиків
Рівень залученості працівників у питання безпеки	Низький	Високий	Впроваджено мотиваційні програми

В Україні та світі дедалі більше енергетичних підприємств, що користуються сучасними науковими розробками, впроваджують технології IoT і Big Data з метою посилення екологічної та трудової безпеки. На міжнародному рівні однією з компаній, що активно впроваджує інтегровані системи моніторингу екології та безпеки праці, є Siemens. Вони використовують передові технології IoT для постійного моніторингу своїх виробничих потужностей у різних країнах, що дозволяє підвищити ефективність за рахунок оптимізації робочих процесів та зниження виробничих ризиків для працівників. Крім цього, перспективними можна назвати такі інновації на українських та зарубіжних підприємствах:

- ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» (Україна): понад 1 000 сенсорів контролюють рівень шкідливих речовин, температуру обладнання, присутність працівників у небезпечних зонах [6].

- «Нафтогаз України»: використовує IoT для моніторингу тиску в трубопроводах; внаслідок цього аварійність зменшилась на 35% [7].
- «Метінвест»: браслети та носимі датчики фіксують втому працівників, що дозволило знизити травматизм на 18%.
- Siemens (Німеччина): платформа Mindsphere здійснює аналітику в режимі реального часу, попереджаючи аварії.
- General Electric (США): Predix використовує Big Data для прогнозу відмов і зменшує втрати на 20%.
- POSCO (Південна Корея): IoT-дані запобігають перегріву в доменних печах, що знижує ризик вибухів.
- ДТЕК: Одним з перших великих енергетичних підприємств України, яке впровадило інтегровані системи моніторингу екологічної безпеки та охорони праці, є компанія ДТЕК. Вони використовують датчики IoT для відстеження рівня викидів на своїх електростанціях, а також системи для моніторингу умов праці. Дані обробляються за допомогою Big Data, що дозволяє прогнозувати аварійні ситуації та оптимізувати роботу підприємства [7].

Зниження викидів у атмосферне повітря можна розглядати як один з факторів зниження і рівня професійної захворюваності серед персоналу енергетичних підприємств. Зв'язок між цими двома процесами відображено у таблиці 2, яка складена на основі даних Державної служби статистики України.

Таблиця 2

Вплив викидів енергетичних підприємств України на екологічну ситуацію та рівень захворюваності працівників

Підприємство	Середній рівень викидів, т/рік	Зміна якості повітря (ΔAQI)	Рівень захворюваності, випадків на 1000 працівників
ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»	50 000	+20	8
ПАТ «Нафтогаз України»	30 000	+15	6
ГМК «Метінвест»	20 000	+10	5
ТОВ «ДТЕК»	40 000	+18	7

Виходячи з наведених результатів, щодо викидів, якості повітря та рівнів захворюваності ми отримали графічне відображення залежності рівня захворюваності персоналу від обсягу викидів на різних енергетичних підприємствах галузі, що наведене на рис. 1.

Інтеграція систем моніторингу поряд із оцінкою даних за допомогою Big Data дає можливість системно зміцнити культуру безпеки, ергономічну складову та захист на підприємствах. Динаміка викидів на підприємствах енергетичної галузі України за умови удосконалення систем моніторингу на основі статистичних даних наведена на рис. 2. Позитивна динаміка виробничої безпеки спостерігається і за кількістю нещасних випадків на виробництві (рис. 3).

Інтеграція систем охорони праці та екологічної безпеки на енергетичних підприємствах є важливим кроком у напрямку створення ефективної та стійкої інфраструктури для забезпечення здоров'я працівників та збереження навколишнього середовища. Взаємодія між цими двома системами забезпечує не лише ефективне управління ризиками, але й дозволяє знизити потенційні загрози для працівників і довкілля через інтегроване використання сучасних технологій Інтернету речей (IoT) та

аналітики великих даних (Big Data).

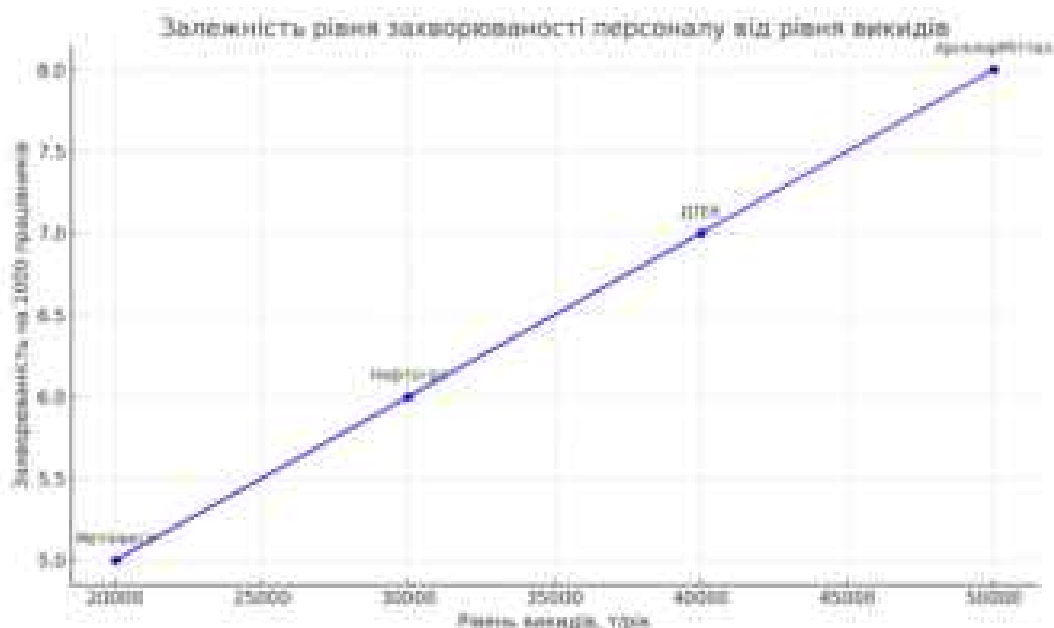


Рис. 1. Залежність рівня захворюваності персоналу від рівня викидів в атмосферу для підприємств енергетичної галузі України.

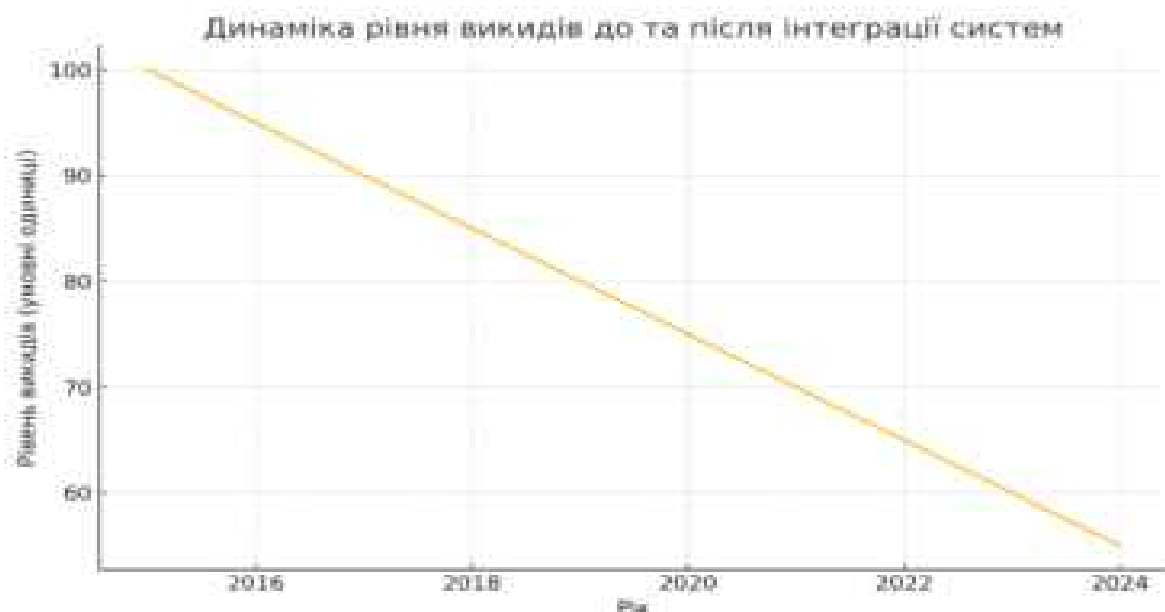


Рис. 2. Динаміка рівня викидів до та після інтеграції систем моніторингу (2015–2024 роки) [8]

Системи охорони праці й екологічної безпеки мають схожі принципи управління ризиками, тому їх інтеграція може стати важливим етапом для забезпечення ефективної роботи енергетичних підприємств. Основні напрямки, де ці системи взаємодіють, включають:

- Моніторинг стану навколишнього середовища та умов праці: Системи екологічного моніторингу дозволяють здійснювати постійний контроль за рівнем забруднення повітря, води, ґрунту, а також за викидами парникових газів, що є

важливими факторами для безпеки працівників. Водночас система охорони праці фокусується на моніторингу фізичних, хімічних та біологічних факторів на робочих місцях, що можуть впливати на здоров'я працівників.

- Прогнозування ризиків: Інтеграція даних з обох систем дозволяє точно прогнозувати виникнення аварійних ситуацій на основі як екологічних, так і трудових факторів. Наприклад, при забрудненні навколишнього середовища може зрости ймовірність виникнення пожежі або вибуху на підприємстві, що підвищує ризик травмування працівників.

- Управління інцидентами: Взаємодія між системами дозволяє швидко реагувати на екологічні й трудові інциденти, забезпечуючи кращу координацію між службами безпеки праці та екологічними службами підприємства. Оперативне реагування дозволяє мінімізувати наслідки для здоров'я працівників і для довкілля.



Рис. 3/ Динаміка інцидентів на 1000 працівників до та після інтеграції (2015–2024 роки) [9].

Інтеграції систем може бути забезпечена через використання сучасних технологій. Інтернет речей дозволяє сформувати безперервний моніторинг і автоматичний збір даних як для екологічного, так і для трудового моніторингу. Датчики IoT, які встановлюються на виробничому обладнанні, можуть фіксувати рівень викидів, температуру, вологість, рівень шуму та інші показники, що мають безпосередній вплив на здоров'я працівників. Ці ж датчики можуть фіксувати зміни в навколишньому середовищі, що дозволяє швидко реагувати на небезпечні ситуації [9].

Обговорення

За допомогою технологій Big Data можна зберігати й обробляти величезні обсяги даних з різних джерел. Це дозволяє не лише проводити ретроспективний аналіз аварій, але й здійснювати прогностичний аналіз для виявлення потенційних ризиків. Візуалізація таких даних у вигляді графіків та діаграм дозволяє легко відслідковувати тенденції й оцінювати ефективність впроваджених заходів безпеки [10].

Взаємодія систем несе в собі як переваги, так і виклики. До переваг можна віднести:

- Системний підхід до управління безпекою: Інтеграція систем охорони праці та екологічної безпеки дозволяє знижувати ризики як для працівників, так і для навколишнього середовища, покращуючи загальний рівень безпеки на підприємстві.

- Зниження витрат: Інтеграція двох систем допомагає зменшити витрати на окремі моніторингові інструменти й забезпечує зручніше використання ресурсів для підтримки безпеки праці та екологічності.

- Прогнозування та попередження: Використання аналітики для прогнозування ризиків дозволяє вчасно попередити аварії та нещасні випадки, що зменшує можливі економічні втрати та шкоду для репутації підприємства.

Невирішені питання, виклики, елементи певних ризиків пов'язані з наступними аспектами:

- Кіберризики: Підключення до глобальних мереж та використання технологій IoT підвищує ризики кіберзагроз. Несанкціонований доступ до даних може призвести до порушення безпеки праці або маніпулювання результатами моніторингу.

- Технічні проблеми інтеграції: Складність інтеграції різних систем із різними стандартами та протоколами може стати серйозною проблемою. Для досягнення ефективної інтеграції потрібна розробка єдиної інформаційної платформи.

- Залежність від якості даних: Технології Big Data покладаються на точність і надійність зібраних даних. Якщо дані не будуть коректно зібрані або оброблені, це може призвести до хибних прогнозів і ненадійної роботи системи.

- Надмірна залежність від автоматизації: втрачання контролю над процесами у випадку збою або атаки на системи;

- Неправильна інтерпретація даних: ризик прийняття неправильних рішень у разі помилок в алгоритмах аналізу;

Фінансові витрати: значні початкові інвестиції у закупівлю обладнання та навчання персоналу (за даними Deloitte, у середньому до \$150 000 на впровадження базової системи IoT).

Висновки

1. Інтеграція систем екологічного моніторингу та безпеки праці на енергетичних підприємствах забезпечує комплексний підхід до управління ризиками. Використання передових технологій, таких як IoT та Big Data, дозволяє значно підвищити рівень безпеки та зменшити негативний вплив на навколишнє середовище. Однак для успішного впровадження таких систем важливо враховувати технічні й кіберризики, а також складність інтеграції різних підсистем.

Список використаних джерел

1. Ak, M.F., Yucesan, M. & Gul, M. Occupational health, safety and environmental risk assessment in textile production industry through a Bayesian BWM-VIKOR approach. *Stoch Environ Res Risk Assess* 36, 629–642 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00477-021-02069-y>
2. Horizon 2020: Industrial Environment and Safety Integration, 2022.
3. World Bank Reports on Green Transition in Eastern Europe, 2023.
4. Jeffery B., Weddle B., Brassey J., Thaker S. Thriving workplaces: How employers can improve productivity and change lives. McKinsey Health Institute: <https://www.mckinsey.com/mhi/our-insights/thriving-workplaces-how-employers-can-improve-productivity-and-change-lives>
5. Укрнафта: <https://www.ukrnafta.com/soczialna-vidpovidalnist>

6. Сайт Нафтогазу <https://gas.ua/uk/certification>
7. Сайт ДТЕК <https://dtek.com> .
8. Банк даних Державної служби статистики України: Режим доступу: <https://stat.gov.ua/uk/explorer>
9. Patel V., Chesmore A., Legner C., 2021. Trends in Workplace Wearable Technologies and Connected-Worker Solutions for Next-Generation Occupational Safety, Health, and Productivity. *Advanced Intelligent Systems* //doi.org/10.1002/aisy.202100099
10. SHAIK, M. 2023. "IoT-Enabled Environmental Monitoring for Workplace Safety Compliance in Manufacturing ." OSF. December 29. doi:10.17605/OSF.IO/N63WB.

References

1. Ak, M.F., Yucesan, M. & Gul, M. Occupational health, safety and environmental risk assessment in textile production industry through a Bayesian BWM-VIKOR approach. *Stoch Environ Res Risk Assess* **36**, 629–642 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00477-021-02069-y>
2. Horizon 2020: Industrial Environment and Safety Integration, 2022.
3. World Bank Reports on Green Transition in Eastern Europe, 2023.
4. Jeffery B., Weddle B., Brassey J., Thaker S. Thriving workplaces: How employers can improve productivity and change lives. McKinsey Health Institute: <https://www.mckinsey.com/mhi/our-insights/thriving-workplaces-how-employers-can-improve-productivity-and-change-lives>
5. Ukrnafta: <https://www.ukrnafta.com/soczialna-vidpovidalnist>
6. Naftogas: <https://gas.ua/uk/certification>
7. DTEK: <https://dtek.com> .
8. Database of the State Statistics Service of Ukraine: electronic resource. <https://stat.gov.ua/uk/explorer>
9. Patel V., Chesmore A., Legner C., 2021. Trends in Workplace Wearable Technologies and Connected-Worker Solutions for Next-Generation Occupational Safety, Health, and Productivity. *Advanced Intelligent Systems* //doi.org/10.1002/aisy.202100099
10. SHAIK, M. 2023. "IoT-Enabled Environmental Monitoring for Workplace Safety Compliance in Manufacturing ." OSF. December 29. doi:10.17605/OSF.IO/N63WB.

Ляшенко С. О.,
Фесенко А. М.

Державний
біотехнологічний
університет,
м. Харків, Україна
E-mail:
lyashenkosa05@ukr.net
alla.ecology3006@gmail.com

**ЗАСТОСУВАННЯ АДАПТИВНОГО
ПІДХОДУ В СИСТЕМІ КЕРУВАННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ
ВИПАРЮВАННЯ В ЦУКРОВОМУ ЗАВОДІ
ЗА ДОПОМОГОЮ СТАТИЧНОЇ МОДЕЛІ**

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-26-186-200>

УДК 519.71:[681.5:664.1]

Ляшенко С.О., Фесенко А.М. Застосування адаптивного підходу в системі керування технологічним процесом випарювання в цукровому заводі за допомогою статичної моделі.

Анотація. У статті розглядається система керування технологічним процесом випарювання цукрового соку у випарних установках. Проведено аналіз регресійної моделі процесу випарювання, який показав: модель має ряд властивостей, що обмежують сферу її застосування у завданнях керування. Розглянута побудова математичних моделей ТП випарювання цукрового виробництва, які відображають динаміку процесів і засновані на використанні рівнянь матеріального та енергетичного балансів. Визначено основні напрямки підвищення ефективності роботи в системі керування динамічним технологічним процесом випарювання, що дає можливість оптимізувати режими випарювання соку. Розглянуто основні підходи до визначення ефективних математичних моделей, які математично описують процес випарювання соку у багатокорпусній установці. Розкрито переваги та недоліки математичних моделей, що застосовуються в системі математичного забезпечення контролю оптимізаційних режимів роботи випарної установки. Розглянуто ефективні алгоритми оцінки регресійних коефіцієнтів показників процесу у статичних моделях. З цією метою запропоновано та досліджено алгоритм прискореної ідентифікації, який відрізняється від існуючих вищою швидкістю збіжності та стійкістю за наявності похибок при вимірюванні, що підтвердилося при побудові моделей ТП цукрового виробництва. Застосування даного алгоритму при побудові математичних моделей ТП цукрового виробництва забезпечило досягнення припустимої похибки ідентифікації (10%) за 20-30 тактів. Використання даного алгоритму разом із розробленим алгоритмом адаптивного керування виявилось дуже ефективним під час вирішення завдань стабілізації вихідних змінних роботи випарного відділення, забезпечуючи похибку керування (стабілізації), яка не перевищує 10%.

Ключові слова: адаптивний підхід, статична модель, процес випарювання, оцінка, регресійний коефіцієнт, ідентифікатор.

Liashenko S.O., Fesenko A.M. Application of adaptive approach in control system of evaporation process at sugar factory using static model.

Abstract. The article discusses the control system of the juice evaporation process in evaporator units. A regression model of the evaporation process is analyzed, revealing that the model possesses a number of properties that limit its applicability for control tasks. The

paper addresses the development of mathematical models of the sugar production evaporation process that reflect process dynamics and are based on material and energy balance equations.

The main directions for improving the efficiency of the control system for the dynamic evaporation process are identified, allowing for optimization of juice evaporation modes. The key approaches to determining effective mathematical models that describe the juice evaporation process in a multi-effect evaporator are considered. The advantages and disadvantages of mathematical models used in the mathematical support system for optimizing the evaporator operation modes are outlined.

Effective algorithms for estimating regression coefficients of the juice evaporation process indicators, described by static models, are reviewed. For this purpose, an accelerated identification algorithm is proposed and investigated. This algorithm differs from existing ones by its higher convergence rate and robustness in the presence of measurement errors, as confirmed during the development of sugar production process models.

The application of this algorithm in constructing mathematical models of the sugar production process ensured an acceptable identification error (10%) within 20–30 cycles. The use of this algorithm, in combination with the developed adaptive control algorithm, proved highly effective in solving stabilization problems of output variables in the evaporator section, maintaining a control (stabilization) error not exceeding 10%.

Key words: *adaptive approach, static model, evaporation process, estimation, regression coefficient, identifier.*

Постановка проблеми

Цукрове виробництво є складним комплексом, що відноситься до основних продуктових галузей аграрної промисловості держави. Цукрове виробництво у переробній галузі сільськогосподарського напрямку є одним з найбільш складних та енергозатратних. Підвищення ефективності цукрового виробництва базується на застосуванні найсучасніших технологій виробництва, обладнання, оптимізації режимів роботи, автоматизованих систем керування процесами та обладнанням, а також удосконалення організації цукрового виробництва [1, 2].

Найбільш енергозатратним етапом цукрового виробництва є випарювання цукрового соку у випарній установці. Для підвищення ефективності та оптимізації режимів роботи важливе значення має розробка математичного забезпечення системи керування ТП випарювання. Підвищення ефективності керування процесом випарювання здійснюється шляхом впровадження простих регресійних моделей у математичне забезпечення, що враховують показники перероблюваного соку у випарній установці (ВУ) цукрового заводу [1, 2, 3].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Дослідження динамічних властивостей таких складних об'єктів як випарна установка дуже часто викликає складнощі через нелінійність об'єкта, яка відображається диференційними рівняннями в частинних похідних. Тому часто використовується підхід щодо застосування спрощення опису (лінеаризація в межах робочих режимів, опис об'єктів з розподіленою структурою за допомогою звичайних диференційних рівнянь тощо), що дає можливість уникнути складнощів, які виникають при дослідженні таких систем і отримати ефективні моделі. Необхідно відмітити, що якість систем керування, яка в значній мірі залежить від розрахунку алгоритмів керування, в свою чергу, часто вимагають спрощення моделей.

За результатами статистичного аналізу та застосування кореляційних методів були встановлені зв'язки між вхідними та вихідними параметрами процесу випарювання, а застосування МНК дозволило отримати регресійну модель для БВУ заводу при $R^2 = 0,65 - 0,9$. Як показав розрахунок статистичних критеріїв згоди Фішера і Ст'юдента, отримана модель досить адекватно відображає властивості процесу випарювання [3]. Аналіз регресійної моделі показав, що модель не завжди можна використовувати у системі керування динамічними об'єктами. Тому доцільним став розгляд питання побудови математичних моделей ТП випарювання для цукрового виробництва, що відображають динаміку процесів і засновані на використанні рівнянь матеріального та енергетичного балансів. Отримані моделі використовуються при реалізації систем керування ТП випарювання [4, 5].

У зв'язку зі складністю застосування моделей через нелінійність об'єктів, що описуються, до того ж диференціальними рівняннями у частинних похідних, на практиці виправданим є застосування спрощених моделей, які можуть адекватно відображати реальність процесу випарювання. Це стало основою для дослідження можливості керування динамічними об'єктами за допомогою їхніх статичних моделей та оцінювання отримуваних при цьому втрат. Як показано у роботі, ці втрати визначаються співвідношенням швидкості зміни необхідного значення вихідного сигналу та власних значень матриці стану об'єкта [5, 6].

Наприклад, в певних умовах можливе застосування керування динамічним об'єктом з використанням статичних моделей [7].

Динамічний об'єкт, яким є випарна установка можна відобразити рівняннями

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu; \\ y &= Cx,\end{aligned}\tag{1}$$

де u - керуючий сигнал; y - скалярний вихідний сигнал; x - N - мірний вектор стану; A, B і C - матриця розмірностей $N \times N, N \times 1$ і $1 \times N$ відповідно.

Цей динамічний об'єкт можна відобразити у канонічному вигляді

$$\begin{aligned}\dot{z} &= Az + Bu; \\ y &= Cz,\end{aligned}\tag{2}$$

де $A = \text{diag} \lambda_i$ - діагональна матриця власних значень λ_i ; $z = G^{-1}x$ - вектор канонічних змінних; $B = G^{-1}B_1$; $C = (1, 1, \dots, 1)$; G^{-1} - матриця, зворотна матриці Вандермонда.

Задача керування об'єктом (2) на інтервалі $[0, T]$, з умов мінімуму функціоналу задається наступним чином:

$$F = \frac{1}{T} \int_0^T (y'(t) - y(t))^2 dt,\tag{3}$$

де $y'(t)$ - необхідне значення вихідного сигналу. Відповідно

$$\max_{[0, T]} |y'(t)| \leq \delta.\tag{4}$$

З використанням його статичної моделі

$$\hat{y} = \lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = -CA^{-1}Bu(\infty) = \alpha u(\infty),\tag{5}$$

для необхідного керування $u(t)$

$$u(t) = \frac{y'(t)}{\alpha}\tag{6}$$

можна отримати наступну оцінку втрат

$$\bar{F} \leq KN \lambda_{\min}^{-2} \delta^2,\tag{7}$$

де $\alpha = -CA^{-1}B$; $k = \alpha^{-2} \sum_{i=1}^N (\lambda_i^{-1} c_i b_i)^2$; $\lambda_{\min}$ - мінімальне власне значення.

Відповідно, втрати від керування динамічним об'єктом за допомогою статичної

моделі визначаються відношенням швидкості змін вихідного сигналу $\dot{y}$ та власних значень матриці A об'єкту і при малих значеннях $\dot{y}$ будуть незначними.

Розглянувши загальний критерій керування за умови, що швидкість необхідного вихідного сигналу обмежена, для закону керування за статичною моделлю, втрати від керування динамічним об'єктом за допомогою статичної моделі можна оцінити наступним чином [7, 8]

$$\begin{aligned} |F_2 - P'_{12}| &\leq k_2 \sum_{i=1}^N \left| \frac{\delta}{\lambda_i} \right| \left(\frac{1}{\lambda_i T} (e^{\lambda_i T} - 1) - 1 \right) + \\ &+ k_3 \sum_{i=1}^N \frac{\delta^2}{\lambda_i^2} \left(1 - \frac{2}{\lambda_i T} (e^{\lambda_i T} - 1) + \frac{1}{2\lambda_i T} (e^{2\lambda_i T} - 1) \right) \leq \\ &\leq k_2 \sum_{i=1}^N \left| \frac{\delta}{\lambda_i} \right| + k_3 \sum_{i=1}^N \frac{\delta^2}{\lambda_i^2} \leq N \left(k_2 \frac{\delta}{|\lambda_{\max}|} + k_3 \frac{\delta^2}{\lambda_{\max}^2} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

де

$$F'_{12} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{\beta (y^*(t))^2}{\alpha^2 + \beta} dt. \quad (9)$$

$$k_2 = 2 \frac{\beta \gamma \alpha}{(\alpha^2 + \beta)^2} \sum_{i=1}^N \left| \frac{c_i b_i}{\lambda_i} \right|, \quad (10)$$

$$k_3 = \frac{\alpha^2}{(\alpha^2 + \beta)^2} \sum_{i=1}^N \left(\frac{c_i b_i}{\lambda_i} \right)^2. \quad (11)$$

Таким чином, втрати від керування динамічним об'єктом за допомогою його статичної моделі визначаються відношенням зміни необхідного значення вихідного сигналу до власних значень матриці A . Наявність інформації про властивості моделі об'єкту дає можливість оцінити ці втрати.

Якщо при дослідженні об'єкта присутні перешкоди вимірювань, то задачі як ідентифікації, так і керування ускладнюються. При цьому змінюються і величини втрат при використанні статичної моделі.

З досліджень відомо, що при використанні статичної моделі [4, 7, 8]

$$y = au + Dw + \xi, \quad (12)$$

де w - вектор похибки розмірності $N \times 1$; ξ - скалярна похибка виміру вихідної величини; $D = -CA^{-1}$ - вектор розмірності $1 \times N$.

Відповідно, при обмежених швидкостях змін перешкод, втрати можуть бути оцінені наступним чином:

$$F_1 \leq k_1 \sum_{i=1}^N \frac{(\delta + \gamma_i + (n-1)\gamma_w)^2}{\lambda_i^2} \leq k_1 \cdot N \frac{(\delta + \gamma_i + (N-1)\gamma_w)^2}{\lambda_{\min}^2}, \quad (13)$$

де $k_1 = \alpha^{-2} \sum_{i=1}^N (\lambda_i^{-1} c_i b_i)^2$.

Оскільки $\delta^2 < (\delta + \gamma_i + (N-1)\gamma_w)^2$, то можна зробити висновок, що наявність похибок w та ξ призводить до збільшення втрат при керуванні динамічним об'єктом за

допомогою статичної моделі [7]. У зв'язку з цим для вирішення задачі оптимізації роботи випарної установки найбільш ефективно можна використовувати методи адаптивного керування, де ідентифікація здійснюється у реальному часі і дає можливість оцінити зміни характеристик процесів, що призводить до корекції алгоритму керування. Як результат, підвищується і якість керування.

Формулювання мети досліджень

Метою роботи є підвищення ефективності процесу випарювання соку за рахунок оптимізації режимів роботи випарної установки шляхом розробки та застосування адаптивного керування в системі керування технологічним процесом випарювання.

Для досягнення поставленої мети необхідно проаналізувати існуючі підходи щодо побудови математичних моделей, які застосовуються в системі математичного забезпечення керування ТП випарювання і запропонувати прості моделі, що адекватно та швидко реагують на зміни ТП. Крім того, важливою складовою забезпечення роботи ефективних моделей ТП є розробка адаптивного алгоритму керування, в якому якість керування залежить від точності рішень задач ідентифікації показників та оцінок режимів роботи.

Результати досліджень

Особливості функціонування систем адаптивного керування. Особливості функціонування задачі ТП випарювання полягає в тому, що нелінійність та нестаціонарність рівнянь, які відображають реальні технологічні процеси, приводять до того, що при керуванні такими процесами значення параметрів регулятора вибирають такими, щоб забезпечити найкраще керування в певній компромісній точці. Для оптимізації системи в декількох точках необхідна корекція параметрів регулятора відповідно до змін робочих умов.

Тому урахування нестаціонарності параметрів досліджуваних процесів призводить до необхідності використання адаптивного підходу при керуванні, який забезпечує своєчасну та правильну розробку рішення про зміну керуючих впливів. Ефективне розв'язання задачі пов'язане із введенням у контур керування ідентифікатора, що працює за деяким адаптивним алгоритмом. Система керування працює наступним чином:

- ідентифікатор оцінює в дискретні моменти часу параметри моделі;
- отримана оцінка подається в регулятор для формування керуючого впливу, мінімізуючого відхилення поточного значення виходу об'єкта від необхідного.

У результаті, модель, що була отримана в процесі ідентифікації, виконує роль прогнозуючої моделі, яка дає можливість визначити значення вихідної змінної об'єкту, яке встановлюється на його виході при подачі на вхід певних сигналів. Очевидно, що ефективність процесу керування суттєво залежить від якості отриманих математичних моделей.

Важливою особливістю промислових технологічних процесів, якими необхідно керувати, є високий рівень апріорної невизначеності щодо характеристик об'єкта керування.

Адекватним математичним апаратом для вирішення проблеми синтезу оптимальних законів керування в умовах невизначеності є теорія дискретних адаптивних систем керування, серед яких значного поширення набули адаптивні системи з ідентифікатором у контурі (ACI). Відмінністю традиційної схеми керування є

введення додаткового контуру ідентифікації та блоку налаштування параметрів регулятора [8, 9, 10].

Динамічні моделі можуть бути приведені до моделей у просторі станів, що відображено у вигляді [8, 9, 11]

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax(t) + Bu(t) + Gw(t); \\ y_v &= Cx(t) + Du(t) + Hw(t) + v(t),\end{aligned}\quad (14)$$

де $y_v(t)$ – вектор вимірів; $w(t), v(t)$ – випадкові процеси відповідно в каналах керування та вимірювання, які являють собою білі гауссівські шуми з математичними очікуваннями $M(w)=M(v)=0$, $M(ww^T)=Q_1$, $M(vv^T)=R_1$, $M(wv^T)=N_1$; C, D, H, G – постійні матриці відповідних розмірів (стаціонарний випадок).

Для відділення випарювання, вектори, що входять до опису x, u, w, y_v є такими:

$$x = [\Delta h_1, \Delta h_2, \Delta h_3, \Delta h_4, \Delta h_5]^T$$

- вектор координат стану системи, що створений рівнями розчину в корпусах ВУ;

$$u = [\Delta S_1, \Delta S_2, \Delta S_3, \Delta S_4, \Delta S_5]^T$$

- вектор керування, що містить потоки між відповідними корпусами;

$$w = [\Delta S_0, \Delta W_1, \Delta W_2, \Delta W_3, \Delta W_4, \Delta W_5]^T$$

- вектор збурень, що утворюється витратами вторинної пари по корпусах;

$$y_v = x = [\Delta h_1, \Delta h_2, \Delta h_3, \Delta h_4, \Delta h_5]^T$$

- вектор спостережень, компонентами якого є рівні розчину корпусах ВУ.

Розглядаючи лінійний динамічний стохастичний об'єкт (14) напишемо вираз для виходу у вигляді

$$y(k) = \theta^T q(k) + w(k), \quad (15)$$

де $\theta = (a_1, a_2, \dots, a_{N_A}, b_1, b_2, \dots, b_{N_B})^T$ – вектор параметрів об'єкта;

$q(k) = (-y(k-1), -y(k-2), \dots, -y(k-N_A), u(k-2), \dots, u(k-N_B))^T$ – вектор стану;

$w(k)$ – похибка вимірювання; $k = 0, 1, 2, \dots$ – дискретний час.

Поставимо у відповідність об'єкту модель, що налаштовують у вигляді

$$\hat{y}(k) = \hat{\theta}^T(k-1)q(k), \quad (16)$$

де $\hat{y}(k)$ – вихід моделі; $\hat{\theta}(k-1) = (N_A + N_B)$ – мірний вектор параметрів, що налаштовуються.

До цієї форми можна приводити й інші описи процесів, де здійснюють керування [11].

Тоді, розглядаючи критерій [10],

$$J_k = M\{(y(k) - \hat{y}(k))^2\} = M\{(y(k) - \hat{\theta}^T(k-1)q(k))^2\} \quad (17)$$

і мінімізуючи його за $\hat{\theta}$, приходимо до оптимального по швидкості дії однокрокового алгоритма Качмажа (1.38) [8, 10]:

$$w(k+1) = w(k) - \gamma \frac{e(k+1)}{\| \nabla f(k+1) \|^2} \nabla f(k+1), \quad (18)$$

де $\gamma \in (0, 2)$ – коефіцієнт навчання, а мінімізація критерію

$$J_k = \sum_{i=0}^k (y(i) - \hat{\theta}^T(i-1)q(i))^2,$$

приводить до рекурентного методу найменших квадратів (РМНК).

Отримуючи оцінки невідомих коефіцієнтів математичної моделі, блок налаштування параметрів регулятора здійснює корекцію для того, щоб досягти необхідної якості процесів керування. Таким чином, адаптивний регулятор, що сам

налаштовується, змінює закон регулювання, підлаштовуючи свої коефіцієнти під керований процес.

Розробка та дослідження алгоритму прискореної ідентифікації. Розглянуті динамічні моделі дозволяють досить точно розрахувати керуючі дії за усередненими (за зміну, добу) вихідними даними, проте вони непридатні при оперативному керуванні процесами.

Застосування адаптивного підходу засноване на заміні складної нелінійної моделі лінійною моделлю зі змінними параметрами, оцінювання яких здійснюється у реальному часі. В якості такої моделі зазвичай використовується рівняння псевдолінійної регресії [12, 13], аналогічне (19).

$$y(k) = \theta^T x(k), \quad (19)$$

де $\theta = (\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_m, \theta_{m+1}, \dots, \theta_{m+m}, \dots, \theta_{m+m-m})^T$ – вектор невідомих параметрів;
 $x(k) = (1, u(k-1), \dots, u(k-m), u^2(k-1), u(k-1)u(k-2), \dots, u^2(k-m), \dots, u^q(k-m))^T$

- узагальнений вектор входів.

Зазначимо, що до виду (19) можуть бути приведені різні рівняння, які описують лінійні та нелінійні динамічні об'єкти [11, 14, 15].

У зв'язку з цим до ідентифікатора, що працює в АСІ, висуваються певні вимоги, основними з яких можна вважати наступні [11, 14]:

- алгоритм ідентифікації має забезпечувати збіжність оцінок параметрів до справжніх значень параметрів у всій області дискретних змін вхідних змінних;
- ця збіжність не повинна зникати при включенні регулятора;
- обчислювальна процедура, що реалізує алгоритм, має бути досить простою;
- алгоритм ідентифікації повинен забезпечувати стеження за змінними параметрами об'єкта.

Практично всі рекурентні алгоритми, що використовуються в даний час, отримуються шляхом мінімізації квадратичного функціоналу і використовують при побудові оцінки безпосередні вимірювання вхідних і вихідних сигналів. Існує цілий клас алгоритмів, в яких крім безпосередньо виміряних значень сигналів використовуються їх деякі перетворення або додатково вводяться в алгоритм деякі допоміжні або інструментальні змінні [14, 15].

В якості основної процедура адаптивної ідентифікації використовується зазвичай РМНК

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{P(k-1)q(k)}{1 + q^T(k)P(k-1)q(k)} [y(k) - \hat{\theta}^T(k-1)q(k)], \quad (20)$$

$$P(k) = P(k-1) - \frac{P(k-1)q(k)q^T(k)P(k-1)}{1 + q^T(k)P(k-1)q(k)}, \quad (21)$$

де $P(0) = \alpha I$, $\alpha \gg 0$, і різні його модифікації [14-16], серед яких на тепер розповсюджено використання модифікації, що застосовує експоненціальне зважування інформації:

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{P(k-1)q(k)}{\lambda + q^T(k)P(k-1)q(k)} [y(k) - \hat{\theta}^T(k-1)q(k)]; \quad (22)$$

$$P(k) = \frac{1}{\lambda} \cdot \left[P(k-1) - \frac{P(k-1)q(k)q^T(k)P(k-1)}{\lambda + q^T(k)P(k-1)q(k)} \right], \quad (23)$$

де $\lambda \in 0.995 + 0.999$ - параметр зважування інформації.

У роботах [8, 12] було запропоновано алгоритм, що має властивості РМНК та градієнтного алгоритму з матричним коефіцієнтом посилення:

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \alpha(k)P(k)e(k)x(k) + \beta(k)P(k)e(k)x(k), \quad (24)$$

$$\text{де } P^{-1}(k) = \lambda P^{-1}(k-1) + \gamma x(k)x^T(k), \quad (25)$$

$$\alpha^{-1}(k) = \mu(k) + m x^T(k)P(k)x(k), \mu(k) > 0 \quad (26)$$

$$\hat{\beta}^{-1}(k) = \mu(k) + m\lambda^{-1}(k)P(k-1)x(k), \mu(k) > 0 \quad (27)$$

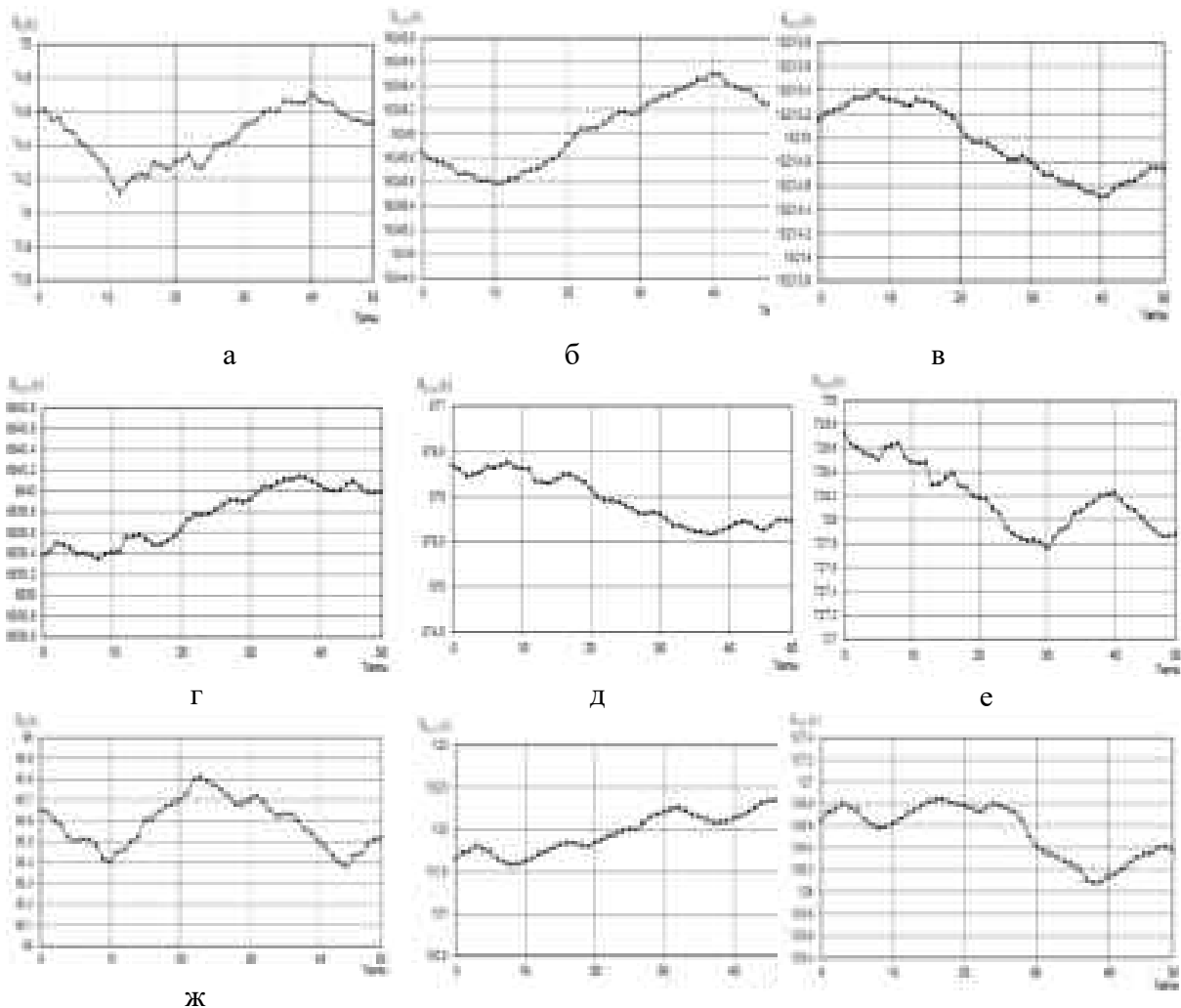
$$m = 2,0 < \lambda \leq 1,2 \leq \gamma\mu(k) \frac{m}{\gamma}, \quad (28)$$

що має вищу швидкість збіжності в порівнянні з РМНК. Дослідження цього алгоритму відображено в роботах [8, 12].

З метою ідентифікації нестационарних процесів у БВУ використовувались алгоритми (22) і (23) з $\lambda = 0,99$. На рис. 1 показана зміна коефіцієнтів $\hat{\theta}_1(k), \hat{\theta}_2(k), \hat{\theta}_3(k), \hat{\theta}_4(k), \hat{\theta}_5(k)$ для регресійної моделі ТП випарювання (29), яка отримана за допомогою методу найменших квадратів (МНК), для випарної установки [4, 8, 12]:

$$Y = 23,7 + 3,86X_1 + 7,21X_2 - 0,95X_3 + 5,28X_4 + 12,7X_5. \quad (29)$$

При побудові регресійної моделі багатокорпусної випарної установки (БВУ) в якості вихідного параметру було вибрано вихід сиропу з БВУ Y , (S_1 , % до н.с.р.), а вхідними параметрами були: X_1 - витрати соку на вході в 1-й корпус БВУ, (S_2 , % до н.с.р.); X_2 - витрата пари в корпусах БВУ, ($G_2, \frac{m}{\text{год}}$); X_3 - температура соку на вході в 1-й корпус БВУ, ($\theta_1, ^\circ\text{C}$); X_4 - температура пари по корпусах БВУ, ($\theta_2, ^\circ\text{C}$); X_5 - рівень розчину в корпусах БВУ, (h_2 , м/ до загальної висоти кип. трубок, %). Крім того, при побудові регресійної моделі користувались й інформаційними показниками, такими як рівень соку у збірнику перед 1-м корпусом БВУ, витратою аміачної води перед БВУ, витратою конденсату ретурної пари і т.д.



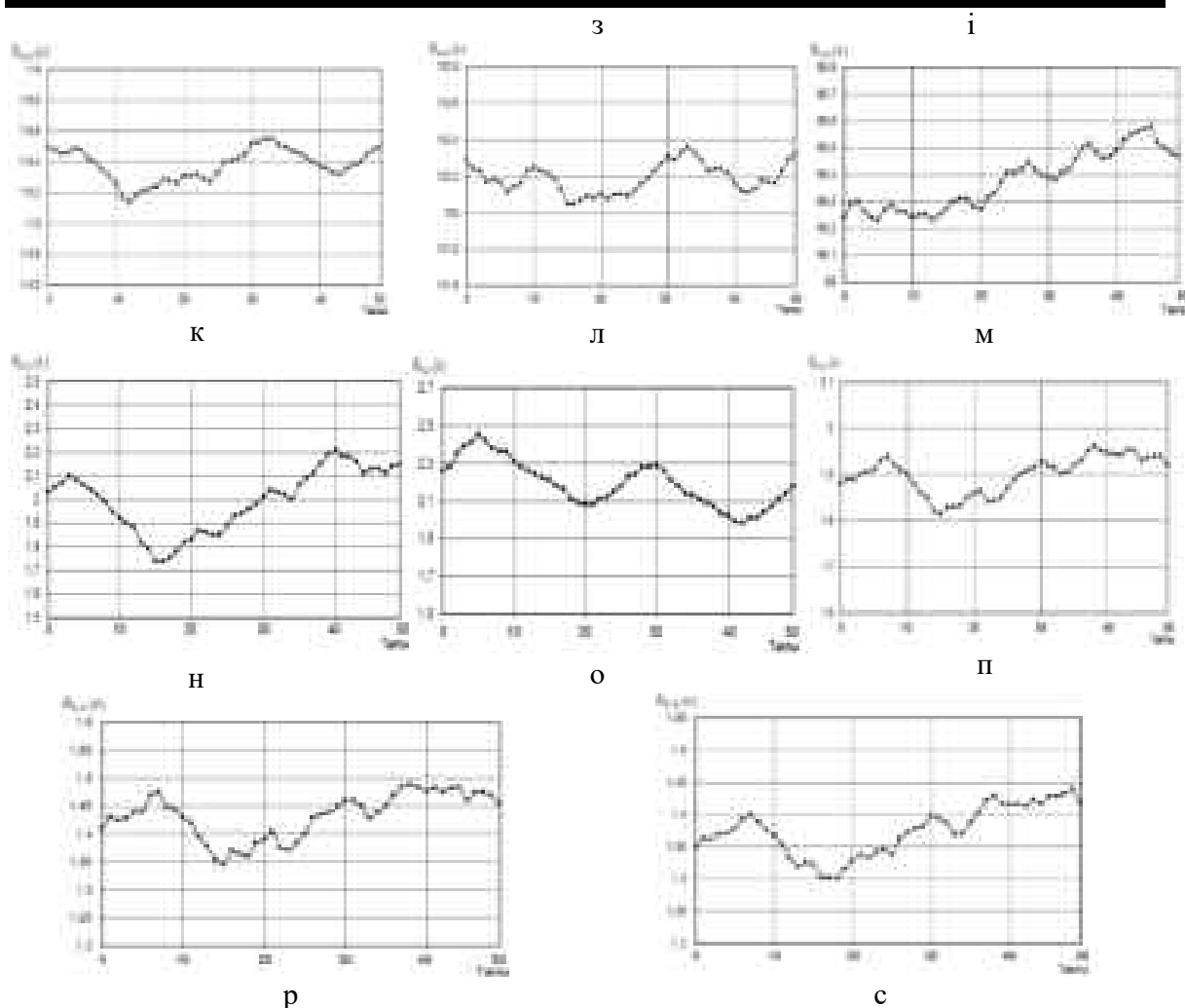


Рис. 1. (а – с) – Зміни регресійних коефіцієнтів моделі (29):

а) для $\hat{\theta}_1(k)$; б-е) для $\hat{\theta}_2^{1-3}(k)$ з 1-го по 5 корпус БВУ; ж) для $\hat{\theta}_1(k)$; з-м) для $\hat{\theta}_4^{1-3}(k)$ з 1-го по 5 корпус БВУ; н-с) для $\hat{\theta}_5^{1-3}(k)$ з 1-го по 5 корпус БВУ

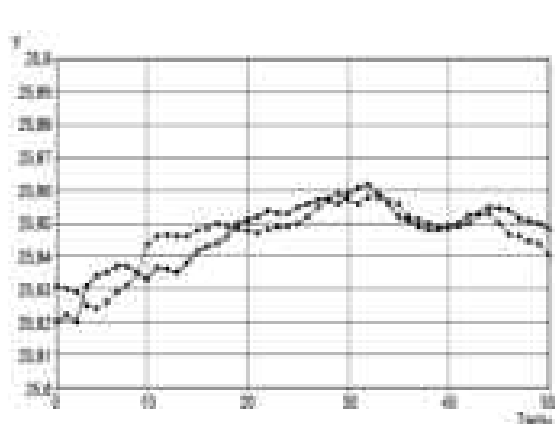


Рис. 2. Зміна виходу сиропу з ВУ

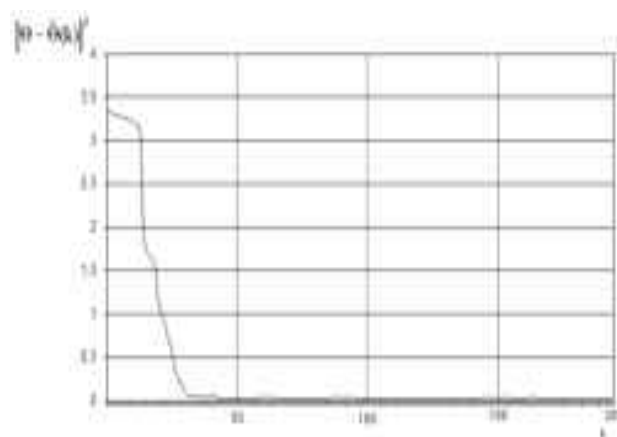


Рис. 3. Якість ідентифікації (зміна норми помилки $\|\theta - \hat{\theta}(k)\|^2$)

На рис. 2 наведена зміна виходу сиропу з БВУ, де суцільною лінією з кружками відображена реальна зміна вихідної змінної (зміна виходу сиропу з ВУ) Y , а пунктирною лінією з квадратами – зміна вихідних параметрів моделей, побудованих за допомогою алгоритмів (22) і (23). На рис. 3 наведена якість ідентифікації процесу випарювання. Помилка ідентифікації була практично нульовою.

Розробка алгоритму адаптивного керування ТП випарювання. Об'єкт керування, який описується статичними моделями, з урахуванням того, що швидкість змін вихідного сигналу обмежена $\max_{t \in [0, T]} |\dot{y}^*(t)| \leq Y$ і при початкових нульових умовах, має вигляд [7, 8, 12]

$$y(t) - y^*(t) = -\frac{\beta y^*(t)}{\alpha^2 + \beta} + \frac{\alpha}{\alpha^2 + \beta} C A^{-1} \int_0^t e^{A(t-\tau)} B \dot{y}^*(\tau) d\tau. \quad (30)$$

Із (30) можна зробити висновок, що в результаті ідентифікації можна отримати математичний опис об'єкта у вигляді (31) [7, 8, 12].

$$\begin{aligned} |y(t) - y^*(t)| &\leq \frac{\beta |y^*(t)|}{\alpha^2 + \beta} + \left| \frac{\alpha}{\alpha^2 + \beta} C A^{-1} A^{-1} (I - e^{At}) B \right| = \\ &= \frac{\beta |y^*|}{\alpha^2 + \beta} + \left| \frac{\sum_{i=1}^N C_i A_i^{-1} b_i A_i^{-1} \delta a (1 - e^{A_i t})}{\alpha^2 + \beta} \right|. \end{aligned} \quad (31)$$

Так як задача керування об'єктом полягає у знаходженні відповідного закону зміни вхідних змінних q , який забезпечив би отримання заданої вихідної величини y^* , то припустимо, що для зміни вихідної величини на $\Delta y(k+1)$ необхідно мати і зміну вихідного вектору на $\Delta q(k+1)$, наприклад:

$$\Delta y(k+1) = \bar{\theta}^T(k) \Delta q(k+1). \quad (32)$$

Для знаходження Δx_{n+1} введемо в розгляд норму

$$\|\Delta q(k+1)\|_A^2 = \Delta q^T(k+1) A \Delta q(k+1), \quad (33)$$

де A - матриця вартості керуючих впливів.

Мінімізація (33) приводить до наступного алгоритму адаптивного керування [7, 12]

$$q(k+1) = \begin{cases} q(k), & |q(k) \cdot \Delta y(k+1)| < \delta(k+1), \\ q^{\max}, & q(k) + \Delta q(k+1) \geq q^{\max}, |q(k) + \Delta q(k+1)| \geq \delta(k+1), \\ q(k) + \frac{\Delta y(k+1)}{\bar{\theta}^T(k) A^{-1} \bar{\theta}(k)}, & q^{\min} < q(k) + \Delta q(k+1) < q^{\max}, \\ q^{\min}, & q(k) + \Delta q(k+1) \leq q^{\min}, |q(k) + \Delta q(k+1)| \geq \delta(k+1). \end{cases} \quad (34)$$

Хоча реалізація цього алгоритму керування не складна, якість керування залежить від точності рішення задачі ідентифікації, тому що в алгоритм керування входять оцінки, які отримані в процесі ідентифікації моделі псевдолінійної регресії (19).

Якщо $y(k) = \bar{\theta}^T q(k)$, а необхідне значення вихідної змінної дорівнює $y^*(k)$, тоді, якщо з N вхідних змінних m є нерегульованими, для компенсації неузгодженості $y^*(k) - y(k)$ на k -му кроці необхідна розробка керуючих впливів, що мають вигляд:

$$q_j(k) = \frac{y^*(k) - \sum_{i=1}^m \theta_i(k-1) q_i(k)}{\sum_{j, i=m+1}^N q_{j,i}^{-1} \theta_j(k-1) \theta_i(m-1)} \sum_{i=m+1}^N q_{j,i}^{-1} \theta_i(k-1).$$

Необхідно відмітити, що при $N - m > 1$ мета керування буде досягнута за один крок, і у подальшому при $y^* = \text{const}$ уточнення коефіцієнтів моделі не здійснюється. Таким чином, одночасна ідентифікація і керування приводять до функціонального зв'язку між m нерегульованими та $(N - m)$ регульованими входами об'єкта. У

результаті виникнення такої кореляції зменшується швидкість процесу ідентифікації, а також можлива і її зупинка, тобто відбувається порушення умов ідентифікації в замкнутому контурі [4, 12, 13, 14]. Це підтверджується наступним чином.

Корекція параметрів здійснюється при наявності неузгодженості

$$\Delta y(k) = \theta^T q(k) - y^* \quad (35)$$

Розглянемо величину $(\Delta y(k))^2$. Підставляючи в (35) необхідні значення $q_j(k) (j = \overline{m+1}, N)$, отримаємо

$$(\Delta y(k))^2 = \left[\sum_{i=1}^m \left(\theta_i - \frac{\sum_{j,l=m+1}^N \theta_j \bar{\theta}_l(k-1) a_{jl}^{-1} \bar{\theta}_l(k-1)}{\sum_{j,l=m+1}^N a_{jl}^{-1} \bar{\theta}_j(k-1) \bar{\theta}_l(k-1)} \right) q_i(k) + \dots \right. \\ \left. + y^* \frac{\sum_{j,l=m+1}^N a_{jl}^{-1} \theta_j \bar{\theta}_l(k-1)}{\sum_{j,l=m+1}^N a_{jl}^{-1} \bar{\theta}_j(k-1) \bar{\theta}_l(k-1)} - 1 \right]^2.$$

Так як $\Delta y(k)$ – випадкова величина, то замість $(\Delta y(k))^2$ розглянемо величину $M\{(\Delta y(k))^2\}$. Тоді, якщо $q_i(k) (i = \overline{1, m})$ статистично незалежні випадкові величини з $M\{q_i\} = 0$, $M\{q_i^2\} = \sigma_q^2 (i = \overline{1, m})$, налаштування коефіцієнтів буде здійснюватися за виконання умови

$$M\{(\Delta y(k))^2\} = \sum_{i=1}^m \left(\theta_i - \frac{\sum_{j,l=m+1}^N a_{jl}^{-1} \theta_j \bar{\theta}_l(k-1) \bar{\theta}_l(k-1)}{\sum_{j,l=m+1}^N a_{jl}^{-1} \bar{\theta}_j(k-1) \bar{\theta}_l(k-1)} \right) \sigma_q^2 + \\ + y^{*2} \left(\frac{\sum_{j,l=m+1}^N a_{jl}^{-1} \theta_j \bar{\theta}_l(k-1)}{\sum_{j,l=m+1}^N a_{jl}^{-1} \bar{\theta}_j(k-1) \bar{\theta}_l(k-1)} - 1 \right)^2 > 0 \quad (36)$$

Як очевидно з (36), процес ідентифікації може зупинитися у разі, коли $\theta_i = \bar{\theta}_i(k-1) (i = \overline{1, N})$, тобто при точному визначенні параметрів об'єкта, так і при виконанні рівностей:

$$\sum_{j,l} a_{jl}^{-1} \theta_j \bar{\theta}_l(k-1) \bar{\theta}_l(k-1) = \sum_{j,l} a_{jl}^{-1} \bar{\theta}_j(k-1) \bar{\theta}_l(k-1) \theta_j, \\ \sum_{j,l} a_{jl}^{-1} \theta_j \bar{\theta}_l(k-1) = \sum_{j,l} a_{jl}^{-1} \theta_j \bar{\theta}_l(k-1) = \sum_{j,l} a_{jl}^{-1} \bar{\theta}_j(k-1) \bar{\theta}_l(k-1).$$

Отриманий вираз (36) є досить загальним і дозволяє встановити умови зупинення процесу ідентифікації в конкретних завданнях для заданого числа регульованих входів, виду матриці вартості A та y^* .

Обговорення

Наявність у системі перешкод призводить до зміни властивостей оцінок, які отримані за допомогою адаптивних алгоритмів ідентифікації, і це ще більше ускладнює роботу ідентифікатора замкнутої системи. Нескладно уявити, що в цьому випадку для забезпечення перебігу процесу ідентифікації дисперсія відхилень вихідних змінних має перевищувати дисперсію перешкод. Наявність перешкоди може призвести до того, що процес ідентифікації не тільки не сходиться, а й почне розходитися. У загальному випадку для забезпечення стійкої роботи ідентифікатора в замкнутому контурі необхідно забезпечити умову стійкого збудження на вході об'єкта, що може бути досягнуто, наприклад, шляхом використання алгоритму керування виду

$$q_j(k) = \frac{y^* - \sum_{i=1}^m \hat{\theta}_i(k-1)q_i(k)}{\sum_{j,l=k+1}^N \alpha_{j,l}^{-1} \hat{\theta}_j(k-1) \hat{\theta}_l(k-1)} \sum_{i=m+1}^N \alpha_{j,i}^{-1} \hat{\theta}_i(k-1) + \zeta_j(k), \quad (37)$$

де $\zeta_j(k)$ - сигнал збурення ($\zeta_j(k) \sim N(0, \sigma_j^2)$).

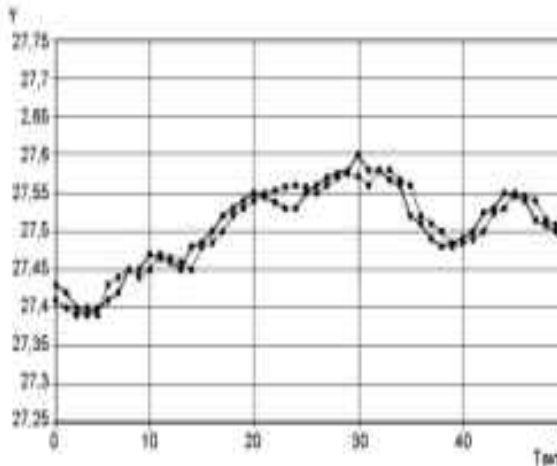


Рисунок 4 – Зміна вихідної змінної
(вихід сиропу з ВУ)

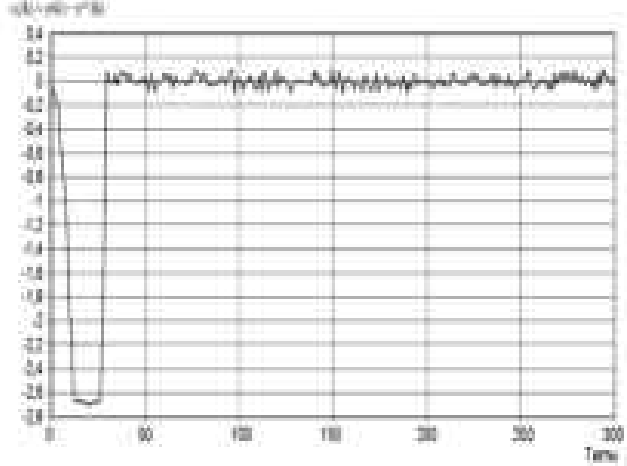


Рисунок 5 – Помилка керування
(вихід сиропу з ВУ)

Процес стабілізації вихідної змінної (вихід сиропу з БВУ) під час використання моделі (29) з допомогою адаптивного алгоритму (34) наведено на рис. 4.

Суцільною лінією з колами відображено реальну зміну вихідних змінних при існуючому керуванні, а пунктирною - при адаптивному. Як і в розглянутому вище випадку на рисунках не відображено перехідний режим (режим ідентифікації), який має приблизно близько 30 тактів.

На рис. 5 показана помилка керування при стабілізації виходу сиропу з ВУ.

Висновки

1. У результаті статистичного аналізу та застосування кореляційних методів були встановлені зв'язки між вхідними та вихідними параметрами процесу випарювання, а застосування МНК дозволило отримати регресійну модель для БВУ заводу при $R^2 = 0,65 - 0,8$. Аналіз отриманої регресійної моделі показав, що модель має ряд властивостей, що обмежують сферу її застосування у завданнях керування. Тому доцільним став розгляд питання побудови математичних моделей ТП випарювання цукрового виробництва, що відображають динаміку процесів і заснованих на використанні рівнянь матеріального та енергетичного балансів. Проведений аналіз динамічних моделей випарного відділення цукрового заводу та синтезу регуляторів на основі моделей у просторі станів свідчить про складність вирішення цього завдання на основі фільтра Калмана, у зв'язку з необхідністю наявності досить великого обсягу апіорної інформації про властивості об'єкта, статистичних властивостей корисних сигналів та похибок. Використання ж у фільтрі неточно заданих коваріаційних матриць призводить до його розбіжності. У зв'язку з тим, що дослідження динамічних властивостей ТП випарювання часто проводити складно через нелінійність об'єктів, що описуються, до того ж диференційними рівняннями у частинних похідних, на практиці виправдовують себе спрощення (лінеаризація на краю робочих режимів тощо). Це стало основою для дослідження можливості керування динамічними об'єктами за допомогою їх статичних моделей та оцінювання отримуваних при цьому втрат. Як

показано у роботі, ці втрати визначаються співвідношенням швидкості зміни необхідного значення вихідного сигналу та власних значень матриці стану об'єкта. Нестационарність процесу випарювання та відсутність достатньої повної статистичної інформації можна враховувати за рахунок реалізації адаптивного керування ТП з ідентифікатором. З цією метою запропоновано та досліджено алгоритм прискореної ідентифікації, який відрізняється від існуючих вищою швидкістю збіжності та стійкістю за наявності перешкод похибок при вимірюванні, що підтвердилося при побудові моделей ТП цукрового виробництва. Застосування даного алгоритму при побудові математичних моделей ТП цукрового виробництва забезпечило досягнення припустимої помилки ідентифікації (10%) за 20-30 тактів. Використання даного алгоритму разом із розробленим алгоритмом адаптивного керування виявилось дуже ефективним під час вирішення завдань стабілізації вихідних змінних роботи випарного відділення, забезпечуючи помилку керування (стабілізації), яка не перевищує 10%.

2. Таким чином, нейромережеві технології, дають можливість вирішити питання, які виникають при роботі зі складними нелінійними об'єктами, або з об'єктами невідомої структури, як наприклад, робота випарної установки, і які не можна вирішити за допомогою звичайних методів адаптивного керування. При цьому, застосування в системі керування математичного забезпечення, з використанням ШНМ, що базуються на можливості самостійного навчання, дають можливість використовувати нейрорегулятори в умовах невизначеності, якими характеризуються технологічні процеси.

Список використаних джерел

1. Штангеев К. О. Энергозбереження на цукрових заводах України. Цукор України. 2014. № 2 (98). С.14-17.
2. Власенко Л. О., Ладанюк А. П. Підвищення ефективності функціонування технологічного комплексу цукрового заводу за рахунок використання методів діагностики та прогнозування. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2010. № 2/3(44). С. 57-62. <http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/handle/123456789/1078>.
3. Ладанюк А. П. Координація функціонування технологічних дільниць цукрового заводу з урахуванням задач прогнозування. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2006. № 6. С. 112-115.
4. Ляшенко С.О., Кісь В.М., Фесенко А.М., Ляшенко О.С. Визначення ефективності математичних моделей процесу випарювання соку для автоматизованих систем управління. Науковий вісник ТДАТУ. Мелітополь. Вип. 9. Том 1. С. 1-20. DOI: 10.31388/2220-8674-2019-1-10.
5. Ляшенко С., Ляшенко А. Интеллектуальное управление технологическими процессами сахарного производства. Motrol. Commission of motorization and energetics in agriculture. Lublin-Rzeszow. 2013. Vol. 15. №7. P. 145-150.
6. Білецький М.С., Безуглов А.О. Інтелектуальні регулятори в системах автоматизації технологічних об'єктів. Матеріали IV Міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами», 22 листопада 2017 року. Київ. НУХТ, 2017. 297 с. URL: <http://nuft.edu.ua/page/view/konferentsii> С. 116-117.
7. Куник Е. Г., Коваленко А. Н., Ляшенко С. А. Управление динамическим объектом с помощью его статической модели. Научно-технический журнал «Радиоэлектроника и информатика». Харків. ХНТУРЭ. 2003. №2. С. 59-60.

8. Руденко О.Г., Бессонов А. А. Адаптивное управление многомерными нелинейными объектами на основе радиально-базисных сетей. Кибернетика и системный анализ. 2005. № 2. С. 9 -18.
9. Ковриго Ю. М., Степанець О. В., Баган Т. Г., Бунке О. С. Сучасна теорія управління. Частина 2. Прикладні аспекти сучасної теорії управління: підручник для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», спеціалізацій «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси та виробництва». Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 155 с. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/23117/1/Suchasna-teoriiaupravlinnia_Kovrygo_et.al.pdf
10. Луцька Н. М. Дослідження та синтез оптимальних регуляторів для систем автоматизації технологічних комплексів неперервного типу : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.13.07 “Автоматизація технологічних процесів”. Київ. 2006. 16 с.
11. Ладанюк А. П., Ладанюк О. А., Бойко Р. О., Іващук В. В., Кроніковський Д. О., Шумігай Д. А. Автоматизація технологічних процесів і виробництв харчової промисловості: монографія. Київ. Інтер Логістик Україна, 2015. 408 с.
12. Ляшенко С. А., Ляшенко А. С. Оценка модели псевдолинейной регрессии. Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы та системы. 2010. № 1(25). С. 36-40.
13. Купін А. І. Сенько А. О., Мисько Б. С. Ідентифікація та автоматизоване керування в умовах процесів збагачувальної технології на основі методів обчислювального інтелекту: 2-ге вид., перероб. і доп. Кривий Ріг: Синельников Д. А., 2019. 298 с.
14. Апостолук В. О., Апостолук О. С. Інтелектуальні системи керування: конспект лекцій. Київ. НТУУ «КПІ», 2008. 88 с.
15. EL Hamidi, Khadija & Mjahed, Mostafa & Elkari, Abdeljalil & Ayad, Hassan. (2020). Adaptive Control Using Neural Networks and Approximate Models for Nonlinear Dynamic Systems. Modelling and Simulation in Engineering. 2020. 10.1155/2020/8642915.
16. Narendra KS, Mukhopadhyay S. Adaptive Control using Neural Networks and Approximate Models. IEEE Trans Neural Netw. 1997; 8(3): 475-85. doi: 10.1109/72.572089. PMID: 18255653.

References

1. Enerhozberezhennia na tsukrovykh zavodakh Ukrainy / K. O. Shtanheiev ta in. Tsukor Ukrainy. 2014. № 2 (98). pp.14-17.
2. Vlasenko L. O. Pidvyshchennia efektyvnosti funktsionuvannia tekhnolohichnoho kompleksu tsukrovoho zavodu za rakhunok vykorystannia metodiv diahnostryky ta prohnozuvannia / V. O. Vlasenko, A. P. Ladaniuk // Vostochno-Evropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohyi. – 2010. - № 2/3(44). – pp. 57-62.: <http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/handle/123456789/1078>
3. Koordynatsiia funktsionuvannia tekhnolohichnykh dilnyts tsukrovoho zavodu z urakhuvanniam zadach prohnozuvannia / A. P. Ladaniuk ta in. Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. 2006. № 6. pp. 112-115.
4. Liashenko S.O., Kis V.M., Fesenko A.M., Liashenko O.S. Vyznachennia efektyvnosti matematychnykh modelei protsesu vypariuvannia soku dlia avtomatyzovanykh system upravlinnia. // Naukovyi visnyk TDAU. Melitopol. Vyp.9. vol.1, pp. 1-20. (DOI: 10.31388/2220-8674-2019-1-10)

5. Liashenko S. Intelligent control of technological processes in sugar production / S. Lyashenko, A. Lyashenko // Motrol. Commission of motorization and energetics in agriculture. - Lublin-Rzeszow, Vol. 15, No. 7. 2013. - P. 145-150.

6. Biletskyi M.S., Bezuhlov A.O. Intelktualni rehulatory v systemakh avtomatyzatsii tekhnolohichnykh ob'ektiv // Materialy IV Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi Internet-konferentsii «Suchasni metody, informatsiine, prohramne ta tekhnichne zabezpechennia system keruvannia orhanizatsiino-tekhnichnymy ta tekhnolohichnymy kompleksamy», 22 lystopada 2017 r. K: NUKhT, 2017. 297 pp. - URL: <http://nuft.edu.ua/page/view/konferentsii> S. 116-117

7. Kunyk E. H. Upravlenye dynamicheskym ob'ektom s pomoshchiu ego statycheskoi modely / E. H. Kunyk, A. N. Kovalenko, S. A. Liashenko // Nauchno-tekhnycheskyi zhurnal «Radyoelektronika y ynformatyka. – Kh. : KhNTURE. – 2003. – №2. – pp. 59-60.

8. Rudenko O.H., Bessonov A. A. Adaptivnoe upravlenye mnohomernymy nelyneinymy ob'ektamy na osnove radyalno-bazysnykh setei // Kybernetyka y systemnyi analiz. No2. 2005. pp. 9 -18.

9. Suchasna teoriia upravlinnia. Chastyna 2. Prykladni aspekty suchasnoi teorii upravlinnia: pidruchnyk dlia stud. spetsialnosti 151 «Avtomatzatsiia ta kompiuterno-intehrovani tekhnolohii», spetsializatsii «Avtomatzovane upravlinnia tekhnolohichnymy protsesamy», «Kompiuterno-intehrovani tekhnolohichni protsesy ta vyrobnytstva» /Iu. M. Kovryho, O. V. Stepanets, T. H. Bahan, O. S. Bunke. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2017. 155 s. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/23117/1/Suchasna-teoriiaupravlinnia_Kovryho_et.al.pdf

10. Lutska N. M. Doslidzhennia ta syntezy optymalnykh rehulatoriv dlia system avtomatyzatsii tekhnolohichnykh kompleksiv neperervnogo typu : avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk : spets. 05.13.07 “Avtomatzatsiia tekhnolohichnykh protsesiv” / N. M. Lutska. – K., 2006. – 16 p.

11. Avtomatzatsiia tekhnolohichnykh protsesiv i vyrobnytstv kharchovoi promyslovosti: [monohrafiia] / A. P. Ladaniuk, O. A. Ladaniuk, R. O. Boiko, V. V. Ivashchuk, D. O. Kronikovskiy, D. A. Shumihai. K.: Inter Lohityk Ukraina, 2015. 408 p.

12. Liashenko S.A. Otsenka modely psevdolyneinoi rehressyy. / S. A. Liashenko, A. S. Liashenko // Naukovo-tekhnichnyi zhurnal «Avtomatyka. Avtomatzatsiia. Elektrotekhichni komplekсы ta systemy». Khersonskyi natsionalnyi tekhnichnyi universytet. – Kherson, 2010. – № 1(25). – pp. 36-40.

13. Kupin A. I. Senko A. O., Mysko B. S. Identyfikatsiia ta avtomatzovane keruvannia v umovakh protsesiv zbahachuvalnoi tekhnolohii na osnovi metodiv obchysluvalnoho intelektu: 2-he vyd., pererob. i dop. Kryvyi Rih: Synielnikov D. A., 2019. 298 p.

14. Apostoliuk V. O., Apostoliuk O. S. Intelktualni systemy keruvannia: konspekt lektsii. K.: NTUU «KPI», 2008. 88 p.

15. EL Hamidi, Khadija & Mjahed, Mostafa & Elkari, Abdeljalil & Ayad, Hassan. (2020). Adaptive Control Using Neural Networks and Approximate Models for Nonlinear Dynamic Systems. Modelling and Simulation in Engineering. 2020. 10.1155/2020/8642915.

16. Narendra KS, Mukhopadhyay S. Adaptive Control using Neural Networks and Approximate Models. IEEE Trans Neural Netw. 1997; 8(3): 475-85. doi: 10.1109/72.572089. PMID: 18255653.

Артёмов М. П.¹,
Анікєєв О. І.¹,
Пастушенко А. С.²,
Калюжний О. Д.¹,
Циганенко М. О.¹,
Пушкаренко О. Ю.¹

¹Державний
біотехнологічний
університет,
м. Харків, Україна
²ВП НУБіП України
"Бережанський
агротехнічний інститут",
м. Бережани, Україна
E-mail:
artiomovprof@ukr.net

ОЦІНКА ДИНАМІКИ НАВАНТАЖЕННЯ ГЛИБОКОРОЗПУШУВАЧА В СИСТЕМІ ГРУНТООБРОБКИ

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-26-201-212>

УДК 631.31

Артёмов М.П., Анікєєв О.І., Пастушенко А.С., Калюжний О.Д.,
Циганенко М.О., Пушкаренко О.Ю. **Аналіз динаміки навантаження
глибокорозпушувача в системі ґрунтообробки.**

Анотація. Орієнтація сучасного сільського господарства на впровадження енергоощадних, раціональних та екологічно безпечних агротехнологій. Останнім часом дедалі більше уваги приділяється збереженню родючості сільськогосподарських земель. Однією з актуальних проблем, що постають перед аграрними підприємствами та фермерами, є надмірне ущільнення ґрунту. Ця проблема зумовлена зростанням масогабаритних характеристик сільськогосподарської техніки, що призводить до ущільнення не лише орного, а й підорного шару ґрунту. Глибина ущільнення залежить від низки чинників, серед яких: маса тракторів, кількість проходів техніки, вологість, тип і фізичний стан ґрунту. Окрім того, інтенсивна оранка на сталій глибині спричиняє формування так званої «плужної підшови», твердість якої перевищує 3,5 МПа. Такий стан ґрунту перешкоджає капілярному підняттю вологи з глибших шарів, що негативно позначається на водозабезпеченні кореневих систем сільськогосподарських культур. Одним із ефективних способів боротьби з ущільненням ґрунту є глибоке розпушування (чизелювання), яке також відоме як вертикальний обробіток. Ця технологія сприяє покращенню водно-повітряного режиму ґрунту й, за певних умов, може слугувати альтернативою традиційній оранці. У даній публікації розглядається динаміка навантаження на глибокорозпушувальний агрегат, що застосовуються для руйнування ущільнених шарів у сучасних системах обробітку ґрунту. Дослідження проводилось із використанням розробленого в університеті вимірювально-реєстраційного комплексу, який забезпечує моніторинг параметрів навантаження на агрегат в режимі реального часу без необхідності модифікації її конструкції. Такий підхід дозволяє отримати достовірні дані для подальшого удосконалення агротехнічних процесів.

Ключові слова: динаміка агрегатів, ущільнення ґрунту, глибокорозпушувач, система обробітку ґрунту, вимірювальний комплекс.

Artiomov M.P., Anikeev O.I., Pastushenko A.S., Kalyuzhnyi O.D., Tsyganenko M.O., Pushkarenko O.Y. **Assessment of load dynamics of subsoiler in tillage system.**

Abstract. Modern agriculture is focused on the introduction of energy-saving, rational and environmentally friendly agricultural technologies. Recently, more and more attention has been paid to preserving the fertility of agricultural land. One of the most pressing issues facing agricultural enterprises and farmers is excessive soil compaction. This problem is caused by the increasing weight and size of agricultural machinery, which leads to compaction of not only the arable but also the subsoil layer. The depth of compaction depends on a number of factors, including the weight of tractors, the number of passes of machinery, moisture, soil type and physical condition. In addition, intensive ploughing at a steady depth results in the formation of a so-called 'plough sole' with a hardness of more than 3.5 MPa. This condition of the soil prevents capillary moisture from rising from deeper layers, which negatively affects the water supply of crop root systems. One of the most effective ways to combat soil compaction is deep loosening (chiselling), also known as vertical tillage. This technology helps to improve the water and air regime of the soil and, under certain conditions, can serve as an alternative to traditional ploughing. This publication examines the load dynamics on deep-rippers used to break up compacted layers in modern tillage systems. The study was carried out using a measuring and recording complex developed at the university, which provides real-time monitoring of machine load parameters without the need to modify its design. This approach allows us to obtain reliable data for further improvement of agricultural processes.

Key words: aggregate dynamics, soil compaction, deep loosener, tillage system, measuring complex.

Постановка проблеми

Проблема деградації ґрунтів давно перебуває в центрі уваги міжнародної наукової спільноти та аграріїв усього світу. Зокрема, питання надмірного ущільнення ґрунту є об'єктом пильного вивчення дослідників із країн Європи та Північної Америки вже протягом кількох десятиліть. Так, відповідно до результатів досліджень, проведених фахівцями Університету штату Огайо, близько 85% ущільнення виникає вже після першого проходу техніки. Крім того, встановлено, що в процесі польових робіт техніка впливає на 40–80% площі поля, а на поворотних смугах рівень ущільнення ще вищий через збільшену кількість проходів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Дослідження багатьох зарубіжних авторів були спрямовані на вивчення впливу різних методів обробітку на фізичні властивості ґрунту та його продуктивність (Wang X., Qi J. та ін.; Yadav G. S. та ін.; McGarry D. та ін.) [1–4]. В українському науковому просторі проблема ущільнення ґрунтів набула актуальності лише після здобуття незалежності. Це зумовлено активним розвитком сільського господарства, зростанням парку сучасної сільськогосподарської техніки, зокрема важких тракторів і комбайнів (М.А. Hamza, та ін.; Булгаков В.М. та ін.) [5, 6].

Сучасні трактори, зернозбиральна техніка та великогабаритні транспортні засоби чинять значний тиск на ґрунт, що обумовлено загальною тенденцією до збільшення їхньої маси. Такий вплив спричиняє ущільнення не лише орного шару, а й

глибших горизонтів ґрунту, часто до глибини понад 1 м. Навіть ущільнення верхнього 20-сантиметрового шару здатне істотно знизити врожайність сільськогосподарських культур.

Глибина ущільнення залежить від комплексу чинників: вологості, гранулометричного складу та стану ґрунту, маси технічного засобу, а також кількості проходів (Кохан А.; Diserens E. та ін.) [7, 8].

Формулювання мети досліджень

Завдання даного дослідження полягає у використанні метода парціальних прискорень для дослідження динаміки ґрунтообробного агрегату у складі енергонасиченого трактора John Deere 9470R та глибокорозпушувача Gaspardo DIABLO-700 через контроль зміни прискорень.

Результати досліджень

У сучасній практиці вирощування сільськогосподарських культур багато господарств впроваджують технології на власний розсуд, часто ігноруючи основні принципи агротехніки, зокрема правила сівозміни. Недотримання цих вимог, а також хаотичне переміщення тракторів, комбайнів і вантажного транспорту полями – особливо в період підвищеної вологості ґрунту навесні – створюють передумови для формування ущільненого шару ґрунту, відомого як плужна підошва. Цей шар характеризується високими показниками твердості, що негативно впливає на розвиток кореневої системи рослин. Ранньовесняні обробки ґрунту в умовах надмірної вологості є особливо ризикованими, оскільки сприяють інтенсивному переущільненню (Janulevičius A., та ін.; Медведєв В. та ін.) [9–11].

Для підтримання оптимальної структури ґрунту та збереження його родючості необхідно здійснювати внесення органічних добрив, а також систематично контролювати показники твердості й щільності ґрунтового профілю.



Рис. 1. Твердомір Ревякіна для визначення твердості ґрунту.

Визначення твердості ґрунту здійснюється за допомогою твердомірів на глибині, яка відповідає глибині виконання відповідної технологічної операції. Існують два

основні методи визначення твердості: органолептичний та інструментальний. У другому випадку застосовується твердомір типу «твердомір Ревякіна» (рис. 1), який дозволяє фіксувати показники твердості за шкалою, що відображається на папері олівцем. Отримані дані дозволяють розраховувати значення твердості в ґрунтовому шарі на глибині від 0 до 400 мм, що є ключовим для аналізу ефективності виконаних агротехнічних операцій.

У ході дослідних робіт, проведених на території господарства ТОВ «Трайгон Фармінг Харків» Богодухівської громади Харківської області, було здійснено вимірювання твердості ґрунту перед виконанням планового глибокого розпушування (табл. 1).

Таблиця 1

Стан ґрунту під час проведення досліджень		
Стан ґрунту	Одиниця вимірювання	Показник
твердість у шарах, см.		
0 – 5	МПа	0.85
5 – 10	МПа	1.87
15 – 20	МПа	2.45
25 - 30	МПа	3.22
вологість ґрунту в шарах, см		
0 – 5	%	17.05
5 – 10	%	20.02
15 – 20	%	23.01
25 - 30	%	28.03

Господарство спеціалізується на рослинництві, а застосовувана в ньому система обробітку ґрунту передбачає періодичне виконання глибокого розпушування. Такий агротехнічний прийом дозволяє руйнувати ущільнений підповерхневий шар (ґрунтову підстилку), що утворюється внаслідок інтенсивної експлуатації полів, і сприяє покращенню фізичної структури ґрунту та запобіганню його подальшому ущільненню.

З урахуванням результатів досліджень, проведених М. Вавіловим на базі Полтавської державної дослідної станції, було підтверджено позитивний вплив глибокого розпушування на продуктивність сільськогосподарських культур. На підставі цих даних у господарстві було прийнято рішення про впровадження машин для глибокого розпушування з метою оптимізації ґрунтових характеристик і підвищення врожайності. Вибір методу основного обробітку ґрунту є особливо важливим, оскільки він впливає на ефективність накопичення вологи, що, своєю чергою, дозволяє реалізувати генетичний потенціал сучасних сортів і гібридів (Кохан А.) [7].

Для протидії ущільненню ґрунту у господарстві застосовують як глибоке розпушування, так і оранку ґрунту. Однією з переваг глибокого розпушування є збереження до 75% пожнивних решток на поверхні поля після обробітку, що відіграє важливу роль у зниженні втрат вологи та захисті ґрунту від ерозійних процесів. Крім того, поєднання розпушування з перемішуванням пожнивних решток у верхньому шарі значно підвищує здатність ґрунту до водопоглинання (Kozicz, J.) [12].

Серед усього спектру ґрунтообробної техніки найбільшим навантаженням під час виконання агротехнічних операцій піддаються чизельні плуги та агрегати для глибокого розпушування (рис.2). Навіть незначні зміни фізико-механічних властивостей ґрунту під час обробітку можуть суттєво вплинути на якість виконання операцій. Водночас ґрунтообробка має низку відомих переваг, серед яких — зменшення витрат

паливно-мастильних матеріалів і зниження загальної енергоємності основного обробітку.



Рис. 2. Грунтообробний агрегат John Deere 9470R+ Gaspardo DIABLO-700.

Глибоке розпушування є економічно вигідною альтернативою традиційній відвальній оранці, частка використання якої в сучасних господарствах поступово скорочується. З огляду на це, виникає необхідність у детальному дослідженні реальних навантажень на глибокорозпушувальні агрегати в процесі виконання даної технологічно складної операції.

Тяговий опір плугів-сирців та інших розпушувальних знарядь, що функціонують на різних глибинах обробітку, залежить від ряду параметрів. Ці залежності можуть бути описані за допомогою аналітичного виразу, подібного до раціональної формули, яка використовується для моделювання тягових характеристик (Ветохін В.) [13].

$$R = fG + kS_k + \varepsilon S_k V^2 \quad (1)$$

де f – коефіцієнт опору руху знаряддя у борозні;

G – вага знаряддя, Н;

k – питомий опір ґрунту, Н/м²;

S_k – площа поперечного перерізу розпушеного шару ґрунту, м²;

ε – коефіцієнт, що залежить від форми робочих органів, властивостей ґрунту та розміру формування;

V – робоча швидкість руху агрегату, м/с.

Водночас запропонована методика визначення тягового опору не враховує складові характеристики ґрунту. У зв'язку з цим Н.В. Щучкін розробив альтернативний підхід, який базується на визначенні коефіцієнта питомого опору ґрунту залежно від його твердості та коефіцієнта зовнішнього тертя між ґрунтом і сталеву поверхню робочого органу. Основою для побудови цієї методики стала раціональна формула, прототипом якої є вираз, запропонований (Ветохін В.) [13].

$$R = fG + mxab, \quad (2)$$

де f – коефіцієнт тертя ґрунту об сталь;

G – вага ґрунтообробного знаряддя, Н;

m – коефіцієнт, що відображає залежність питомого опору від твердості ґрунту;

x – твердість орного шару ґрунту, Па;

a – глибина обробітку ґрунту, м;

b – ширина захвату глибокорозпушувача, м.

Для виконання інженерних розрахунків розглянемо двомасову динамічну систему, яка моделює ґрунтообробний агрегат (Артюмов М.) [14] з чотирма ступенями свободи. Ця система включає:

- ζ та η – поздовжню та поперечну координати центра мас агрегату відповідно;
- ψ_1 – кутовий відхил курсу рами трактора відносно осі ОХ;
- ψ_2 – кут повороту глибокорозпушувача відносно осі його з'єднання з трактором.

Для опису руху динамічної моделі (рис.3) застосовано рівняння Лагранжа другого роду. З метою розв'язання задачі проводиться вимірювання прискорень у двох контрольних точках M_1 та M_2 , що змінюються як функції часу в інтервалі $(0, t)$. Просторові координати зазначених точок є відомими як у глобальній (нерухомій) системі координат $(XOYo)$, так і в локальній, жорстко пов'язаній із машино-тракторним агрегатом, системі $(\bar{x}\bar{o}\bar{y})$.

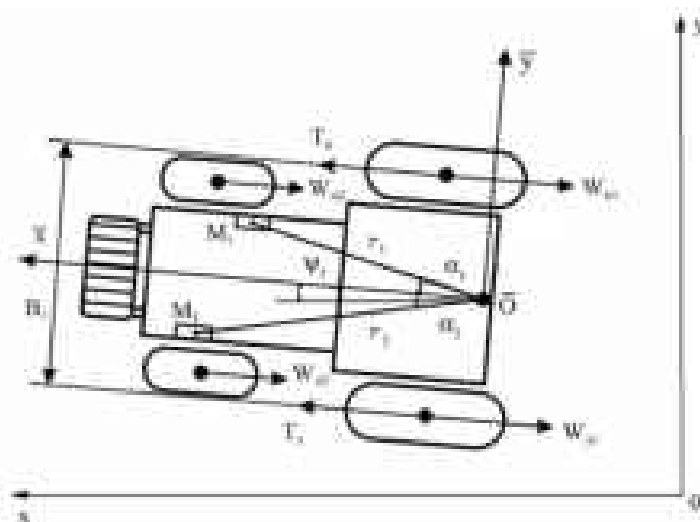


Рис. 3. Розрахункова модель із розташуванням датчиків у контрольних точках M_1 і M_2 на тракторі.

Позначимо компоненти прискорень у цих точках як a_1 та a_2 . Наступним кроком є встановлення зв'язку між компонентами прискорень і узагальненими координатами ζ та η . У випадку плоскопаралельного руху системи прискорення будь-якої точки M можна подати як геометричну суму трьох складових: поступального прискорення центра мас, обертального прискорення навколо центра мас та доцентрового прискорення.

$$\vec{a}_m = \vec{a}_o + \vec{a}_b + \vec{a}_c \quad (3)$$

де $\vec{a}_o$ – прискорення в точці,

$\vec{a}_b$ – прискорення обертання,

$\vec{a}_c$ – відцентрове прискорення.

На основі перетворень, виконаних над виміряними параметрами машини та рівняння (3), отримуємо наступну систему рівнянь

$$\Delta a_x = -\Delta_2 \ddot{\psi}_1 + \Delta_1 \dot{\psi}_1^2, \quad (4)$$

$$\Delta a_y = -\Delta_1 \ddot{\psi}_1 - \Delta_2 \dot{\psi}_1^2, \quad (5)$$

де, відповідно, у рівняннях (4) та (5) ми вводимо позначення

$$\Delta a_x = a_{x1} - a_{x2}, \quad \Delta a_y = a_{y1} - a_{y2}, \quad (6)$$

$$\Delta_1 = r_2 \cos \alpha_2 - r_1 \cos \alpha_1, \quad \Delta_2 = r_2 \sin \alpha_2 + r_1 \sin \alpha_1.$$

Після підстановки усіх складових прискорень та параметрів машини, а також проведення необхідних математичних перетворень і спрощень, отримано лінеаризовану систему рівнянь. Ця система дає змогу здійснити аналітичне визначення динамічних силових характеристик глибокорозпушувача в процесі виконання агротехнічної операції.

$$\begin{cases} m\ddot{\xi} = T - W_1 - W_2 - R_x + R_y\psi_2; \\ m\ddot{\eta} + m_1b_1\ddot{\psi}_1 + m_2b_2\ddot{\psi}_2 = (T - W_1 - W_2)\psi_1 - R_x\psi_2 - R_y; \\ m_1b_1\ddot{\eta} + 2J_1\ddot{\psi}_1 + C(\psi_1 - \psi_2) = 0; \\ m_2b_2\ddot{\eta} + 2J_2\ddot{\psi}_2 - C(\psi_1 - \psi_2) = R_y l - R_x l\psi_2; \end{cases} \quad (7)$$

Для забезпечення достовірності результатів розрахунків скористаємося методикою визначення сили опору робочого органу глибокорозпушувача, запропонованою С. Лещенком та співавт. [15]. У цій моделі враховуються нормальні реакції, сили тертя, швидкісні характеристики руху агрегату, а також інші впливові чинники, що визначають величину загального тягового опору під час роботи знаряддя.

$$R = \sum (N_H + N_R + N_W) + \sum \left[f_G + f_1(N_H + N_R + N_W) + 2f_L(R_{HB} + R_{LR} + R_{LW}) \right] + (K + \varepsilon_B V^2 + \varepsilon_W V^2)(Bh_B + Sh_B + Sh_W), \quad (8)$$

де N_H – горизонтальні складові сил, що діють на долото, Н;

N_R, N_W – опір руху стійки та крил відповідно фронтальний опір, Н;

f_G – сила тертя по дну борозни, Н;

$f_1(N_H + N_R + N_W)$ – горизонтальна складова сил тертя від нормальних сил, Н;

$2f_L(R_{HB} + R_{LR} + R_{LW})$ – горизонтальна та бічна складові сил тертя по бічних поверхнях долота, стійки та крил відповідно, Н;

K – коефіцієнт, що характеризує здатність ґрунту чинити опір деформації;

$\varepsilon_B, \varepsilon_W$ – коефіцієнти, що залежать від форми робочої поверхні долота і крил відповідно, властивостей та розміру ділянки ґрунту, деформованої відповідними елементами;

$(Bh_B + Sh_B + Sh_W)$ – сума активних площ стійки, долота та крил, м².

Після підстановки рівняння (8) у систему рівнянь (7) та програму вимірювально-реєстраційного комплексу, отримаємо результати динаміки сил, що діють на робочі органи. Контрольні випробування були проведені на полі з агрофоном – стерня зернових культур.

У сучасних дослідженнях все ширше застосовуються різноманітні вимірювальні комплекси, які забезпечують реєстрацію діючих навантажень у дистанційному режимі без необхідності втручання в конструкцію машин [16]. Такі підходи підвищують точність експериментальних даних і дозволяють отримувати достовірні характеристики динаміки роботи агрегатів у польових умовах.

У рамках проведеного експерименту датчики вимірювально-реєстраційного комплексу, розробленого колективом науковців ХНТУСГ імені Петра Василенка та ХНАДУ (рис. 4) [16], були встановлені на тракторі в двох точках: ліворуч спереду та праворуч ззаду на рамі. Вимірювання проводилися на контрольній ділянці довжиною 460 м. Швидкість руху агрегату в процесі експерименту змінювалася в межах 8,5–9,6 км/год, при цьому глибина обробки ґрунту складала 45 см.

Отримані дані з акселерометрів зберігалися у пам'яті комп'ютера для подальшої обробки. Особливу цінність для аналізу динамічних характеристик має графік зміни поздовжніх прискорень трактора (вісь x), залежно від часу, фрагмент якого представлено на рисунку 5. Ця частина графіка дозволяє детально проаналізувати

реакцію машини на зміну фізико-механічних властивостей ґрунту та зміну умов роботи.



Рис. 4 Мобільний вимірювально-реєстраційний комплекс: 1 – ПК з авторською програмою; 2, 3 – датчики прискорень MMA 7260QT; 4 – перетворювач для тензоланки

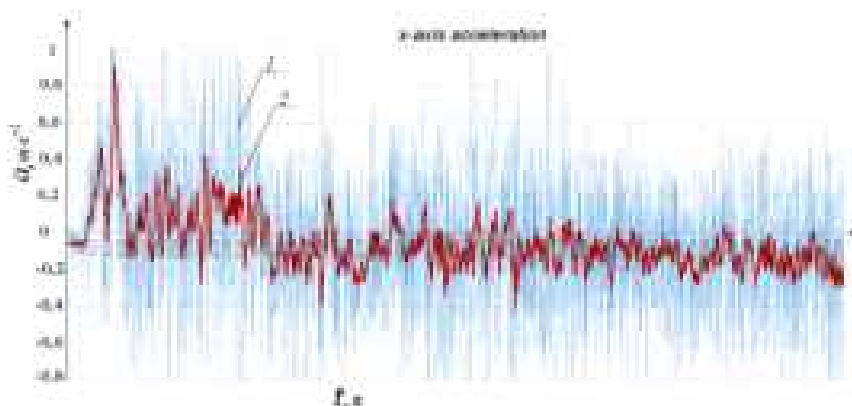


Рис. 5. Залежність поздовжнього прискорення ґрунтообробного агрегату John Deere 9470R+ Gaspardo DIABLO-700 від часу (вісь x) 1 – фактичний сигнал; 2 – сигнал, що пройшов через фільтр Баттерворта.

На рис. 5 представлено масив експериментальних даних, що відображає зміну прискорень уздовж осі x , тобто в напрямку руху машино-тракторного агрегату. Особливу увагу приділено відфільтрованої динаміці прискорень (3), яку було виділено окремо. Це зумовлено високою частотою знімання даних – 50 вимірювань на секунду, що дозволяє отримати детальну картину змін динамічних навантажень у реальному часі.

Обговорення

У даній публікації представлено результати дослідження динаміки навантаження сільськогосподарської машини під час виконання агротехнічної операції. Запропонований підхід дозволяє безпосередньо візуалізувати процес зміни навантаження на робочі органи, що відрізняє його від існуючих розрахункових методик, заснованих на статистичних характеристиках сільськогосподарських машин і агрегатів [2,3,5,7].

Так, у роботі [15] проведено аналітичні розрахунки впливу параметрів глибокого розпушувача на якість обробки ґрунту. Проте у вказаному дослідженні відсутній

аналіз реальних динамічних навантажень, яких зазнає знаряддя у процесі роботи в складі машино-тракторного агрегату. У цьому контексті результати, отримані експериментальним шляхом, мають важливе практичне значення для подальшого вдосконалення конструкцій сільськогосподарських машин і агротехнічних процесів.

За результатами цих розрахунків на основі статистичних даних (R_s) та вимірювань реєстраційно-вимірювального комплексу (R_D) нами було побудовано графік динаміки сили опору глибокорозпушувача залежно від часу (рис. 6).

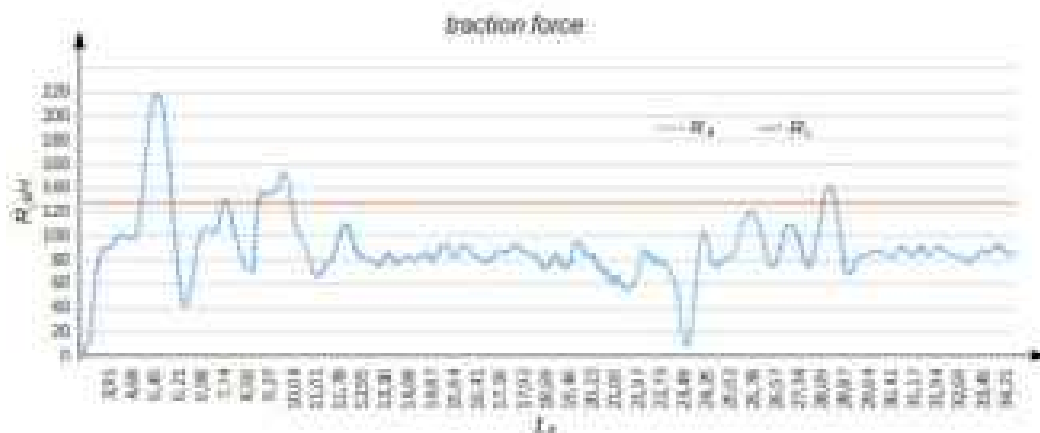


Рис. 6. Динаміка зміни сили опору глибокого розпушувача: R_s – теоретична сила опору; R_D – експериментальна сила опору.

Графік показує динаміку сили опору глибокого розпушувача в момент від початку агротехнічної операції до режиму усталеного руху. Початок графіка чітко демонструє процес переходу з одного стану (спокою) до стану рівномірного руху, більш яскраво демонструє динаміку навантаження. У початковий момент динамічний опір вищий за теоретично розрахований, практично на 60%, а потім після стабілізації руху коливається в межах 78...95 кН, що відповідає 55...70% від теоретично розрахованого значення. Статистичну обробку графіка прискорення машини проводили за допомогою програмного пакету MATLAB 7.0.

Висновки

1. Для ефективної заміни традиційної системи обробітку ґрунту, що базується на застосуванні плужної оранки, доцільно впроваджувати ґрунтозахисні, енергозберігаючі та екологічно безпечні технології обробітку ґрунту і вирощування сільськогосподарських культур. Використання технологій глибокого розпушування сприяє збереженню родючого шару ґрунту та зниженню енерговитрат на одиницю продукції рослинництва.

2. Проведені експериментальні дослідження показали, що на початку роботи агрегату динамічний опір перевищує теоретично розрахований статистичний опір орієнтовно на 60%. Після стабілізації руху тягове навантаження коливається в межах 78...95 кН, що відповідає 55...70% від розрахункового значення. Це дозволяє оптимізувати швидкісний режим роботи агрегату, забезпечити раціональне використання тягових можливостей трактора та зменшити витрати пального на одиницю виконаної роботи.

3. У результаті використання вимірювально-реєстраційного комплексу вдалося здійснити динамічний аналіз сил опору глибокорозпушувача з урахуванням дії сили

тертя, нормальних реакцій та швидкості руху машини. Вимірювання проводились у реальному часі без втручання у конструкцію агрегату, що дозволяє застосовувати методику в умовах реального агровиробництва.

Список використаних джерел

1. Electronic resource - <https://blog.bridgestone-agriculture.eu/what-you-need-to-know-about-soil-compaction-caused-by-your-tractor-tyres/> Free access.
2. Wang, X., Qi, J., Liu, B., Kan, Z., Zhao, X., Xiao, X., & Zhang, H. (2020). Strategic tillage effects on soil properties and agricultural productivity in the paddies of Southern China. *Land Degradation & Development*, 31(10), 1277-1286. <http://dx.doi.org/10.1002/ldr.3519>.
3. Yadav, G. S., Lal, R., Meena, R. S., Babu, S., Das, A., Bhowmik, S. N., Datta, M., Layak, J., & Saha, P. (2019). Conservation tillage and nutrient management effects on productivity and soil carbon sequestration under double cropping of rice in north eastern region of India. *Ecological Indicators*, 105, 303-315. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.08.071>.
4. McGarry, D. Tillage and soil compaction. In: Garcí'a-Torres, Benites, L., Martí'nez-Vilela, A. (Eds.), *Proceedings of the I World Congress on Conservation Agriculture*, Keynote Contributions, vol. 1, October 1–5, 2001, XUL, Co'rdoba, Madrid, pp. 281–291.
5. M.A. Hamza, W.K. Anderson Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research* Volume 82, Issue 2, June 2005, pp 121-145
6. Bulgakov V., Aboltins A., Beloev H., Nadykto V., Kyurchev V. Maximum Admissible Slip of Tractor Wheels Without Disturbing the Soil Structure. *Applied Science*, 2021. V. 11. P. 1–10.
7. Кохан А.В. Ефективність різних способів обробітку ґрунту (Efficiency of different tillage methods). Новейшие агротехнологии; выпуск №1 (4) 2016 электронное научное издание. new_agro@ukr.net.
8. Diserens E., De'fossez P., Duboisset A., Alaoui A. Prediction of the contact area of agricultural traction tyres on firm soil. *Biosystems Engineering*, 110, 2011, pp. 73-82.
9. Janulevičius A., Juostas A., Pupinis G. Estimation of tractor wheel slippage with different tire pressures for 4WD and 2WD driving systems. *Engineering for rural development: 18-th international scientific conference proceedings*, vol. 18, 2019, pp. 88-93.
10. Медведев В., Лындина Т., Лактионова Т. Плотность сложения почв. Генетический, экологический и агрономический аспекты (Soil density. Genetic, ecological and agronomic aspects). Харків, 2004, 244 p.
11. Standard DSTU 4521:2006. Agricultural mobile equipment. Rules for the action of running systems on the soil. Kyiv, 2006.
12. Kozicz, J., Compacting soil with traction mechanisms of aggregates at cultivating cereals and root crops. *Post. Nauk Rol.* 1996. 4, 51–64.
13. Ветохин В.И. Системные и физико-механические основы проектирования рыхлителей почвы: автореф. дис. д-ра техн. наук. (System and physical-mechanical bases of soil loosener design). Глеваха, 2010. 43 с.
14. Артёмов М.П. Динамічна стабільність мобільних сільськогосподарських агрегатів: автореф. дис. д-ра техн. наук. (Dynamic stability of mobile agricultural units). Харків. ХНТУСГ, 2014. 44 с.
15. Лещенко С.М., Сало В.М., Петренко Д.І. Вплив конструктивно-технологічних параметрів глибокорозпушувача на обробіток ґрунту. Конструювання виробництва та експлуатація сільськогосподарських машин (The influence of structural

and technological parameters of the deep loosener on soil cultivation) Кропивницький. 2016, вип.46. С.78 – 87.

16. N. Artimov, R. Antoshchenkov, V. Antoshchenkov, A. Ayubov Innovative approach to agricultural machinery testing. Latvia University of Life Sciences and Technologies, 20th International Scientific Conference Engineering for rural development Proceedings, Volume 20 May 26-28, 2021. С.451-456.

References

1. Electronic resource - <https://blog.bridgestone-agriculture.eu/what-you-need-to-know-about-soil-compaction-caused-by-your-tractor-tyres/> Free access.
2. Wang, X., Qi, J., Liu, B., Kan, Z., Zhao, X., Xiao, X., & Zhang, H. (2020). Strategic tillage effects on soil properties and agricultural productivity in the paddies of Southern China. *Land Degradation & Development*, 31(10), 1277-1286. <http://dx.doi.org/10.1002/ldr.3519>.
3. Yadav, G. S., Lal, R., Meena, R. S., Babu, S., Das, A., Bhowmik, S. N., Datta, M., Layak, J., & Saha, P. (2019). Conservation tillage and nutrient management effects on productivity and soil carbon sequestration under double cropping of rice in north eastern region of India. *Ecological Indicators*, 105, 303-315. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.08.071>.
4. McGarry, D. Tillage and soil compaction. In: Garcí'a-Torres, Benites, L., Martí'nez-Vilela, A. (Eds.), *Proceedings of the I World Congress on Conservation Agriculture, Keynote Contributions*, vol. 1, October 1–5, 2001, XUL, Co'rdoba, Madrid, pp. 281–291.
5. M.A. Hamza, W.K. Anderson Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research* Volume 82, Issue 2, June 2005, pp 121-145
6. Bulgakov V., Aboltins A., Beloev H., Nadykto V., Kyurchev V. Maximum Admissible Slip of Tractor Wheels Without Disturbing the Soil Structure. *Applied Science*, 2021. V. 11. R. 1–10.
7. Kokhan A.V. Efektyvnist riznykh sposobiv obrobittu gruntu (Efficiency of different tillage methods) / Noveishye ahrotekhnolohyy; vypusk №1 (4) 2016 elektronnoe nauchnoe yzdanye. new_agro@ukr.net (In Ukrainian)
8. Diserens E., De'fossez P., Duboisset A., Alaoui A. Prediction of the contact area of agricultural traction tyres on firm soil. *Biosystems Engineering*, 110, 2011, pp. 73-82.
9. Janulevičius A., Juostas A., Pupinis G. Estimation of tractor wheel slippage with different tire pressures for 4WD and 2WD driving systems. *Engineering for rural development: 18-th international scientific conference proceedings*, vol. 18, 2019, pp. 88-93.
10. Medvedev V., Lyndyna T., Laktyonova T. Plotnost slozheniya pochv. Henetycheskyi, ekolohycheskyi y ahronomycheskyi aspekty (Soil density. Genetic, ecological and agronomic aspects). Kharkiv, 2004, 244 p. (In Ukrainian)
11. Standard DSTU 4521:2006. Agricultural mobile equipment. Rules for the action of running systems on the soil. Kyiv, 2006.
12. Kozicz, J., Compacting soil with traction mechanisms of aggregates at cultivating cereals and root crops. *Post. Nauk Rol.* 1996. 4, 51–64.
13. Vetokhyn, V.Y. Systemnye y fizyko-mekhanycheskiye osnovy proektyrovaniya ryzhlytelei pochvy: avtoref. dys. d-ra tekhn. nauk / V.Y. Vetokhyn. (System and physical-mechanical bases of soil loosener design) – Hlevakha, 2010. – 43 s. (In Ukrainian)
14. Artomov M.P. Dynamichna stabilnist mobilnykh silskohospodarskykh ahrehativ: avtoref. dys. d-ra tekhn. nauk / M.P. Artomov (Dynamic stability of mobile agricultural units) – Kh.KhNTUSH, 2014.;44s. (In Ukrainian)

15. Leshchenko S.M., Salo V.M., Petrenko D.I. Vplyv konstruktyvno-tekhnolohichnykh parametriv hlybokorozpushuvacha na obrobitok hruntu / S.M. Leshchenko, V.M. Salo, D.I. Petrenko // Konstruiuvannia vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn (The influence of structural and technological parameters of the deep loosener on soil cultivation) Kropyvnytskyi. 2016, vyp.46. – S.78 – 87. (In Ukrainian)

16. N. Artiymov, R. Antoshchenkov, V. Antoshchenkov, A. Ayubov Innovative approach to agricultural machinery testing // Latvia University of Life Sciences and Technologies, 20th International Scientific Conference Engineering for rural development Proceedings, Volume 20 May 26-28, 2021. S.451-456.

Саган О. Я.

Національний університет
«Львівська політехніка»,
м. Львів, Україна

E-mail:

oleh.y.sahan@lpnu.ua

**МОДЕЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ
СХОДЖЕННЯ СИПКОГО МАТЕРІАЛУ
З ОБЕРТОВОГО КОНУСНОГО ДИСКУ
В УМОВАХ НАДЛИШКОВОГО ТИСКУ**

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-26-213-221>

УДК 631.31

Саган О.Я. Моделирование скорости схождения сыпкого материала с обертОВОГО конусного диска в условиях надлишкового тиску.

Анотація. У статті представлено математичну модель переміщення елементарної частинки сыпкого матеріалу на конусному диску, що обертається зі сталою кутовою швидкістю. Досліджено вплив надлишкового тиску в зоні дозування на траєкторію та динаміку руху частинок. У моделюванні враховано сили тяжіння, тертя, відцентрову та Коріолісову силу, а також вертикальну складову сили тиску. Проведено числове моделювання, результати якого дозволяють обґрунтувати конструкційні та режимні параметри багатокомпонентного дозатора-змішувача для забезпечення рівномірної подачі компонентів. Результати можуть бути використані при проектуванні ефективних систем змішування сыпких матеріалів у хімічній, харчовій та будівельній промисловості.

Ключові слова: моделювання, дозатор-змішувач, конусний диск, надлишковий тиск, дослідження, дозування, метод Рунге-Кутта, швидкість.

Sagan O.Ya. Modeling the rate of descent of bulk material from rotating conical disk under conditions of excess pressure.

Abstract. The paper presents a mathematical model of the movement of an elementary particle of bulk material on a conical disk rotating at a constant angular velocity. The effect of overpressure in the dosing zone on the trajectory and dynamics of particle motion is investigated. The modeling takes into account gravity, friction, centrifugal and Coriolis forces, as well as the vertical component of the pressure force. Numerical modeling was carried out, the results of which allow us to substantiate the design and operating parameters of a multicomponent dosing and mixing device to ensure uniform supply of components. The results can be used to design efficient systems for mixing bulk materials in the chemical, food, and construction industries.

Key words: modeling, batcher-mixer, conical disk, excess pressure, research, dosing, Runge-Kutta method, speed.

Постановка проблеми

Процеси транспортування та змішування сыпких матеріалів відіграють ключову роль у багатьох галузях промисловості, зокрема в агропромисловому комплексі, хімічному та харчовому виробництві. З метою підвищення ефективності таких процесів активно розробляються нові конструкції дозаторів-змішувачів, які забезпечують рівномірне перемішування компонентів та стабільну продуктивність. Особливе місце посідають системи з обертовими елементами, зокрема з конусними дозуючими

дисками, які створюють умови для багатofакторного впливу на частинки – як з боку гравітаційних і відцентрових сил, так і з боку зовнішнього тиску.

При цьому необхідне розв'язання наукової проблеми підвищення ефективності дозування сипких матеріалів на основі дослідження динаміки частинок у полі комплексного силового впливу, особливо в умовах надлишкового тиску, який часто використовується для стабілізації потоку матеріалу та підвищення точності дозування.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Проблема дослідження руху сипких матеріалів у різних умовах актуальна в багатьох галузях техніки, зокрема в аграрному, гірничому, хімічному та харчовому виробництві. Значну увагу науковців привертає задача числового моделювання руху частинок у складних геометріях - таких як бункери, силоси, змішувачі та дозатори.

Початкові дослідження динаміки сипких матеріалів ґрунтувалися на емпіричних підходах, зокрема вивченні навантаження на стінки бункерів та характеру утворення зводів [1, 2]. Згодом з'явилися чисельні методи, зокрема дискретне елементне моделювання (DEM), що дозволяють аналізувати як локальні, так і глобальні характеристики потоку [3, 4].

Встановлено, що геометрія пристрою (конічні, циліндричні, пірамідальні форми), а також спосіб завантаження і розвантаження істотно впливають на характер руху сипкого середовища [5, 6]. DEM дозволяє аналізувати навантаження, тиск, щільність та формування зон застою [7–9].

Із розвитком моделювання стали застосовувати мультифізичні підходи: моделювання теплопереносу [10], дослідження в умовах вакууму чи надлишкового тиску [11, 12]. В останніх публікаціях все більше уваги приділяється калібруванню параметрів DEM на основі експериментальних даних [13–16].

На окрему увагу заслуговують дослідження потоків у змішувачах з обертовими елементами. Зокрема, робота [17] присвячена числовому аналізу руху частинок у роторних системах із конічними дисками, які можуть імітувати роботу дозаторів-змішувачів. У статтях [18, 19] аналізується вплив частоти обертання, сили тиску та конструктивних параметрів диска на кінематику руху матеріалу. Пропонується оптимізація розташування елементів для запобігання застою.

Для систем, що працюють під надлишковим тиском, важливо враховувати зміну контактних сил між частинками, зменшення кутів внутрішнього тертя та зростання густини укладки [20–22]. Це відображається у відповідних DEM-моделях.

Загалом, наукові джерела підтверджують доцільність застосування чисельного моделювання для дослідження гранульованих систем. Проте на сьогоднішній день недостатньо уваги приділено моделюванню руху частинок саме на обертових конусних дисках, особливо в умовах надлишкового тиску, що зумовлює актуальність даного дослідження.

Формулювання мети досліджень

Метою дослідження є розробка математичної моделі швидкості сходження сипкого матеріалу по конусному диску, що обертається, з урахуванням впливу надлишкового тиску в зоні дозування багатокомпонентного дозатора-змішувача.

Результати досліджень

Для визначення характеру руху потоку сипкого матеріалу по поверхні диску, твірною якого під кутом α до горизонталі, і диск обертається з кутовою швидкістю ω , розглянемо модель у вигляді руху матеріальної точки.

Розглянемо сили, які діють на частинку сипкого компонента дисперсного матеріалу, який рухається по поверхні конусного диска (рис. 1). Вибираємо декартову систему координат XYZ . Початок відліку системи координат співпадає з вершиною конусного диска. Вісь X співпадає з твірною конуса диска, вісь Y направлена перпендикулярно твірній конуса і в сторону обертання, вісь Z направлена вертикально вгору і співпадає з віссю обертання конусного диска.

Розглянемо елементарну частинку, як матеріальну точку і складемо диференціальне рівняння руху в векторній формі. Застосовуємо закон Ньютона для отримання рівнянь руху частинки. Підсумовуємо всі сили:

$$m \cdot \ddot{\vec{a}} = \vec{F}_T + \vec{N} + \vec{F}_{\text{ТЕР}} + \vec{F}_{\text{КОР}} + \vec{F}_{\text{ВИЦ}} + \vec{P} \quad (1)$$

На елементарну частинку, що рухається по поверхні конусного диска, діє низка сил: сила тяжіння $F_T = m \cdot g$, направлена вертикально вниз; сила тиску вертикальної складової сипкого компоненту $P = \rho_{kl} \cdot g \cdot h \cdot \pi \cdot R^2$; відцентрова сила, $F_{\text{ВИЦ}} = m \cdot \omega^2 \cdot r$; сила нормальної реакції поверхні N , що діє перпендикулярно до твірної диска; сила тертя $F_{\text{ТЕР}} = f_3 \cdot N$, яка виникає внаслідок взаємодії частинки з поверхнею; а також сила Кориоліса $F_{\text{КОР}} = 2 \cdot m \cdot \omega \cdot \dot{r}$.

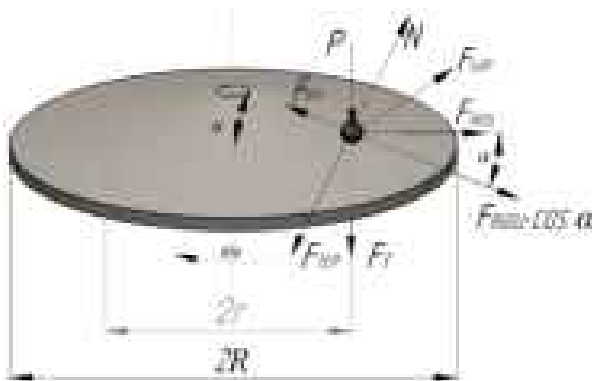


Рис. 1. Схема сил при руху частинки по поверхні конусного диска дозатора-змішувача

Враховуючи вираз для визначення абсолютної швидкості $v = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}$, товщину шару сипкого матеріалу визначимо як [23]:

$$h = \frac{R \cdot h_0}{x \cdot \cos \alpha} \cdot \frac{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}{\dot{x}} \quad (2)$$

Формуємо систему диференціальних рівнянь руху частинки у вигляді:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = m\omega^2 x (\cos(\alpha))^2 + mg \sin(\alpha) + \rho_{kl} g \frac{Rh_0 \sin(\alpha) \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}{x \cos(\alpha)} \frac{\dot{x}}{\dot{x}} \pi R^2 - \\ - f_3 mg \cos(\alpha) \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} - P \frac{Rh_0}{x \cos(\alpha)} \frac{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}{\dot{x}} \frac{\dot{y}}{\omega} \sin(\alpha) , \\ m\ddot{y} = -2m\omega \dot{y} + f_3 mg \cos(\alpha) \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} + f_3 \rho_{kl} g \frac{\pi R^2 h_0 \cos(\alpha) \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}{x \cos(\alpha)} \frac{\dot{x}}{\dot{x}} \end{cases} \quad (3)$$

У системі рівнянь (3) використовують такі параметри: ω – кутова швидкість обертання диска, рад/с; x – радіус до частинки від осі обертання, м; α – кут нахилу твірної конуса, град.; ρ_{kl} – густина сипкого матеріалу, кг/м³; h_0 – зазор між торцем бункера і поверхнею конусного диска, м; g – пришвидження вільного падіння, м/с²; f_3 – коефіцієнт зовнішнього тертя; m – маса частинки, кг.

Система диференціальних рівнянь (3) описує рух частинки на конусному диску в двовимірному просторі з урахуванням сил що діють на частинку.

Розділимо всі складові системи рівнянь (3) на масу m , яку визначаємо як:

$$m = \rho_{kl} \pi x^2 \frac{R h_0}{x \cos(\alpha)} \frac{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}{\dot{x}} \quad (4)$$

Відповідно система диференціальних рівнянь (3) буде:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \omega^2 x (\cos(\alpha))^2 + g \sin(\alpha) + g \frac{R^2 \sin(\alpha)}{x^2} - f_3 g \cos(\alpha) \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} - \\ - P \frac{\dot{y}}{\pi \omega \rho_{kl} x^2} \sin(\alpha), \\ \ddot{y} = -2\omega \dot{y} + f_3 g \cos(\alpha) \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} + f_3 g \frac{R^2 \cos(\alpha)}{x^2}. \end{cases} \quad (5)$$

Дана система рівнянь (5) розв'язується числовим методом. Розв'язок даної системи приведено в середовищі математичного пакету MathCad методом Рунге-Кутта.

Вихідними параметрами моделювання є: діаметр диска 0,1 м; кут твірної конуса $\alpha = 5, 10, 15$ в град.; пришвидження вільного падіння $g = 9,81$ м/с²; кутова швидкість обертання конусного диска $\omega = 400-1400$ об/хв, надлишковий тиск в зоні дозування $P = 0, 50, 100$ КПа.

Варіант вихідних даних і початкових умов в математичному пакеті MathCad приведено на рис. 2.

Вихідні дані

$$g := 9.81 \quad \omega := 1000 \quad R := 0.05 \quad h_0 := 0 \quad f := 0.67$$

$$\alpha := \pi \frac{5}{180} \quad \mu_0 := 0.005$$

$$\omega := \frac{\pi \cdot \omega}{30} \quad \cos(\alpha) = 1 \quad \rho := 6000$$

Постановка і розв'язок

$$y := 200000$$

$$X := \begin{pmatrix} 10 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ початкові умови}$$

Рис. 2. Вихідні дані і початкові умови чисельного розв'язку системи рівнянь (5).

Для реалізації числового методу розв'язку системи диференціальних рівнянь (5), визначаємо вектор початкових умов (рис. 2) і оператор диференціювання $D(t, X)$ (рис. 3), який характеризує праву частину системи (5). Розв'язуємо систему рівнянь з допомогою функції $rkfixed(X, t1, t2, Npoint, D)$, аргументами якої є: X – вектор початкових умов; $t1$ і $t2$ – відповідно початкове і кінцеве значення змінної системи диференціальних рівнянь; $Npoint$ – число розбивок відрізка $[t1; t2]$; D – оператор диференціювання.

Приклад реалізації наведено на рис. 3.

$$D(t, X) := \begin{bmatrix} \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \\ w^2 \cdot \cos(\alpha)^2 \cdot X_0 + g \cdot \sin(\alpha) + g \cdot \frac{\sin(\alpha) \cdot R^2}{(X_0)^2} - f \cdot g \cdot \cos(\alpha) \cdot \frac{X_2}{\sqrt{(X_2)^2 + (X_1)^2}} + \frac{p \cdot X_3 \cdot \sin(\alpha)}{w \cdot (1 - 9.81 \cdot (X_0)^2)} \\ -2 \cdot w \cdot X_3 + f \cdot g \cdot \cos(\alpha) \cdot \frac{X_3}{\sqrt{(X_2)^2 + (X_3)^2}} + f \cdot g \cdot \frac{R^2 \cdot \cos(\alpha)}{(X_0)^2} \end{bmatrix}$$

Рис. 3. Приклад реалізації диференціювання системи рівнянь (5)

Алгоритм числового розв'язку диференціальних рівнянь функція `rkfixed` використовує метод Рунге-Кутта четвертого порядку точності, з вибором великої кількості точок розбиття відрізка змінного параметра забезпечується висока точність результатів розрахунку. Фрагмент результатів даних розв'язку системи рівнянь наведено на рис. 4.

`x := rkfixed(X, 0, 0.0290, 50, D)`

	0	1	2	3	4
25	0.02	0.021	0.022	2.081	0.56
26	0.021	0.022	0.022	2.214	0.534
27	0.021	0.023	0.023	2.354	0.481
28	0.022	0.023	0.024	2.504	0.411
29	0.023	0.024	0.025	2.662	0.414
30	0.023	0.025	0.026	2.831	0.379
31	0.024	0.02	0.026	3.009	0.347
32	0.024	0.021	0.026	3.189	0.328
33	0.025	0.023	0.026	3.401	0.29
34	0.026	0.025	0.026	3.633	0.269
35	0.026	0.027	0.026	3.843	0.243
36	0.027	0.04	0.026	4.084	0.22
37	0.027	0.042	0.03	4.341	0.201
38	0.028	0.045	0.03	4.614	0.183
39	0.028	0.048	0.03	4.904	0.166
40	0.029	0.05	0.03	5.212	...

Рис. 4. Результати розв'язку системи диференціальних рівнянь (5)

Результати розв'язку приведені у вигляді матриці, перший стовпчик характеризує зміну часу (с), другий – зміну координати X переміщення частинки (м), третій – зміну координати Y (м), четвертий – радіальна швидкість частинки (м/с), п'ятий – тангенціальна швидкість частинки (м/с). Моделювання швидкостей за різних значень кутової швидкості обертання і кута твірної диска-дозатора проводили за інтервали часу, що і при моделюванні траєкторії переміщення частинки по поверхні диска-дозатора. Результати моделювання наведено на рис. 5 і 6 для частоти обертання відповідно 400 об/хв і 1400 об/хв.

Аналіз результатів моделювання показав наступне. Характер результуючої швидкості є відмінним від швидкостей радіальної і тангенціальної. За частоти обертання кінцевого диска-дозатора 400 об/хв при надлишковому тиску в зоні сходження матеріалу 100 КПа результуюча швидкість v сходження матеріалу з диска

змінюється від 4,46 м/с до 6,14 м/с за зміни кута твірної конуса від 5° до 15° . Відповідно радіальна швидкість v_x змінюється від 4,39 м/с до 6,1 м/с.

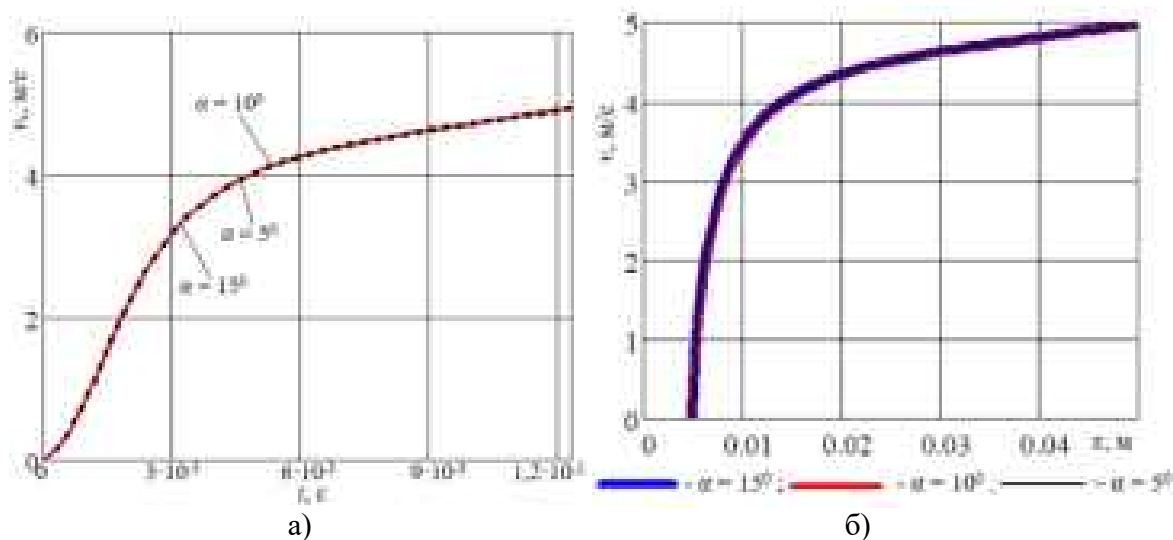


Рис. 5. Результати моделювання швидкості сходження сипкого матеріалу з диска за частоти обертання 400 об/хв і надлишкового тиску 50 КПа при куті твірної конуса відповідно 5° , 10° , 15° : а) – радіальна швидкість; б) – результуюча швидкість

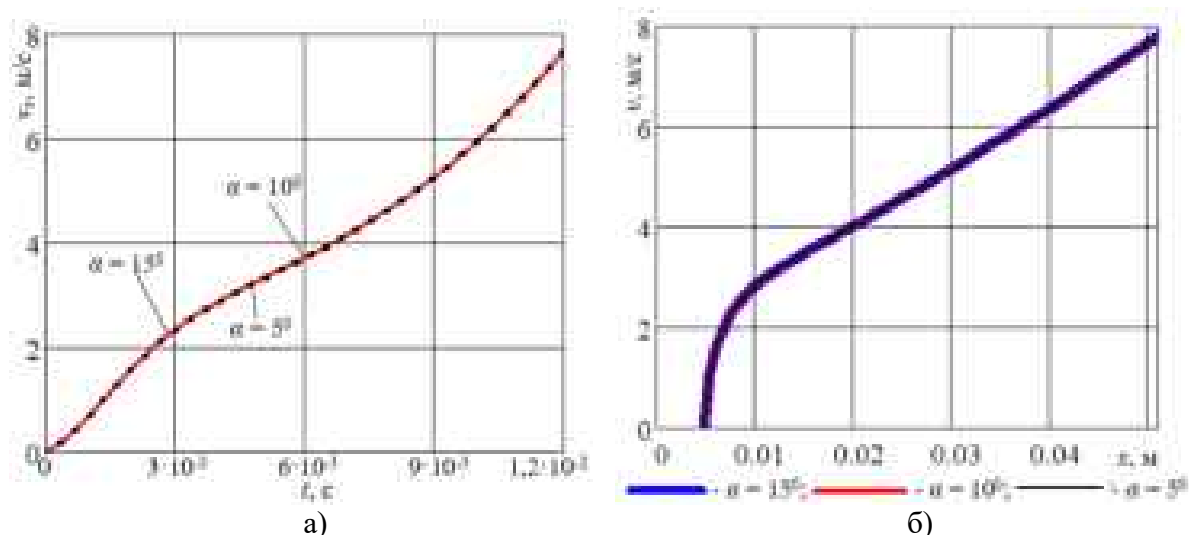


Рис. 6. Результати моделювання швидкості сходження сипкого матеріалу з диска за частоти обертання 1400 об/хв і надлишкового тиску 100 КПа при ку конуса відповідно 5° , 10° , 15° : а) – радіальна швидкість; б) – результуюча швидкість

За частоти обертання конічного диска-дозатора 400 об/хв при атмосферному тиску в зоні сходження матеріалу результуюча швидкість v сходження матеріалу з диска змінюється від 2,25 м/с до 2,54 м/с за зміни кута твірної конуса від 5° до 15° , а радіальна швидкість v_x змінюється відповідно від 2,2 м/с до 2,48 м/с. При надлишковому тиску в зоні сходження матеріалу 50 КПа, відповідно, результуюча швидкість становила від 3,73 м/с до 4,99 м/с, а радіальна швидкість – від 3,65 м/с до 4,94 м/с.

Обговорення

Аналогічно, за частоти обертання конічного диска-дозатора 1400 об/хв при надлишковому тиску в зоні сходження матеріалу 100 КПа результуюча швидкість v сходження матеріалу з диска змінюється від 7,42 м/с до 7,68 м/с за зміни кута твірної конуса від 5^0 до 15^0 . Відповідно радіальна швидкість v_x змінюється від 7,42 м/с до 7,68 м/с. За тієї самої частоти обертання при атмосферному тиску в зоні сходження матеріалу результуюча швидкість v сходження матеріалу з диска змінюється від 7,24 м/с до 7,1 м/с при куті твірної конуса від 5^0 і 15^0 та 7,31 м/с при куті 10^0 , що показує перехід через максимальне значення. Аналогічно і радіальна швидкість v_x змінюється з переходом через максимальне значення при куті 10^0 . Для інших вхідних параметрів такого не спостерігається. При надлишковому тиску в зоні сходження матеріалу 50 КПа, відповідно, результуюча швидкість становила від 7,34 м/с до 7,56 м/с, а радіальна швидкість – від 7,34 м/с до 7,56 м/с.

Висновки

1. Основним параметром впливу на швидкість сходження сипкого матеріалу з конусного диску є частота обертання. Спостерігається нелінійна залежність зміна швидкості сходження матеріалу в залежності від частоти обертання і кута твірної конуса. Тиск в зоні сходження сипкого матеріалу по поверхні диску впливає на радіальну швидкість, із збільшенням тиску радіальна швидкість зростає.
2. Частота обертання диску обмежується фізико-механічною характеристикою матеріалу, зокрема густиною, коефіцієнтом зовнішнього тертя і зернистістю.
3. У результаті проведеного дослідження сформовано цілісну модель динаміки переміщення сипкого матеріалу по обертовому конусному диску з урахуванням надлишкового тиску в зоні дозування. Врахування фізичних факторів, таких як відцентрова сила, сила тяжіння, сила тертя та тиск повітря, дозволило отримати більш достовірну картину поведінки елементарної частинки під час транспортування по робочій поверхні дозатора-змішувача. Отримані залежності будуть використані для раціонального вибору конструктивних та режимних параметрів багатокомпонентного дозатора-змішувача, що сприятиме підвищенню рівномірності змішування компонентів та продуктивності обладнання. Результати дослідження є теоретичною основою для подальших експериментальних перевірок і впровадження в практичні технології переробки сипких матеріалів.

Список використаних джерел

1. Chou C. S., Lee J. H., Chang C. C. Studies on the Flow of Granular Materials in Bunkers and Silos. Powder Technology. 2000. Vol. 109(1). pp. 44-51.
2. Longhi E., Concejero A. C., Morales R. Numerical simulation of granular material flow in a silo. Journal of Fluids Engineering. 2002. Vol. 124(2). pp. 303-310.
3. Chen J. F., Zhang J. F., Liu F. D. Discrete Element Method for Granular Flow Simulation. Journal of Engineering Science and Technology. 2006. Vol. 32(4). pp. 233-245.
4. González-Montellano C., Pérez-Rocha J. F. The Effect of Insertions in the Flow of Granular Materials. Powder Handling and Processing. 2012. Vol. 24(2). pp. 102-108.
5. Magalhães F. G., Costa R. P., Tavares P. A. Influence of Hopper Geometry on Granular Flow. Powder Technology. 2016. Vol. 302. pp. 74-84.
6. Zuriguel I., García-Rojo J. P., Maza D. Experimental and Numerical Studies of Granular Flows in Silos. Physical Review E. 2014. Vol. 89(5). pp. 536-540.

7. Cleary P. W., Sawley, M. L. DEM Modeling of Industrial Granular Flows. Proceedings of the 10th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics. 2002. pp. 823-834.
8. Zhu H., Yu A. Numerical Simulation of Granular Flow with the Discrete Element Method. Chemical Engineering Science. 2003. Vol. 58(6). pp. 1135-1145.
9. Landry J. W., Lee G. M., Gorman J. D. Stress and Flow of Granular Materials in Silos. Journal of Engineering Mechanics. 2004. Vol. 130(1). pp. 22-30.
10. Guo J., Zhao Y., Wu J. B. Simulation of Heat and Mass Transfer in Granular Materials. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2014. Vol. 68. pp. 248-257.
11. An H. Q., Yang X. W., Chen Z. P. Granular Flow Behavior under High-Pressure Conditions. Powder Technology. 2021. Vol. 378. pp. 567-578.
12. Wu Y. P., Sun J. Q., Gao H. T. Simulation of Granular Materials under Excessive Pressure. Journal of Engineering Materials and Technology. 2022. Vol. 144. pp. 101-110.
13. Kobylka R., Przymus S., Szwed T. Modeling of Granular Flow for Different Pressures. Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 37. pp. 89-97.
14. Bembenek M., Gromek J., Malinowski P. Numerical Investigation of Granular Flow with Varying Pressures. International Journal of Mechanical Sciences. 2020. Vol. 105. pp. 98-108.
15. Karwat B., Socha A. M., Żuraw D. Influence of Particle Size on Granular Flow Characteristics in Silos. Journal of Materials Processing Technology. 2019. Vol. 240. pp. 182-192.
16. Baiul K., Garkushin V. D., Kasyanov V. M. Numerical Simulation of Granular Flow in Bunkers under High Pressure. Powder Technology. 2023. Vol. 344. pp. 20-30.
17. Boikov A. V., Peshkov Y. I., Pukinel V. A. Numerical Simulation of Particle Motion in Rotating Conical Disks. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics. 2018. Vol. 44(7). pp. 129-139.
18. Hlosta J., Goma P., Dziubinski M. Analysis of Granular Flow in Rotating Disk Systems. Advances in Powder Technology. 2020. Vol. 31(3). pp. 385-395.
19. Gella D., Górka B., Chmiel W. Kinematics of Granular Flow in Centrifugal Devices. Chemical Engineering Science. 2017. Vol. 154. pp. 347-356.
20. Wang X. W., Zhang Z. P., Zhao L. R. Granular Flow Modeling under Excessive Pressure in Conical Silos. Powder Handling and Processing. 2013. Vol. 26. pp. 200-212.
21. Sun W. W., Li J. X., Zhang C. F. Discrete Element Modeling of Granular Flow with High-Pressure Conditions. Powder Technology. 2020. Vol. 376. pp. 127-135.
22. Wang P. J., Song J. F., Liu Z. X. Modeling the Impact of Pressure on Granular Flow in Bunkers. Journal of Mechanical Science and Technology. 2016. Vol. 30(3). pp. 1234-1242.
23. Дмитрів В.Т., Дмитрів І.В., Городняк Р.В., Саган О.Я. Моделювання сходження сипкого матеріалу з відцентрового конусного дискового дозатора. Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. 2021. Вип. 55. С. 43-51. <https://doi.org/10.23939/istcipa2021.55.043>

References

1. Chou C. S., Lee J. H., Chang C. C. Studies on the Flow of Granular Materials in Bunkers and Silos. Powder Technology. 2000. Vol. 109(1). pp. 44-51.
2. Longhi E., Concejero A. C., Morales R. Numerical simulation of granular material flow in a silo. Journal of Fluids Engineering. 2002. Vol. 124(2). pp. 303-310.
3. Chen J. F., Zhang J. F., Liu F. D. Discrete Element Method for Granular Flow Simulation. Journal of Engineering Science and Technology. 2006. Vol. 32(4). pp. 233-245.

4. González-Montellano C., Pérez-Rocha J. F. The Effect of Insertions in the Flow of Granular Materials. *Powder Handling and Processing*. 2012. Vol. 24(2). pp. 102-108.
5. Magalhães F. G., Costa R. P., Tavares P. A. Influence of Hopper Geometry on Granular Flow. *Powder Technology*. 2016. Vol. 302. pp. 74-84.
6. Zuriguel I., García-Rojo J. P., Maza D. Experimental and Numerical Studies of Granular Flows in Silos. *Physical Review E*. 2014. Vol. 89(5). pp. 536-540.
7. Cleary P. W., Sawley, M. L. DEM Modeling of Industrial Granular Flows. *Proceedings of the 10th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics*. 2002. pp. 823-834.
8. Zhu H., Yu A. Numerical Simulation of Granular Flow with the Discrete Element Method. *Chemical Engineering Science*. 2003. Vol. 58(6). pp. 1135-1145.
9. Landry J. W., Lee G. M., Gorman J. D. Stress and Flow of Granular Materials in Silos. *Journal of Engineering Mechanics*. 2004. Vol. 130(1). pp. 22-30.
10. Guo J., Zhao Y., Wu J. B. Simulation of Heat and Mass Transfer in Granular Materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014. Vol. 68. pp. 248-257.
11. An H. Q., Yang X. W., Chen Z. P. Granular Flow Behavior under High-Pressure Conditions. *Powder Technology*. 2021. Vol. 378. pp. 567-578.
12. Wu Y. P., Sun J. Q., Gao H. T. Simulation of Granular Materials under Excessive Pressure. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 2022. Vol. 144. pp. 101-110.
13. Kobylka R., Przymus S., Szwed T. Modeling of Granular Flow for Different Pressures. *Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 37. pp. 89-97.
14. Bembenek M., Gromek J., Malinowski P. Numerical Investigation of Granular Flow with Varying Pressures. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2020. Vol. 105. pp. 98-108.
15. Karwat B., Socha A. M., Żuraw D. Influence of Particle Size on Granular Flow Characteristics in Silos. *Journal of Materials Processing Technology*. 2019. Vol. 240. pp. 182-192.
16. Baiul K., Garkushin V. D., Kasyanov V. M. Numerical Simulation of Granular Flow in Bunkers under High Pressure. *Powder Technology*. 2023. Vol. 344. pp. 20-30.
17. Boikov A. V., Peshkov Y. I., Pukinel V. A. Numerical Simulation of Particle Motion in Rotating Conical Disks. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*. 2018. Vol. 44(7). pp. 129-139.
18. Hlosta J., Goma P., Dziubinski M. Analysis of Granular Flow in Rotating Disk Systems. *Advances in Powder Technology*. 2020. Vol. 31(3). pp. 385-395.
19. Gella D., Górka B., Chmiel W. Kinematics of Granular Flow in Centrifugal Devices. *Chemical Engineering Science*. 2017. Vol. 154. pp. 347-356.
20. Wang X. W., Zhang Z. P., Zhao L. R. Granular Flow Modeling under Excessive Pressure in Conical Silos. *Powder Handling and Processing*. 2013. Vol. 26. pp. 200-212.
21. Sun W. W., Li J. X., Zhang C. F. Discrete Element Modeling of Granular Flow with High-Pressure Conditions. *Powder Technology*. 2020. Vol. 376. pp. 127-135.
22. Wang P. J., Song J. F., Liu Z. X. Modeling the Impact of Pressure on Granular Flow in Bunkers. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2016. Vol. 30(3). pp. 1234-1242.
23. Dmytriv V.T., Dmytriv I.V., Gorodnyak R.V., Sahan O.Ya. Simulation of Bulk Material Descent From Centrifugal Cone Disc Dispenser. *Industrial Process Automation in Engineering and Instrumentation*. 2021. Vol. 55. pp. 43-51. <https://doi.org/10.23939/istcipa2021.55.043>.

Кусков М. А.

Державний
біотехнологічний
університет, м. Харків,
Україна
E-mail:
0671210957@btu.kharkiv.ua

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ
ПОСІВНОГО МАШИННО-ТРАКТОРНОГО
АГРЕГАТУ У СКЛАДІ ТРАКТОРА ТА
СІВАЛКИ VEGA-8 W PROFI**

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-26-222-234>

УДК 631.362

Кусков М.А. Експериментальні дослідження посівного машинно-тракторного агрегату у складі трактора та сівалки Vega-8 W Profi.

Анотація. В статті наведено результати експериментальних досліджень посівного машинно-тракторного агрегату у складі трактора та сівалки Vega-8 W Profi. Встановлено, що ефективність сільськогосподарських операцій значною мірою залежить від продуктивності МТА. Визначено, що звичайні сільськогосподарські методи вирощування сільськогосподарських культур часто призводять до ущільнення ґрунту та збільшення викидів парникових газів. Під час експериментальних досліджень використано вимірювальну систему динаміки та енергетики мобільних машин. Вимірювальна система призначена для визначення кінематичних, динамічних, потужнісних та енергетичних характеристик мобільних машин та їх елементів при дорожніх, польових і стендових випробуваннях. При I серії досліджень визначався вплив конструктивних параметрів агрегату на динаміку та коливання елементів а також з метою оцінки техніко-економічних показників. При швидкості руху 2,8 м/с найбільший розмах коливань мають прискорення ІВП-3, який встановлено на сніці сівалки. На ці показники впливає близьке розташування вентилятора пневматичної системи сівалки. Основні енергії коливань елементів агрегату знаходяться на частотах 5, 22 та 30-35 Гц. При II серії досліджень визначалися відмінності у коливаннях висівальних апаратів сівалки. Основна енергія коливань (амплітуди віброприскорень) висівних апаратів сівалки знаходиться на частотах 3, 20, 28, 30 Гц при швидкості руху 2,8 м/с. В цьому випадку також найбільший розмах коливань мають прискорення, що визначені датчиком ІВП-3, який встановлено на сніці сівалки. Амплітуди віброприскорень першого та останнього висівальних апаратів на частотах 28-30 Гц нижчі за амплітуди віброприскорень четвертого та п'ятого. Проведені експериментальні дослідження в ПСП дозволили оцінити техніко-експлуатаційні показники посівного агрегату. Показники стану ґрунту задовольняють умовам, що пред'являються до сівби зернових культур. Вологість ґрунту в шарах 0-5 см складала – 21,4 %; 5-10 см – 23,9 %, 10-15 см – 22,9 %. Оптимізація конструктивних параметрів агрегату дозволила покращити техніко-експлуатаційні показники. В модернізованому варіанті посівного МТА збільшена продуктивність на 15 % до 5,2 га/год; погектарна витрата палива знизилась на 0,2 кг/га (18 %) до 2,4 кг/га..

Ключові слова: експериментальні дослідження, посівний агрегат, трактор, сівалка, вимірювальна система, прискорення, техніко-експлуатаційні показники.

Kuskov M. A. Experimental studies of sowing machine-tractor unit consisting of tractor and Vega-8 W Profi seeder.

Abstract. *The article presents the results of experimental studies of the sowing machine-tractor unit consisting of tractor and the Vega-8 W Profi seeder. It has been established that the efficiency of agricultural operations largely depends on the productivity of MTA. It has been determined that conventional agricultural methods of growing crops often lead to soil compaction and increased greenhouse gas emissions. During experimental research, a measuring system for the dynamics and energy of mobile machines was used. The measuring system is designed to determine the kinematic, dynamic, power and energy characteristics of mobile machines and their elements during road, field and bench tests. During the first series of studies, the influence of the design parameters of the unit on the dynamics and oscillations of the elements was determined, as well as in order to assess the technical and economic indicators. At a speed of 2.8 m/s, the acceleration of IVP-3, which is installed on the seeder saddle, has the largest range of oscillations. These indicators are influenced by the proximity of the fan of the pneumatic system of the seeder. The main oscillation energies of the elements of the unit are at frequencies of 5, 22 and 30-35 Hz. During the second series of studies, differences in the oscillations of the seeding units of the seeder were determined. The main energy of oscillations (amplitude of vibration accelerations) of the seeder seeders is at frequencies of 3, 20, 28, 30 Hz at a speed of 2.8 m/s. The amplitudes of vibration accelerations of the first and last seeding units at frequencies of 28–30 Hz are lower than the amplitudes of vibration accelerations of the fourth and fifth. The experimental studies carried out in the PSP made it possible to assess the technical and operational indicators of the sowing unit. Indicators of soil condition meet the conditions for sowing grain crops. Soil moisture in layers of 0-5 cm was 21.4%; 5-10 cm – 23.9 %, 10-15 cm – 22.9 %. Optimization of the design parameters of the unit made it possible to improve technical and operational indicators. In the modernized version of the sowing MTA, productivity was increased by 15% to 5.2 ha/h; Fuel consumption per hectare decreased by 0.2 kg/ha (18%) to 2.4 kg/ha.*

Key words: *experimental research, sowing unit, tractor, seeder, measuring system, acceleration, technical and operational indicators.*

Постановка проблеми

Ефективність сільськогосподарських операцій значною мірою залежить від продуктивності машинно-тракторних агрегатів (МТА) [1]. Ці агрегати, що включають трактори та знаряддя, є основними для обробки ґрунту та сівби, впливаючи на врожайність сільськогосподарських культур та виробничі витрати. Оптимізація продуктивності МТА передбачає врахування таких факторів, як стабільність, енергоефективність та вплив на ґрунт [2, 3]. Дане дослідження зосереджено на експериментальному дослідженні агрегату сівалки-трактор у складі трактора та сівалки VEGA-8 W PROFI, оцінці його робочих параметрів та потенціалу підвищення ефективності сівби.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Звичайні сільськогосподарські методи часто призводять до ущільнення ґрунту та збільшення викидів парникових газів [4]. Використання важкої техніки, такої як трактори, може негативно впливати на структуру ґрунту, перешкоджаючи росту розсади та розвитку сільськогосподарських культур [5]. Крім того, традиційні однофункціональні сівалки можуть бути менш ефективними порівняно з комбінованими ґрунтообробними та посівними машинами, які скорочують цикл роботи та знижують виробничі витрати. Таким чином, комбіновані агрегати, що складаються з

трактора та сільськогосподарської машини, привертають більше уваги для включення таких операцій, як підготовка насіннєвого ложа, посів добрив і пресування, і все це за один прохід [6].

Результати цього дослідження можуть сприяти оптимізації конструкції та експлуатації посівних МТА, що приведе до покращення якості посіву, зниження споживання палива та зменшення ущільнення ґрунту. Розуміючи динаміку та експлуатаційні характеристики посівного МТА у складі трактора та сівалки VEGA-8 W PROFİ, сільськогосподарські практики можуть приймати обґрунтовані рішення для підвищення продуктивності та стійкості [7–9]. Крім того, це дослідження узгоджується з ширшою метою просування природоохоронних методів сільського господарства, які спрямовані на мінімізацію порушення ґрунту та покращення здоров'я ґрунту [10].

Впровадження інноваційних технологій, таких як смуговий обробіток ґрунту та системи точного землеробства, може ще більше підвищити продуктивність МТА [11–17].

Формулювання мети досліджень

Завдання даного дослідження полягає у визначення режимів роботи МТА шляхом проведення експериментальних дослідження посівного агрегату у складі трактора та сівалки Vega-8 W Profi.

Результати досліджень

Експериментальні дослідження посівного МТА ставлять за мету перевірку теоретичних передумов, спрямованих на оцінку коливань траєкторії елементів агрегату на його стійкість руху, прямолінійність, динаміку та енергетичні показники, а також для підтвердження адекватності розробленої математичної моделі динаміки посівного агрегату.

Предметом експериментальних досліджень є теоретичні та методологічні приклади взаємозв'язку коливань елементів посівного машинно-тракторного агрегату, оцінити коливання траєкторій елементів в залежності від динамічних та геометричних параметрів агрегату.

Об'єктом експериментальних досліджень було обрано посівний агрегат у складі трактора та сівалки Vega-8 W Profi (ПАТ «Ельворті», м. Кропивницький) (рис. 1).



Рис. 1. Загальний вигляд посівного агрегату у складі трактора та сівалки Vega-8 W Profi (2)

Експериментальні дослідження проведено на полях площею 54 га Дослідного державного господарства «Кутузівки» Інституту сільського господарства Північного сходу Національної академії природничих наук [7–10].

Сівба сумісних культур кукурудзи, сої та сорго, які висівались при дослідженнях, здійснювалась високопродуктивними сортами: кукурудзи «Соломинська 298 СР», сої – «Хуторяночка», які мали високу лабораторну схожість насіння: 98% та 94% [8]. Сорт сорго, який висівають сумісно з соєю мав назву «Самурай», насіння якого мало також високу лабораторну схожість – 98% [9].

Під час експериментальних досліджень посівного машинно-тракторного агрегату у складі трактора та сівалки Vega-8 W Profi використано вимірювальну систему динаміки та енергетики мобільних машин [11, 12, 14].

Вимірювальна система динаміки та енергетики мобільних машин (ВСДЕММ) відноситься до технічних засобів вимірювань при випробуваннях, діагностування та експлуатаційного контролю. Вимірювальна система (ВС) призначена для визначення кінематичних, динамічних, потужнісних та енергетичних характеристик мобільних машин та їх елементів при дорожніх, польових і стендових випробуваннях [11, 12, 15]. Загальний вигляд вимірювальної системи та датчиків наведено на рис. 2.

Основними складовими частинами вимірювальної системи є (рис. 2): обчислювальний модуль вимірювальної системи; датчики вимірювальної системи; джерело живлення (літієва АКБ).

Обчислювальний модуль призначений для обробки, візуалізації та зберігання даних, що надходять із датчиків. Блок живлення дозволяє вимірювальній системі працювати автономно або отримувати живлення від бортової системи мобільної машини, що проходить експериментальні дослідження.



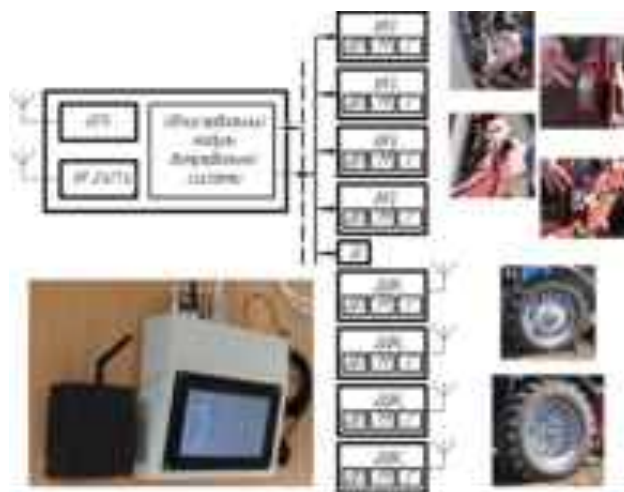
Рис. 2. Загальний вигляд вимірювальної системи та датчиків

Вимірювальна система призначена для визначення кінематичних, динамічних, потужнісних та енергетичних характеристик мобільних машин та їх елементів при дорожніх, польових і стендових випробуваннях [15, 16].

Вона використовується для визначення динамічних та енергетичних властивостей вантажних і легкових автомобілів, автобусів і автопоїздів, тракторів, військової колісної і гусеничної техніки, а також їх елементів у процесі експлуатації, при проведенні автотехнічної експертизи і в інших випадках, що вимагають оперативного контролю стану машини. ВС визначає лінійні прискорення та кутові швидкості обертання навколо осей

симетрії мобільної машини, поступову швидкість, географічне положення, витрату палива, тягове зусилля, швидкості обертання коліс.

Структурну схему ВС, що встановлювалась під час експериментальних досліджень посівного МТА наведено на рис. 3.



ІВП1...ІВП4 – інерційний вимірювальний пристрій (1...4); ДП – датчик прискорення; М – магнітометр; Г – гіроскоп; Q – датчик витрати пального; ДДК1...ДДК4 – датчик динаміки колеса (1...4)

Рис. 3. Схема вимірювальної системи динаміки та енергетики мобільних машин

Кількість та типи датчиків, якими обладнується агрегат при випробуваннях, залежать від її виду і параметрів, що необхідно визначити. Вимірювальна система може обладнуватись інерційними вимірювальними пристроями, що складаються з гіроскопів та датчиків прискорень, кількість яких залежить від кількості елементів мобільної машини або агрегату. Система може обробляти дані з восьми інерційних вимірювальних пристроїв [16, 17].

Схема руху посівного МТА підчас експериментальних досліджень по полю наведена на рис. 4.

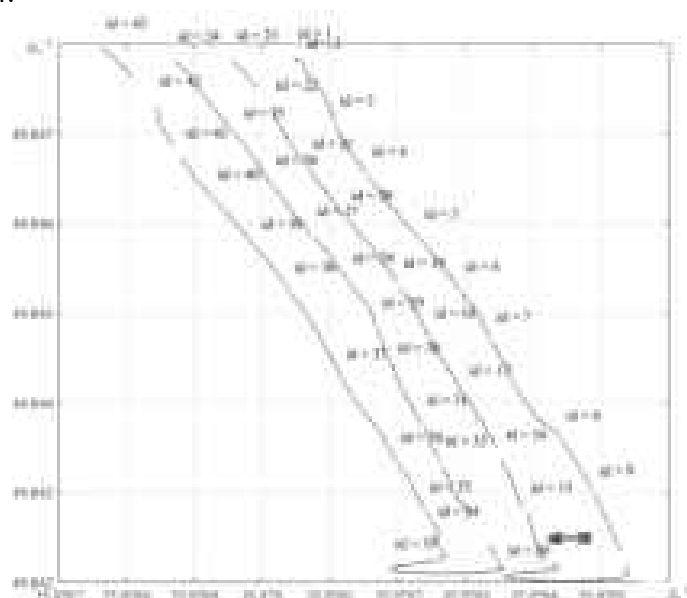
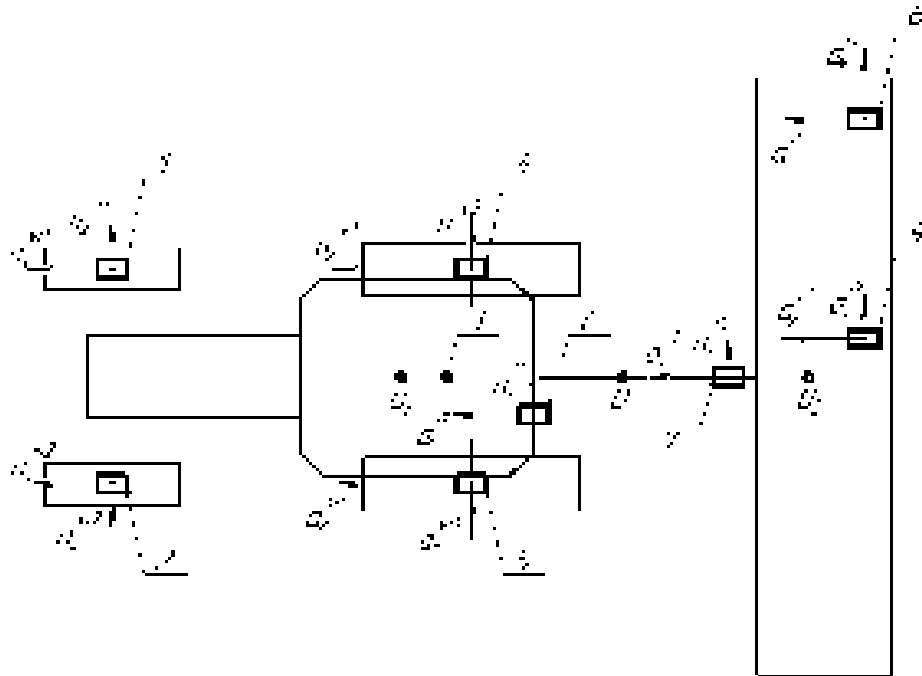


Рис. 4. Схема руху посівного агрегату підчас експериментальних досліджень по полю

При I серії досліджень визначався вплив конструктивних параметрів агрегату на динаміку та коливання елементів а також з метою оцінки техніко-економічних показників. Розташування датчиків на посівному машинно-тракторному агрегаті під час експериментальних досліджень наведено на рис. 5).



1 – датчик динаміки колеса 1 (переднього правого колеса трактора); 2 – датчик динаміки колеса 2 (переднього лівого колеса трактора); 3 – антена приймача GPS; 4 – датчик динаміки колеса 3 (заднього правого колеса трактора); 5 – датчик динаміки колеса 4 (заднього лівого колеса трактора); 6 – інерційний вимірювальний пристрій 1; 7 – інерційний вимірювальний пристрій 3; 8 – інерційний вимірювальний пристрій 4; 9 – інерційний вимірювальний пристрій 2

Рис. 5. Схема розташування датчиків на посівному машинно-тракторному агрегаті під час експериментальних досліджень (I серія досліджень)

Датчик динаміки колеса 1 розташовувався на передньому правому колесі трактора. Датчик динаміки колеса 2 розташовувався на передньому лівому колесі трактора. Антена приймача GPS розташовувалась на даху трактора (у повздовжньо-горизонтальній площині в центрі мас трактора). Датчик динаміки колеса 3 розташовувався на задньому правому колесі трактора. Датчик динаміки колеса 4 – на задньому лівому колесі трактора. Інерційний вимірювальний пристрій 1 – на рамі трактора; інерційний ІВП-3 – на сніці сівалки; ІВП-4 – на крайній (восьмій) секції сівалки; ІВП-2 – на четвертій секції сівалки.

Визначено прискорення елементів посівного агрегату та спектральні щільності амплітуд віброприскорень підчас I серії експериментальних досліджень (рис. 6).

При швидкості руху 2,8 м/с найбільший розмах коливань мають прискорення ІВП-3, який встановлено на сніці сівалки (рис. 6). На ці показники впливає близьке розташування вентилятора пневматичної системи сівалки. Основні енергії коливань елементів агрегату знаходяться на частотах 5, 22 та 30-35 Гц.

При II серії досліджень визначалися відмінності у коливаннях висіваючих апаратів сівалки. Розташування датчиків на посівному машинно-тракторному агрегаті під час II серії експериментальних досліджень наведено на рис. 7.

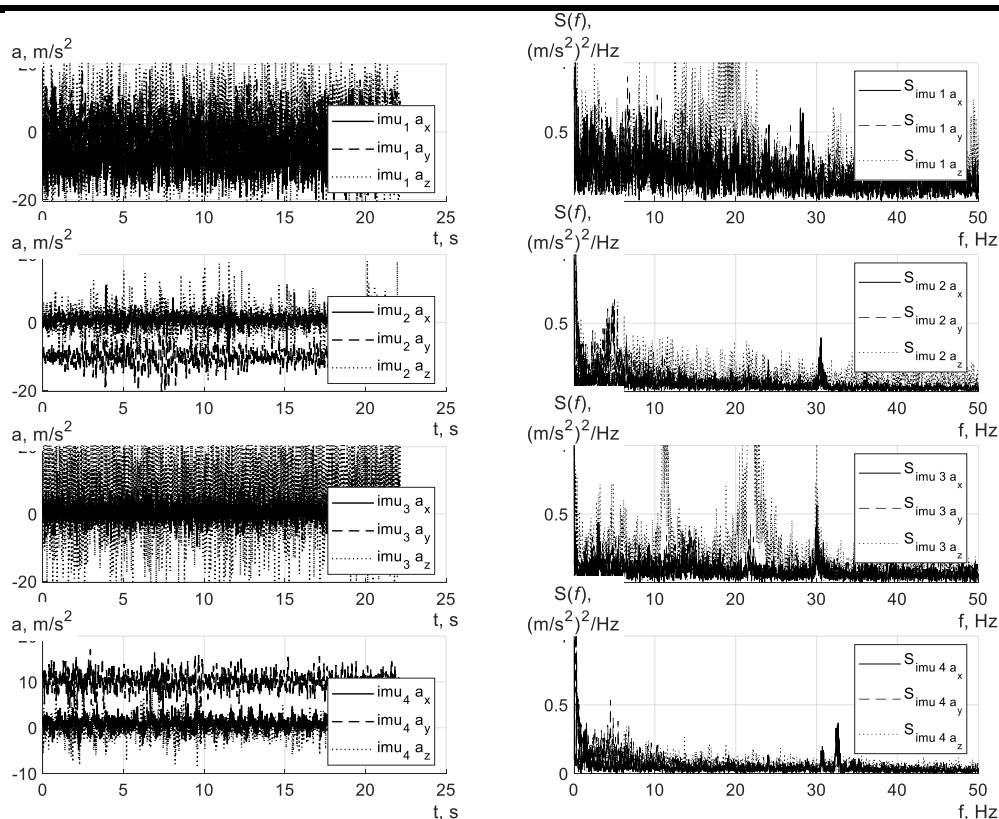
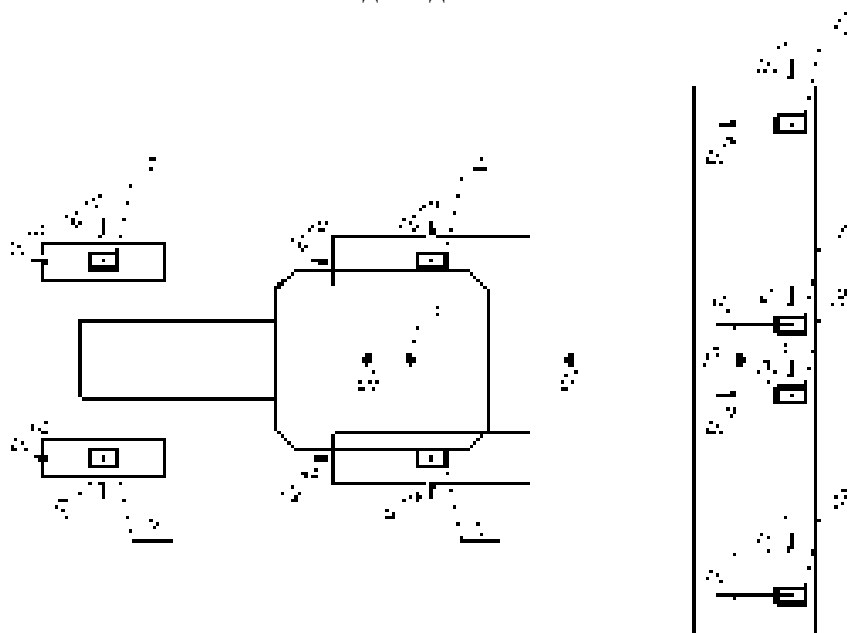


Рис. 6. Прискорення елементів посівного машинно-тракторного агрегату при I серії досліджень



1 – датчик динаміки колеса 1 (переднього правого колеса трактора); 2 – датчик динаміки колеса 2 (переднього лівого колеса трактора); 3 – антена приймача GPS; 4 – датчик динаміки колеса 3 (заднього правого колеса трактора); 5 – датчик динаміки колеса 4 (заднього лівого колеса трактора); 6 – інерційний вимірювальний пристрій 4; 7 – інерційний вимірювальний пристрій 2; 8 – інерційний вимірювальний пристрій 3; 9 – інерційний вимірювальний пристрій 1

Рис. 6. Схема розташування датчиків на посівному машинно-тракторному агрегаті під час експериментальних досліджень (II серія досліджень)

На відміну від I серії досліджень своє розташування змінили виключно інерційно-вимірювальні пристрої. ІВП 1 розташовувався на рамі першого висівального апарату сіялки, ІВП-3 – на рамі четвертого висівального апарату; ІВП-2 – на рамі п'ятого; ІВП-4 – на рамі восьмого висівального апарату сіялки.

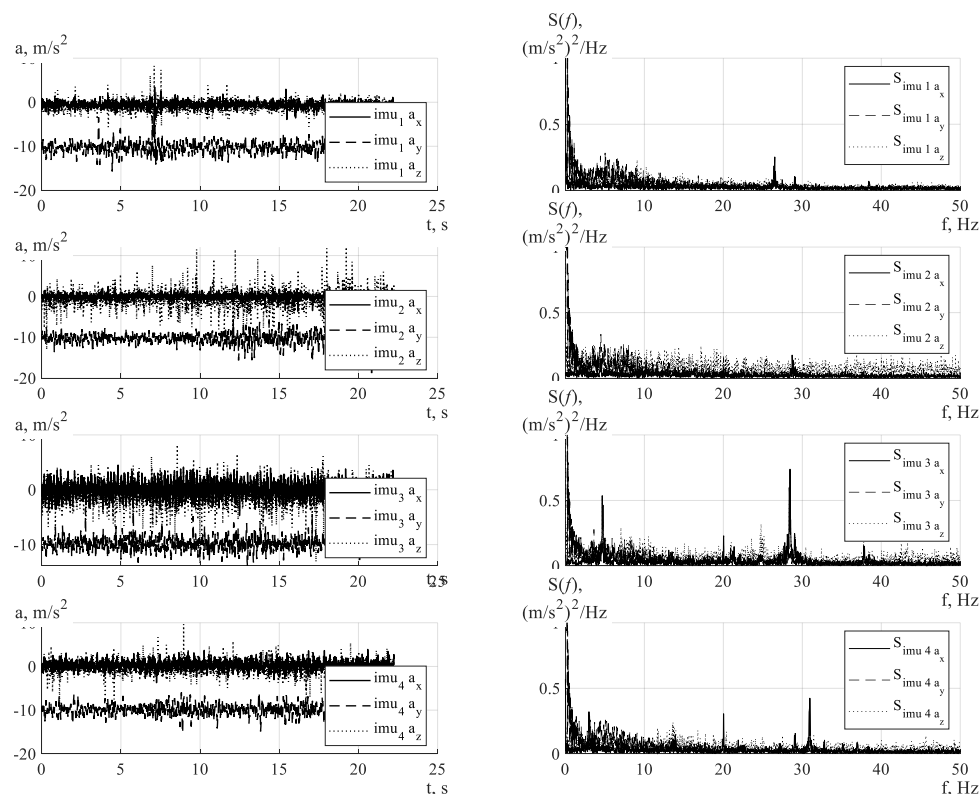


Рис. 7. Прискорення елементів посівного машинно-тракторного агрегату при II серії досліджень

Основна енергія коливань (амплітуди віброприскорень) висівних апаратів сіялки знаходиться на частотах 3, 20, 28, 30 Гц при швидкості руху 2,8 м/с (рис. 7). В цьому випадку також найбільший розмах коливань мають прискорення, що визначені датчиком ІВП-3, який встановлено на сніці сіялки. Амплітуди віброприскорень першого та останнього висівальних апаратів на частотах 28–30 Гц нижчі за амплітуди віброприскорень четвертого та п'ятого.

Полеві дослідження посівного МТА у складі трактора та сіялки Vega-8 W Profi проведено у двох варіантах:

- базовий варіант (налаштування трактора та конструкція сіялки були заводськими);
- модернізований варіант (тиск в колесах трактора збільшений на 0,01 МПа та довжина сніці причіпної сіялки Vega-8 W Profi збільшена на 1 м).

Обговорення

Проведені експериментальні дослідження в Приватному сільськогосподарському підприємстві «Лілія» дозволили оцінити техніко-експлуатаційні показники посівного агрегату при двох серіях досліджень та двох варіантах (табл. 1).

Таблиця 1

Техніко-експлуатаційні показники посівного агрегату у складі трактора та сівалки
Vega-8 W Profi

Найменування показника	Значення	
	Базовий варіант	Модернізований варіант
1	2	3
Марка машини	Трактор + Vega-8 W Profi	
Вид роботи	сівба	
Тип ґрунту за механічним складом	чорнозем суглинистий	
Рельєф	плаский	
Площа поля, га	95	
Довжина гону	1215	
Вологість ґрунту, %		
в шарах, см: 0-5 см	21,4	
5-10 см	23,9	
10-15 см	22,9	
Твердість ґрунту, МПа		
в шарах, см 0-5 см	0,48	
5-10 см	0,02	
10-15 см	0,81	
Ширина захвату:		
середня ширина захвату, см	560	560
середньоквадратичне відхилення, ± см	4,8	4,4
коефіцієнт варіації, %	7,2	6,8
Робоча швидкість, м/с	2,80	3,3
Витрата палива на одиницю виконаної роботи, кг/га	2,6	2,4

Показники стану ґрунту задовольняють умовам, що пред'являються до сівби зернових культур (табл. 1). Вологість ґрунту в шарах 0-5 см складала – 21,4 %; 5-10см – 23,9 %, 10-15см – 22,9 %. Сівба виконувалась після передпосівного обробітку агрегатом ХТЗ-242К + культиватор Джон Дір на глибину 7–11 см.

Оптимізація конструктивних параметрів агрегату дозволила покращити техніко-експлуатаційні показники. В модернізованому варіанті посівного МТА збільшена продуктивність на 15 % до 5,2 га/год; погектарна витрата палива знизилась на 0,2 кг/га (18 %) до 2,4 кг/га.

Висновки

1. Встановлено, що ефективність сільськогосподарських операцій значною мірою залежить від продуктивності МТА. Визначено, що звичайні сільськогосподарські методи вирощування сільськогосподарських культур ґрунту часто призводять до ущільнення ґрунту та збільшення викидів парникових газів. Використання важкої техніки, такої як трактори, може негативно впливати на структуру ґрунту, перешкоджаючи росту розсади та розвитку сільськогосподарських культур. Крім того, традиційні однофункціональні сівалки можуть бути менш ефективними порівняно з комбінованими ґрунтообробними та посівними машинами, які скорочують цикл роботи та знижують виробничі витрати.

2. Експериментальні дослідження посівного МТА ставлять за мету перевірку теоретичних передумов, спрямованих на оцінку коливань траєкторії елементів агрегату на його стійкість руху, прямолінійність, динаміку та енергетичні показники, а також для підтвердження адекватності розробленої математичної моделі динаміки посівного агрегату. Об'єктом експериментальних досліджень було обрано посівний агрегат у складі трактора та сівалки Vega-8 W Profi.

3. Експериментальні дослідження проведено підчас сівби сумісних культур кукурудзи, сої та сорго, які висівались при дослідженнях, здійснювалась високопродуктивними сортами: кукурудзи «Соломинська 298 СР», сої – «Хуторяночка», які мали високу лабораторну схожість насіння: 98% та 94%. Сорт сорго, який висівають сумісно з соєю мав назву «Самурай», насіння якого мало також високу лабораторну схожість – 98%.

4. При I серії досліджень визначався вплив конструктивних параметрів агрегату на динаміку та коливання елементів а також з метою оцінки техніко-економічних показників. При швидкості руху 2,8 м/с найбільший розмах коливань мають прискорення ІВП-3, який встановлено на сніці сівалки. На ці показники впливає близьке розташування вентилятора пневматичної системи сівалки. Основні енергії коливань елементів агрегату знаходяться на частотах 5, 22 та 30-35 Гц.

5. При II серії досліджень визначалися відмінності у коливаннях висіваючих апаратів сівалки. Основна енергія коливань (амплітуди віброприскорень) висіваючих апаратів сівалки знаходиться на частотах 3, 20, 28, 30 Гц при швидкості руху 2,8 м/с. В цьому випадку також найбільший розмах коливань мають прискорення, що визначені датчиком ІВП-3, який встановлено на сніці сівалки. Амплітуди віброприскорень першого та останнього висіваючих апаратів на частотах 28–30 Гц нижчі за амплітуди віброприскорень четвертого та п'ятого.

6. Проведені експериментальні дослідження в ПСП дозволили оцінити техніко-експлуатаційні показники посівного агрегату. Показники стану ґрунту задовольняють умовам, що пред'являються до сівби зернових культур. Вологість ґрунту в шарах 0-5 см складала – 21,4 %; 5-10см – 23,9 %, 10-15см – 22,9 %. Оптимізація конструктивних параметрів агрегату дозволила покращити техніко-експлуатаційні показники. В модернізованому варіанті посівного МТА збільшена продуктивність на 15 % до 5,2 га/год; погектарна витрата палива знизилась на 0,2 кг/га (18 %) до 2,4 кг/га.

Список використаних джерел

1. Al-Sager, S. M., Almady, S. S., Marey, S. A., Al-Hamed, S. A., Aboukarima, A. M. Prediction of Specific Fuel Consumption of a Tractor during the Tillage Process Using an Artificial Neural Network Method. *Agronomy*, 2024. 14(3), 492. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030492>.
2. Moinfar, A. M., Shahgholi, G. Dimensional Analysis of the Tractor Tractive Efficiency Parameters. *Acta Technologica Agriculturae*, 2018. 21(3), 94–99. <https://doi.org/10.2478/ata-2018-0017>
3. Nekhoroshev, D. D., Nekhoroshev, D. A., Kononov, P. V., Yu Popov, A. Wheeled tractors in the agricultural machine-tractor aggregates work efficiency opportunities. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020. 577(1), 012020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/577/1/012020>.
4. Ranjbarian, S., Askari, M., Jannatkah, J. Performance of tractor and tillage implements in clay soil. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2017. 16(2), 154–162. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2015.05.003>
5. Shustik, L., Novokhatskyi, M., Stepchenko, S., Sydorenko, S., Maidanovych, N. Improvement of technical and technological solutions of strip tillage. *Technical and*

Technological Aspects of Development and Testing of New Machinery and Technologies for Agriculture of Ukraine, 2024. 1(34(48)), 75–92. [https://doi.org/10.31473/2305-5987-2024-1-34\(48\)-7](https://doi.org/10.31473/2305-5987-2024-1-34(48)-7)

6. Adamchuk, V., Bulgakov, V., Nadykto, V., Trohaniak, O., Chorna, T. Theoretical study of the stability of asymmetric movement sowing machine-tractor aggregate. *Visnyk Agrarnoi Nauky*, 2023. 101(5), 57–64. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202305-08>.

7. В. І. Мельник, В. І. Пастухов, М. О. Циганенко, О. І. Анікеєв, В. В. Качанов. Нові можливості при сумісних посівах кормових культур. *Інженерія природокористування*, 2018. №2(10). С. 32–36.

8. Мельник В. І. Результати досліджень роботи дослідного зразка спеціалізованої сівалки для сумісних посівів кормових культур / В.І. Мельник, В.І. Пастухов, М.В. Бакум, М.О. Циганенко, С.М. Скофенко, О.А. Романашенко, В.В. Качанов, Д.В. Крохмаль // *Інженерія природокористування*, 2019. № 3(13). 2019. С. 35–42. [https://doi.org/10.37700/enm.2019.3\(13\).35-42](https://doi.org/10.37700/enm.2019.3(13).35-42)

9. В. Мельник, В. Пастухов, М. Циганенко, О. Романашенко, В. Качанов, В. Пахненко. Сумісні посіви кормових культур з застосуванням нової спеціалізованої сівалки Vega-8. *Пропозиція*, 2019. №6. С. 18–22.

10. Viktor Melnyk, Mikola Artiomov, Mykhailo Tsyganenko, Oleksandr Romanashenko, Oleksandr Anikeev. Test results of co-seeding technology for forage production in mix-crop farming system. *Engineering for rural development*, 2021. Vol. 20. PP. 451–456.

11. Антощенко Р. В., Галич І. В., Череватенко Г. І. Динаміка та енергетика руху машинно-тракторного агрегату з урахуванням профілю опорної поверхні: монографія. – Харків: ДБТУ, 2024. – 100 с.

12. Roman Antoshchenkov, Ivan Halych, Viktor Antoshchenkov, Anton Nykyforov, Liliia Kis-Korkishchenko, Halyna Cherevatenko, Dmytro Smitskov. Measuring system of dynamics and energy of mobile machines: monograph. – Katowice: Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, 2024. – 150 p.

13. Roman Antoshchenkov, Ivan Halych, Viktor Antoshchenkov, Anton Nykyforov, Liliia Kis-Korkishchenko, Halyna Cherevatenko, Dmytro Smitskov. Measuring system of dynamics and energy of mobile machines: monograph. – Katowice: Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, 2024. – 150 p.

14. Volodymyr Bulgakov, Semjons Ivanovs, Valerii Adamchuk, Roman Antoshchenkov. Investigations of the Dynamics of a Four-Element Machine-and-Tractor Aggregate. *Acta Technologica Agriculturae*, 2019. Vol. 22. №. 4. P. 146-151. <https://doi.org/10.2478/ata-2019-0026>.

15. Antoshchenkov, R., Halych, I., Nikiforov, A., Cherevatenko, H., Chyzhykov, I., Sushko, S., Ponomarenko, N., Diundi, S., Tsebriuk, I. Determining the influence of geometric parameters of the traction-transportation vehicle's frame on its tractive capacity and energy indicators. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2022. 2 (7-116), pp. 60-61. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254688>.

16. R. Antoshchenkov, V. Antoshchenkova, V. Kis, D. Smitskov. Increasing accuracy of measuring functioning parameters of agricultural units. *Engineering for Rural Development*, 2023, 22. P. 210–215.

17. Антощенко Р. В., Череватенко Г. І., Задорожний В. П., Свіпличний О. В., Кусков М. А. Дослідження динаміки повнопривідної тягово-транспортної машини. *Український журнал прикладної економіки та техніки*, 2023. Т. 8. № 4. С. 336 – 341.

References

1. Al-Sager, S. M., Almady, S. S., Marey, S. A., Al-Hamed, S. A., Aboukarima, A. M. Prediction of Specific Fuel Consumption of a Tractor during the Tillage Process Using an Artificial Neural Network Method. *Agronomy*, 2024. 14(3), 492. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030492>.
2. Moinfar, A. M., Shahgholi, G. Dimensional Analysis of the Tractor Tractive Efficiency Parameters. *Acta Technologica Agriculturae*, 2018. 21(3), 94–99. <https://doi.org/10.2478/ata-2018-0017>
3. Nekhoroshev, D. D., Nekhoroshev, D. A., Konovalov, P. V., Yu Popov, A. Wheeled tractors in the agricultural machine-tractor aggregates work efficiency opportunities. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020. 577(1), 012020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/577/1/012020>.
4. Ranjbarian, S., Askari, M., Jannatkah, J. Performance of tractor and tillage implements in clay soil. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2017. 16(2), 154–162. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2015.05.003>
5. Shustik, L., Novokhatskyi, M., Stepchenko, S., Sydorenko, S., Maidanovych, N. Improvement of technical and technological solutions of strip tillage. *Technical and Technological Aspects of Development and Testing of New Machinery and Technologies for Agriculture of Ukraine*, 2024. 1(34(48)), 75–92. [https://doi.org/10.31473/2305-5987-2024-1-34\(48\)-7](https://doi.org/10.31473/2305-5987-2024-1-34(48)-7)
6. Adamchuk, V., Bulgakov, V., Nadykto, V., Trohaniak, O., Chorna, T. Theoretical study of the stability of asymmetric movement sowing machine-tractor aggregate. *Visnyk Agrarnoi Nauky*, 2023. 101(5), 57–64. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202305-08>.
7. V. I. Melnyk, V. I. Pastukhov, M. O. Tsyganenko, O. I. Anikeev, V. V. Kachanov. New opportunities for combined sowing of fodder crops. *Environmental Engineering*, 2018. No. 2(10). P. 32–36.
8. Melnyk V. I. Results of research on the operation of a prototype of a specialized seeder for combined sowing of fodder crops / V.I. Melnyk, V.I. Pastukhov, M.V. Bakum, M.O. Tsyganenko, S.M. Skofenko, O.A. Romanashenko, V.V. Kachanov, D.V. Krokmal // *Environmental Engineering*, 2019. No. 3(13). 2019. P. 35–42.
9. V. Melnyk, V. Pastukhov, M. Tsyganenko, O. Romanashenko, V. Kachanov, V. Pakhnenko. Mixed sowing of fodder crops using a new specialized seeder Vega-8. *Proposyziya*, 2019. No. 6. P. 18–22.
10. Viktor Melnyk, Mikola Artiomov, Mykhailo Tsyganenko, Oleksandr Romanashenko, Oleksandr Anikeev. Test results of co-seeding technology for forage production in mix-crop farming system. *Engineering for rural development*, 2021. Vol. 20. PP. 451–456.
11. Antoshchenkov R. V., Galich I. V., Cherevatenko G. I. Dynamics and energetics of the movement of a machine-tractor unit taking into account the profile of the supporting surface: monograph. – Kharkiv: DBTU, 2024. – 100 p.
12. Roman Antoshchenkov, Ivan Halych, Viktor Antoshchenkov, Anton Nykyforov, Liliia Kis-Korkishchenko, Halyna Cherevatenko, Dmytro Smitskov. Measuring system of dynamics and energy of mobile machines: monograph. – Katowice: Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, 2024. – 150 p.
13. Roman Antoshchenkov, Ivan Halych, Viktor Antoshchenkov, Anton Nykyforov, Liliia Kis-Korkishchenko, Halyna Cherevatenko, Dmytro Smitskov. Measuring system of dynamics and energy of mobile machines: monograph. – Katowice: Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, 2024. – 150 p.

14. Volodymyr Bulgakov, Semjons Ivanovs, Valerii Adamchuk, Roman Antoshchenkov. Investigations of the Dynamics of a Four-Element Machine-and-Tractor Aggregate. *Acta Technologica Agriculturae*, 2019. Vol. 22. №. 4. P. 146-151. <https://doi.org/10.2478/ata-2019-0026>.

15. Antoshchenkov, R., Halych, I., Nikiforov, A., Cherevatenko, H., Chyzhykov, I., Sushko, S., Ponomarenko, N., Diundi, S., Tsebriuk, I. Determining the influence of geometric parameters of the traction-transportation vehicle's frame on its tractive capacity and energy indicators. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2022. 2 (7-116), pp. 60-61. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254688>.

16. R. Antoshchenkov, V. Antoshchenkova, V. Kis, D. Smitskov. Increasing accuracy of measuring functioning parameters of agricultural units. *Engineering for Rural Development*, 2023, 22. P. 210–215.

17. Antoshchenkov R. V., Cherevatenko G. I., Zadorozhnyi V. P., Svitlychnyi O. V., Kuskov M. A. Research on the dynamics of an all-wheel drive traction and transport vehicle. *Ukrainian Journal of Applied Economics and Technology*, 2023. Vol. 8. No. 4. P. 336 – 341.

Хмельовський О.В.

Національний університет
біоресурсів і
природокористування
України,
м. Київ, Україна
E-mail:
khmelovskiy26@gmail.com

АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ ПАРАМЕТРІВ ФІЛЬТРА-ГЛУШНИКА ВАКУУМНОГО НАСОСУ

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-26-235-242>

УДК 628.3

Хмельовський О.В. Аналітична модель параметрів фільтра-глушника вакуумного насосу.

Анотація. В статті розглядається вирішення наукової задачі з віднайдення методологічних підходів до обґрунтування аналітичної моделі параметрів фільтра-глушника вакуумного насосу. В результаті досліджень отримано рівняння визначення швидкості руху частинки оливи при її виведенні із вакуумного насосу та потрапляння у фільтр глушник, останній має ступеневе збільшення радіусу та подано вираз для його визначення. Автором враховано, що маса частинки, безпосередньо не входить у формулу сили тиску повітря. Проте, маса впливає на прискорення частки під впливом сили тиску. Якщо сила тиску повітря перевищує силу тяжіння, частка почне прискорюватися. Автор вважає з погляду на процес, що протікає в фільтрі-глушнику, слід зазначити, що збільшення швидкості руху частинок оливи повинно привести до поліпшення ефекту очищення, так як при цьому зростають відцентрові сили, що діють на частинки.

Ключові слова: глушник, вакуум, установка, доїння.

Khmelovskiy O.V. Analytical model of parameters of vacuum pump filter.

Abstract. The article deals with the solution of the scientific problem to find methodological approaches to substantiation of the analytical model of parameters of the Vacuum Pump filter. As a result of the research, the equation for determining the velocity of motion of the oil particle when it removes from a vacuum pump and enter the filter of the muffler, the latter has a step increase in the radius and an expression for its determination. The author takes into account that the mass of the particle is not directly included in the formula for the air pressure. However, the mass affects the acceleration of the particle under the influence of pressure. If the air pressure exceeds gravity, the proportion will accelerate. The author considers, in terms of the process that occurs in the filter, it should be noted that the increase in the speed of movement of olive particles should lead to improving the purification effect, as centrifugal forces that act on the particles increase.

Key words: silencer, vacuum, unit, milking.

Постановка проблеми

Вакуумний насос роторно-пластинчатого типу, є основним джерелом утворення вакуумметричного тиску у доїльних установках [1]. Олива, яка служить для змащування та охолодження підшипникових вузлів насосу, а також знижує тертя пластин та корпусу, вивантажується із насосу разом із повітрям у дрібнодисперсному вигляді [2]. Рух повітряного потоку разом із дрібнодисперсною оливою рухається у середині

трубопроводу [3] та направляється у фільтр-глушник [4]. Швидкість руху потоку у трубопроводі 5-15 м/с [5]. Потрапивши в середину фільтра-глушника повітряний потік рухається по гвинтовій поверхні у вертикальному напрямку [6], також там виникає сила інерції крапель оливи [7].

Оскільки частинки (краплі оливи) мають масу, вони прагнуть рухатися прямолінійно [8]. Коли повітря змінює напрямок (рухається по гвинтовій поверхні) [9], частинки завдяки інерції продовжують рух по дотичній [10], і з часом вони осідають на стінках корпусу шнека [11].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Для визначення параметрів процесу руху та прилипання частинок оливи до поверхні допускаємо деякі спрощення [12].

Вважаємо, що частинки оливи рухаються поодинокі, мають форму кулі, рух відбувається в необмеженому просторі, а повітряний потік постійний за швидкістю та напрямом [13].

Шлях, який проходять частинки залежить від їх аеродинамічних властивостей, їх швидкості, параметрів повітряного потоку та властивостей матеріалу фільтра-глушника [14].

Швидкість повітряного потоку під час входу в фільтр-глушник визначимо за формулою, яка пов'яже об'ємну витрату повітря та площу перерізу трубопроводу [1].

$$V_{nn} = Q / S_{вн}, \text{ м/с.} \quad (1)$$

де V_{nn} – швидкість руху повітряного потоку, м/с;

Q – продуктивність вакуумного насосу, м³/с;

$S_{вн}$ – площа поперечного перерізу вихідного вікна вакуумного насосу, м².

Для розрахунку площі перерізу (трубопровід круглий) використовуємо формулу [2]:

$$S_{вн} = \pi \cdot (d_m/2)^2, \quad (2)$$

де d_m – діаметр трубопроводу, м;

π – математична константа.

На частинку оливи, що рухається у повітряному потоці діє сила земного тяжіння [15], сила тиску повітряного потоку та сила опору руху, сила інерції, підйомна сила [16].

Маса частинки, безпосередньо не входить у формулу сили тиску повітря [17].

Проте, маса впливає на прискорення частки під впливом сили тиску [18]. Якщо сила тиску повітря перевищує силу тяжіння (mg), частка почне прискорюватися.

Якщо сила тиску менша від сили тяжіння, частка рухатиметься вниз, але з меншою швидкістю, ніж якби на неї не діяв повітряний потік [19].

Стосовно сили опору руху, то чим більшою вона є, тим швидше частка буде опускатись донизу [2].

Формулювання мети досліджень

Метою роботи є віднайдення методологічних підходів до обґрунтування аналітичної моделі параметрів фільтра-глушника вакуумного насосу.

Результати досліджень

Розглянемо сили, які діють на частинку у повітряному потоці (рис. 1), де $F_{пт}$ – сила тиску повітряного потоку, $F_{опп}$ – сила опору руху, $F_{зт}$ – сила земного тяжіння, $F_{ін}$ – сила інерції, $F_{пс}$ – підйомна сила, F_d – сила опору за законом Стокса.

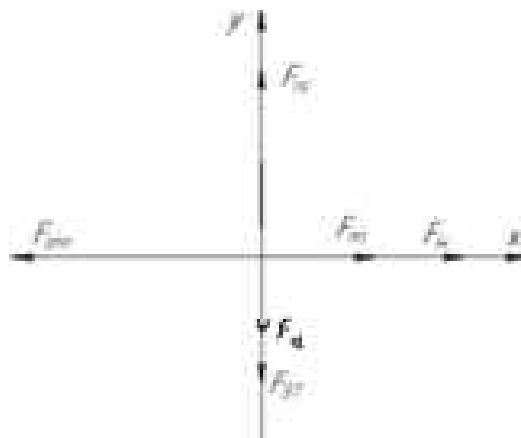


Рис. 1. Сили, що діють на частинку оливи

Силу земного тяжіння визначаємо за формулою:

$$F_{zm} = m \cdot g, \quad (3)$$

де F_{zm} – сила тяжіння, Н;

m – вага частинки оливи, кг;

g – прискорення вільного падіння, м/с².

Сила тиску повітряного потоку розраховується через формулу, що зв'язує тиск, силу та площу:

$$F_{nn} = P \cdot S, \quad (4)$$

де F_{nn} – сила, Н;

P – тиск, Па;

S – площа краплі, м².

У сприйманні потоку, це означає, що тиск, що чиниться потоком повітря на поверхню, залежить від сили, що діє перпендикулярно до цієї поверхні, і площі цієї поверхні.

Розрахунок динамічного тиску, за умови, що потік рухається, використовується формула:

$$P = \rho \cdot (V_q^2/2), \quad (5)$$

де ρ – густина повітря, кг/м³;

v – швидкість повітряного потоку, м/с.

Тоді сила тиску повітряного потоку набуде вигляду

$$F_{nn} = 1/2 \cdot \rho \cdot V_q^2 \cdot S, \quad (6)$$

Сила опору руху частинки – сила, що діє під час руху в повітрі і обумовлюється дією сил в'язкості і лобового опору.

Формула для визначення сили опору повітря має вигляд:

$$F_{опп} = 1/2 \cdot \rho \cdot V_q^2 \cdot \xi \cdot S, \quad (7)$$

де $F_{опп}$ – сила опору повітря, Н;

ρ – густина повітря, кг/м³;

v – швидкість руху частинки, (приймаємо однаковою із швидкістю повітряного потоку), м/с)

ξ – коефіцієнт аеродинамічного опору, (краплі оливи мають розмір 35-50 мкм);

S – площа поперечного перерізу частинки, перпендикулярна до напрямку руху, м².

У вертикальному напрямі діє сила опору за законом Стокса

$$F_d = 6\pi\mu a_k(V_{nn} - V_q), \quad (8)$$

де μ – динамічна в'язкість повітря, Па·с,

a_k – радіус краплі, м;

V_q – швидкість частинки, м/с;

$V_{пп}$ – швидкість повітряного потоку. м/с.

З погляду на процес, що протікає в фільтрі-глушнику, слід зазначити, що збільшення швидкості руху частинок оливи повинно привести до поліпшення ефекту очищення, так як при цьому зростають відцентрові сили, що діють на частинки. Сила інерції дорівнює:

$$F_{ин} = m V_q^2 / R, \quad (9)$$

де m – вага частинки, кг;

V_q – швидкість частки, (дорівнює швидкість потоку), м/с;

R – відстань до кожуху шнека фільтра-глушника, м.

Вказана сила буде тим більшою, чим більша швидкість частинки, що характеризується швидкістю повітряного потоку при вході у фільтр-глушник.

Збільшення відцентрової сили має прискорити переміщення найбільш дрібних і легких частинок до стінки шнеку фільтра-глушника, тобто сприятиме підвищенню ефекту оливоловлення.

Скористаємось умовою інерційного осадження частинок та за допомогою Параметра Стокса визначимо, щоб зрозуміти, чи частинка зіштовхнеться із стінкою фільтра-глушника не встигаючи відреагувати на зміну руху повітряного потоку по поверхні шнека. Вищезгадана умова забезпечується при $Stk \geq 1$.

$$Stk = \frac{t_{рч} \cdot V_{пп}}{R_{шн}}, \quad (10)$$

де $t_{рч}$ – час реакції частинки на зміну потоку, с;

$$t_{рч} = \frac{\rho_p \cdot d_p^2}{18\mu}, \quad (11)$$

де ρ_p – густина частинки, кг/м³;

d_p – діаметр частинки, м;

μ – динамічна в'язкість повітря, Па·с;

$v_{пп}$ – швидкість повітряного потоку, м/с;

$R_{шн}$ – характерний розмір (радіус кривини траєкторії або діаметр спіралі).

Підйомна сила це сила, яка виникає при обтіканні тіла потоком повітря і спрямована перпендикулярно до руху потоку.

Для розрахунку підйомної сили скористаємось виразом

$$F_{пс} = 1/2 \cdot \rho \cdot V_q^2 \cdot S \cdot C_d, \quad (12)$$

де $F_{пс}$ – підйомна сила, Н;

ρ – щільність газу, кг/м³);

V_q – швидкість часточки, м/с;

S – площа поверхні, що створює підйомну силу, м²;

C_d – коефіцієнт підйомної сили.

Переміщення крапель оливи в бік зовнішньої поверхні шнека виникає завдяки відцентровій силі, проте на осадження часток має вплив сила земного тяжіння

$$F_{px} = \frac{mV_q^2}{R} + \frac{1}{2} \rho \cdot V_q^2 \cdot S - \frac{1}{2} \rho \cdot V_q^2 \cdot \xi \cdot S = mx; \quad (13)$$

$$F_{py} = \frac{1}{2} \rho \cdot V_q^2 \cdot C_d \cdot S - 6\pi\mu a_k (V_{пп} - V_q) - mg = my; \quad (14)$$

Для визначення відстані, яку може пройти у повітряному потоку частинка оливи, розглянемо проекцію сил на осі x , оскільки

$$\frac{mV_q^2}{R} = \frac{1}{2} \rho \cdot V_q^2 \cdot (\xi \cdot S - S), \quad (15)$$

скоротивши на $V_{\text{ч}}^2$, отримаємо

$$\frac{m}{R} = \frac{1}{2} \rho \cdot S(\xi - 1), \quad (16)$$

поділивши на R – отримаємо:

$$m = \frac{1}{2} \rho \cdot S(\xi - 1)R \quad (17)$$

Отже, відстань яку може пройти у повітряному потоку частинка оливи залежить від її ваги

Для визначення сили земного тяжіння, що діє на частку оливи в повітряному потоці, розглянемо проекцію сил на осі y , оскільки

$$mg = \frac{1}{2} \rho \cdot V_{\text{ч}}^2 \cdot C_d \cdot S - 6\pi\mu a_{\text{к}} V_{\text{пп}} + 6\pi\mu a_{\text{к}} V_{\text{ч}}, \quad (18)$$

Отже, визначимо швидкість, з якою частка оливи буде рухатись у повітряному потоці.

Підставимо вираз для m з осі x отримаємо:

$$\left(\frac{1}{2} \rho \cdot S(\xi - 1)R\right)g = \frac{1}{2} \rho \cdot V_{\text{ч}}^2 \cdot C_d \cdot S - 6\pi\mu a_{\text{к}} V_{\text{пп}} + 6\pi\mu a_{\text{к}} V_{\text{ч}} \quad (19)$$

Перенесемо $V_{\text{ч}}^2$ в ліву сторону та отримаємо квадратичне рівняння щодо $V_{\text{ч}}$:

$$\frac{1}{2} \rho \cdot V_{\text{ч}}^2 \cdot C_d \cdot S + 6\pi\mu a_{\text{к}} V_{\text{ч}} - \left(\frac{1}{2} \rho \cdot S(\xi - 1)R \cdot g + 6\pi\mu a_{\text{к}} V_{\text{пп}}\right) = 0, \quad (20)$$

Розв'яжемо квадратичне рівняння щодо $V_{\text{ч}}$

Приведемо до стандартної форми:

$$aV_{\text{ч}}^2 + bV_{\text{ч}} + c = 0,$$

$$\text{де } a = \frac{1}{2} \rho \cdot C_d \cdot S$$

$$b = 6\pi\mu a_{\text{к}}$$

$$c = -\left(\frac{1}{2} \rho \cdot S(\xi - 1)R \cdot g + 6\pi\mu a_{\text{к}} V_{\text{пп}}\right)$$

$$D = b^2 - 4ac = (6\pi\mu a_{\text{к}})^2 + 4\left(\frac{1}{2} \rho \cdot C_d \cdot S\right)\left(\frac{1}{2} \rho \cdot S(\xi - 1)R \cdot g + 6\pi\mu a_{\text{к}} V_{\text{пп}}\right), \quad (21)$$

Визначимо корені рівняння

$$v_{\text{ч}1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{D}}{2a}$$

$$V_{\text{ч}1,2} = \frac{-6\pi\mu a_{\text{к}} \pm \sqrt{(6\pi\mu a_{\text{к}})^2 + 4\left(\frac{1}{2} \rho \cdot C_d \cdot S\right)\left(\frac{1}{2} \rho \cdot S(\xi - 1)R \cdot g + 6\pi\mu a_{\text{к}} V_{\text{пп}}\right)}}{\rho \cdot C_d \cdot S}, \quad (22)$$

Із рівняння (19) можна визначити R .

$$R = \frac{\frac{1}{2} \rho \cdot V_{\text{ч}}^2 \cdot C_d \cdot S - 6\pi\mu a_{\text{к}} V_{\text{пп}} + 6\pi\mu a_{\text{к}} V_{\text{ч}}}{\frac{1}{2} \rho \cdot S(\xi - 1) \cdot g}, \quad (23)$$

Висновки

1. В статті отримано рівняння визначення швидкості руху частинки оливи при її виведенні із вакуумного насосу та потрапляння у фільтр глушник, останній має ступеневе збільшення радіусу та подано вираз для його визначення.

Список використаних джерел

1. Руденко Е.В., Савран В.П., Гребень Л.Г., Антоненко С.Ф., Дибиров Р.М. Перспективы интенсивного производства молока. Механізація, екологізація та конвертація біосировини у тваринництві. 2009. Вип. 1 (3,4). С. 41–46.

2. Адамчук В.В. Дослідження руху частинки технологічного матеріалу в повітряному середовищі в умовах вітру і супроводжуючого повітряного струменя. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2005. Вип. 89. С. 27–49.
3. Rogovskii I., Sivak I., Shatrov R., Nadtochiy O. Agroengineering studies of tillage and harvesting parameters in soybean cultivation. *Engineering of Rural Development*. 2024. Vol. 23. P. 965-970. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2024.23.TF195>.
4. Sheichenko V., Petrachenko D., Koropchenko S., Rogovskii I., Gorbenko O., Volianskyi M., Sheichenko D. Substantiating the rational parameters and operation modes for the hemp seed centrifugal dehuller. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 2 (1 (128)). P. 34–48. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300174>.
5. Aulin V., Rogovskii I., Lyashuk O., Titova L., Hrynkiv A., Mironov D., Volianskyi M., Rogatynskyi R., Solomka O., Lysenko S. Comprehensive assessment of technical condition of vehicles during operation based on Harrington's desirability function. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 1 (3 (127)). P. 37–46. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298567>.
6. Volokha M., Rogovskii I., Fryshev S., Sobczuk H., Virchenko G., Yablonskyi P. Modeling of transportation process in a technological complex of beet harvesting machines. *Journal of Engineering Sciences (Ukraine)*. 2023. Vol. 10(2). P. F1–F9. [https://doi.org/10.21272/jes.2023.10\(2\).fl](https://doi.org/10.21272/jes.2023.10(2).fl) Scopus
7. Rogovskii I., Titova L., Sivak I., Berezova L., Vyhovskyi A. Technological effectiveness of tillage unit with working bodies of parquet type in technologies of cultivation of grain crops. *Engineering for Rural Development*. 2022. Vol. 21. P. 884–890. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2022.21.TF279>.
8. Rogovskii I., Titova L., Shatrov R., Bannyi O., Nadtochiy O. Technological effectiveness of machine for digging seedlings in nursery grown on vegetative rootstocks. *Engineering for Rural Development*. 2022. Vol. 21. P. 924–929. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2022.21.TF290>.
9. Romaniuk W., Rogovskii I., Polishchuk V., Titova L., Borek K., Wardal W.J., Shvorov S., Dvornyk Y., Sivak I., Drahnev S., Derevjanko D. Study of methane fermentation of cattle manure in the mesophilic regime with the addition of crude glycerine. *Energies*. 2022. Vol. 15. Issue 9. P. 3439. <https://doi.org/10.3390/en15093439>.
10. Rogovskii I.L. Models of formation of engineering management alternatives in methods of increasing grain production in agricultural enterprises. *Machinery and Energetics*. 2021. Vol. 12(1). P. 137–146.
11. Rogovskii I.L. Resource of removal expenses for strong agricultural period of volume of operations. *Machinery and Energetics*. 2021. Vol. 12. Issue 2. P. 123–131. <https://doi.org/10.31548/machenergy2021.02.123>.
12. Rogovskii I.L. Influence of operating failure of agricultural machines on efficiency of their machine use. *Machinery and Energetics*. 2021. Vol. 12(3). P. 157–166.
13. Rogovskii I.L. Analyticity of complex criteria for evaluation of grain production in agricultural enterprises intensification of engineering management. *Machinery and Energetics*. 2021. Vol. 12(4). P. 129–138.
14. Nazarenko I., Mishchuk Y., Mishchuk D., Ruchynskyi M., Rogovskii I., Mikhailova L., Titova L., Berezovyi M., Shatrov R. Determination of energy characteristics of material destruction in the crushing chamber of the vibration crusher. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 4(7(112)). P. 41–49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.239292>.
15. Rogovskii I.L., Titova L.L., Gumenyuk Yu.O., Nadtochiy O.V. Technological effectiveness of formation of planting furrow by working body of passive type of orchard

planting machine. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 839. P. 052055. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/839/5/052055>.

16. Rogovskii I.L., Titova L.L., Trokhaniak V.I., Borak K.V., Lavrinenko O.T., Bannyi O.O. Research on a grain cultiseeder for subsoil-broadcast sowing. INMATEH. Agricultural Engineering. Bucharest. 2021. Vol. 63. No 1. P. 385–396. <https://doi.org/10.35633/INMATEH-63-39>.

17. Rogovskii I.L., Sivak I.M. Research of machines for mulching near-trunk strips in perennial fruit plantations. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 723. P. 042041. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/4/042041>.

18. Rogovskii I.L., Sivak I.M. Research of microdeformation and stress in details of agricultural machines by implementing holography. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 677. P. 052038. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/5/052038>.

19. Rogovskii I.L., Polishchuk V.M., Titova L.L., Sivak I.M., Vyhovskiy A.Yu., Drahnev S.V., Voinash S.A. Study of biogas during fermentation of cattle manure using a stimulating additive in form of vegetable oil sediment. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2020. Vol. 15. Issue 22 (20th November). P. 2652–2663.

References

1. Rudenko E.V., Savran V.P., Greben L.G., Antonenko S.F., Dibirov R.M. (2009). Perspectives of intensive milk. Mechanization, Greening and Conversion of Biorapid in Animal Husbandry. Iss. 1 (3,4). P. 41–46.

2. Adamchuk V.V. (2005). Investigation of the movement of a particle of technological material in the air environment in wind conditions and accompanying air jet. Mechanization and Electrification of Agriculture. Iss. 89. P. 27–49.

3. Rogovskii I., Sivak I., Shatrov R., Nadtochiy O. (2024). Agroengineering studies of tillage and harvesting parameters in soybean cultivation. Engineering of Rural Development. Vol. 23. P. 965–970. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2024.23.TF195>.

4. Sheichenko V., Petrachenko D., Koropchenko S., Rogovskii I., Gorbenko O., Volianskyi M., Sheichenko D. (2024). Substantiating the rational parameters and operation modes for the hemp seed centrifugal dehuller. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 2 (1 (128)). P. 34–48. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300174>.

5. Aulin V., Rogovskii I., Lyashuk O., Titova L., Hrynkiv A., Mironov D., Volianskyi M., Rogatynskyi R., Solomka O., Lysenko S. (2024). Comprehensive assessment of technical condition of vehicles during operation based on Harrington's desirability function. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 1 (3 (127)). P. 37–46. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298567>.

6. Volokha M., Rogovskii I., Fryshev S., Sobczuk H., Virchenko G., Yablonskyi P. (2023). Modeling of transportation process in a technological complex of beet harvesting machines. Journal of Engineering Sciences (Ukraine). Vol. 10(2). P. F1–F9. [https://doi.org/10.21272/jes.2023.10\(2\).fl](https://doi.org/10.21272/jes.2023.10(2).fl) Scopus

7. Rogovskii I., Titova L., Sivak I., Berezova L., Vyhovskiy A. (2022). Technological effectiveness of tillage unit with working bodies of parquet type in technologies of cultivation of grain crops. Engineering for Rural Development. Vol. 21. P. 884–890. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2022.21.TF279>.

8. Rogovskii I., Titova L., Shatrov R., Bannyi O., Nadtochiy O. (2022). Technological effectiveness of machine for digging seedlings in nursery grown on vegetative rootstocks. Engineering for Rural Development. Vol. 21. P. 924–929. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2022.21.TF290>.

9. Romaniuk W., Rogovskii I., Polishchuk V., Titova L., Borek K., Wardal W.J., Shvorov S., Dvornyk Y., Sivak I., Drahnev S., Derevjanko D. (2022). Study of methane fermentation of cattle manure in the mesophilic regime with the addition of crude glycerine. *Energies*. Vol. 15. Issue 9. P. 3439. <https://doi.org/10.3390/en15093439>.
10. Rogovskii I.L. (2021). Models of formation of engineering management alternatives in methods of increasing grain production in agricultural enterprises. *Machinery and Energetics*. Vol. 12(1). P. 137–146.
11. Rogovskii I.L. (2021). Resource of removal expenses for strong agricultural period of volume of operations. *Machinery and Energetics*. Vol. 12. Issue 2. P. 123–131. <https://doi.org/10.31548/machenergy2021.02.123>.
12. Rogovskii I.L. (2021). Influence of operating failure of agricultural machines on efficiency of their machine use. *Machinery and Energetics*. Vol. 12(3). P. 157–166.
13. Rogovskii I.L. (2021). Analyticity of complex criteria for evaluation of grain production in agricultural enterprises intensification of engineering management. *Machinery and Energetics*. Vol. 12(4). P. 129–138.
14. Nazarenko I., Mishchuk Y., Mishchuk D., Ruchynskiy M., Rogovskii I., Mikhailova L., Titova L., Berezovyi M., Shatrov R. (2021). Determination of energy characteristics of material destruction in the crushing chamber of the vibration crusher. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 4(7(112)). P. 41–49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.239292>.
15. Rogovskii I.L., Titova L.L., Gumenyuk Yu.O., Nadtochiy O.V. (2021). Technological effectiveness of formation of planting furrow by working body of passive type of orchard planting machine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 839. P. 052055. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/839/5/052055>.
16. Rogovskii I.L., Titova L.L., Trokhaniak V.I., Borak K.V., Lavrinenko O.T., Bannyi O.O. (2021). Research on a grain cultiseeder for subsoil-broadcast sowing. *INMATEH. Agricultural Engineering*. Bucharest. Vol. 63. No 1. P. 385–396. <https://doi.org/10.35633/INMATEH-63-39>.
17. Rogovskii I.L., Sivak I.M. (2021). Research of machines for mulching near-trunk strips in perennial fruit plantations. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 723. P. 042041. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/4/042041>.
18. Rogovskii I.L., Sivak I.M. (2021). Research of microdeformation and stress in details of agricultural machines by implementing holography. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 677. P. 052038. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/5/052038>.
19. Rogovskii I.L., Polishchuk V.M., Titova L.L., Sivak I.M., Vyhovskyi A.Yu., Drahnev S.V., Voinash S.A. (2020). Study of biogas during fermentation of cattle manure using a stimulating additive in form of vegetable oil sediment. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. Vol. 15. Issue 22 (20th November). P. 2652–2663.

Загурський А.О.

Національний університет
біоресурсів і
природокористування
України,
м. Київ, Україна
E-mail:
andreyzagurskiy1@gmail.com

ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ЛОГІСТИЧНОГО СЕРВІСУ КОМПАНІЇ

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-26-243-253>

УДК 629.4

Загурський А.О. Оптимізація системи логістичного сервісу компанії.

Анотація. У статті досліджено стратегічні підходи до оптимізації системи логістичного сервісу підприємства на основі балансу між рівнем обслуговування клієнтів та логістичними витратами. Акцентовано увагу на формуванні ефективної логістичної стратегії з використанням методів аналітики, зокрема методу аналізу ієрархій (MAI). Запропоновано ієрархічну модель вибору оптимального комплексу логістичних послуг на основі ключових індикаторів ефективності обслуговування клієнтів. Практичне застосування методики продемонстровано на прикладі компанії «Sfera-Avto», що дозволило обґрунтувати вибір найефективніших напрямів покращення логістичного сервісу. Результати дослідження підтверджують доцільність використання MAI як інструменту підтримки прийняття стратегічних логістичних рішень.

Ключові слова: логістичний сервіс, логістичне управління, метод аналізу ієрархій, оптимізація витрат, рівень обслуговування.

Zagurskiy A.O. Optimization of the company's logistics service system.

Abstract. The article explores approaches to optimizing a company's logistics service system in the context of a modern market characterized by intense competition and growing consumer demands. It is established that one of the key strategic directions in logistics development is maintaining a balance between customer service levels and logistics costs. The study analyzes existing scientific approaches to the selection of logistics strategies and substantiates the feasibility of applying the Analytic Hierarchy Process (AHP) to justify the selection of a set of logistics services aimed at achieving the company's strategic goals. The proposed methodology involves constructing a hierarchical structure comprising the overall goal, performance criteria, and key logistics service indicators serving as alternatives. Pairwise comparisons of the hierarchy elements are performed using expert evaluations, optimal indicators are identified based on the Pareto principle, and the alternatives are ranked according to their impact on the strategic objective. The practical application of the methodology is demonstrated through the case of "Sfera-Avto," a company engaged in the sale of automobiles and spare parts. The results obtained contribute to improving decision-making efficiency in logistics management and enhancing the adaptability of the logistics system to market changes. The methodology can be recommended for use by enterprises seeking to increase their logistics service level without incurring excessive cost growth.

Key words: logistics service, logistics management, analytic hierarchy process, cost optimization, service level.

Постановка проблеми

Стратегічні задачі логістики полягають у довгостроковому плануванні та прийнятті рішень, які у перспективі сформують основу конкурентоспроможності компанії. Одним із ключових векторів таких задач є підвищення якості логістичного сервісу, оскільки він безпосередньо впливає на задоволення клієнтів, імідж компанії та лояльність споживачів. Водночас, забезпечення високого рівня сервісу вимагає значних витрат, тому важливим є баланс між рівнем сервісу і рівнем логістичних витрат. Відповідно прагнення задовільнити бажання клієнта змушує логістичні компанії розробляти стратегії побудовані на компромісі між витратами, пов'язаними з наданням логістичних послуг та рівнем логістичного сервісу, що надається клієнтам.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

В науковій літературі достатньо широко розглядаються питання пов'язані із впливом якості логістичного сервісу на рівень взаємовідносин з клієнтами [1-3] і відповідно вибором стратегії надання логістичного сервісу [4-6]. Серед них найбільш популярною є стратегія оптимальних витрат [7-10], що концентрує зусилля компанії на наданні більш високого рівня якості обслуговування клієнтів за ціною на рівні конкурентів або навіть нижче.

Однак незважаючи на зростаючу кількість статей, у цій галузі, все ще не вистачає систематичних та оновлених досліджень. Особливо в царині емпіричних досліджень щодо управління логістичним сервісом компанії.

Формулювання мети досліджень

Метою роботи є розробка методики вибору оптимізації системи логістичного сервісу компанії побудованої за методологію MAI на основі ключових індикаторів оцінки логістичного обслуговування клієнтів фірми.

Методичний підхід в проведенні досліджень

Загалом існують два класичних шляхи (напрямки) стратегічного регулювання логістичного сервісу компанії:

1. Регулювання рівня логістичного сервісу, за якого компанія визначає цільовий рівень обслуговування клієнтів і адаптує свою логістичну систему для його досягнення. Метою цього напрямку є забезпечити конкурентну перевагу через високий рівень обслуговування, навіть за умов підвищення витрат. Ключовим завданнями напрямку є:

– визначення параметрів логістичного сервісу (час доставки, частота постачань, точність виконання замовлення, зворотна логістика тощо);

– сегментація клієнтів за рівнем обслуговування (диференційований сервіс) та подальша розробка стандартів обслуговування для різних ринкових сегментів.

– моніторинг і контроль відповідності фактичного рівня сервісу встановленим стандартам.

2. Регулювання рівня логістичних витрат. Це стратегія оптимізації витрат без істотного зниження рівня обслуговування. Мета цього напрямку – мінімізувати витрати без критичного зниження якості логістичного обслуговування. Ключові задачі напрямку полягають у наступному:

- аналіз витрат на всі етапи логістичного ланцюга (транспортування, складування, упаковка, зберігання, управління запасами);
- впровадження технологій автоматизації та цифровізації (WMS, TMS, ERP);
- розробка стратегії аутсорсингу логістичних функцій (3PL, 4PL, 5 PL).
- оптимізація логістичної мережі (розміщення складів, вибір транспортних маршрутів тощо);
- вибір рівня сервісу, який забезпечує мінімальні сукупні витрати з урахуванням рівня втрат від недообслуговування клієнтів.

Проте оптимальний варіант регулювання логістичного сервісу зазвичай знаходиться посередині і полягає у постійному балансуванні між рівнем сервісу та витратами, отже виникає оптимізаційна дилема, коли існує класична залежність між рівнем сервісу і витратами на його забезпечення (рис. 1).

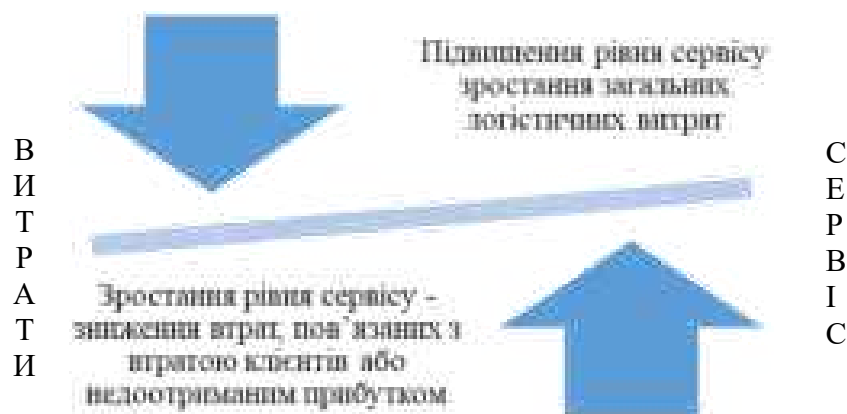


Рис. 1. Оптимізаційна логістична дилема.

Відповідно перед менеджментом фірми постає завдання знайти оптимальний рівень логістичного сервісу, за якого сукупні витрати (логістичні витрати + втрати від низького сервісу) є мінімальними. Математично його можна відобразити у вигляді функції 1, а графічно у вигляді рис 2.

$$Z = C(S) + L(S) \rightarrow \min \quad (1)$$

де $C(S)$ – логістичні витрати як функція рівня сервісу S

$L(S)$ – втрати через можливий незадоволений попит/клієнтів як функція рівня сервісу S .

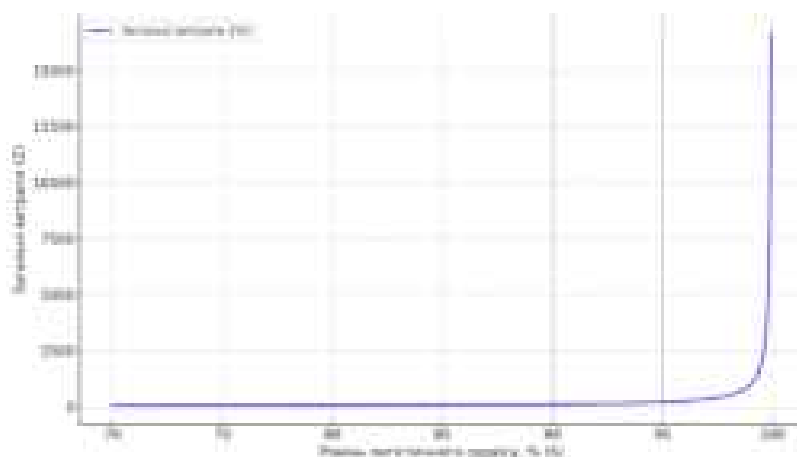


Рис. 2. Графік залежності між рівнем логістичного сервісу (S , %) та загальними витратами (Z).

Функція залежності загальних витрат від рівня логістичного сервісу показує що:

- при підвищенні сервісу до ~90%. відбувається помірне зростання витрат
- після 95% витрати починають зростати експоненційно через неможливість (складність) досягнення ідеального сервісу.

– мінімум кривої вказує на оптимальний рівень сервісу з погляду балансу витрат і якості.

Виходячи з вище визначеного ефективно стратегічне управління логістичним сервісом компанії можливе лише при збалансованому підході, який враховує як економічну доцільність, так і ринкові очікування клієнтів. Регулювання як рівня сервісу, так і рівня витрат має будуватись на основі аналітики, моделювання та глибокого розуміння бізнес-цілей компанії. Щодо інструментів стратегічного аналізу якості логістичного сервісу то вони наступні:

Таблиця 1

Інструменти стратегічного аналізу якості логістичного сервісу

Інструмент	Призначення	Приклад застосування
SLA (Service Level Agreement)	Формалізація параметрів сервісу з клієнтами	Напр., "95% доставок протягом 24 годин"
KPI (Key Performance Indicators)	Моніторинг якості логістики	Показник рівня виконаних замовлень: $\geq 97\%$
SCOR-модель (Supply Chain Operations Reference)	Стандартизований підхід до оцінки ефективності ланцюгів постачання	Показники: надійність, швидкість, гнучкість, витрати
ABC-XYZ аналіз	Сегментація товарів або клієнтів	Високопріоритетні групи – обслуговуються на вищому рівні
Аналіз "Вартість vs Сервіс" (Cost-Service Analysis)	Візуалізація точки оптимального сервісу	Побудова кривої з метою оптимізації
Метод аналітичної ієрархії (MAI)	Спосіб визначення відповідного оптимального комплексу логістичних послуг	Вибір найкращої з пропонованих альтернатив, в тому числі й з нечітко визначеними компонентами

Для практичного застосування моделі оптимізації логістичної системи компанії та вибору альтернативної стратегії логістичного сервісу скористаємося методом аналізу ієрархії (MAI), мета якого обґрунтування вибору найкращої з пропонованих альтернатив, характеристики яких є векторами з різномірними, в тому числі й з нечітко визначеними, окремими компонентами [11]. Суть методу полягає в поетапному вирішенні таких взаємопов'язаних окремих завдань як:

- побудова ієрархічної структури показників;
- оцінювання значущості окремих показників для кожного рівня ієрархії;
- порівняння наявних альтернатив і вибір найкращої з них.

Даний метод видається простим, зрозумілим та зручним для розрахунків. Відповідно, він всіляко застосовується у практичній діяльності для виконання завдань щодо прийняття рішень в різних постановках: вибрати один найкращий або кілька найкращих варіантів, упорядкувати (ранжувати) усі варіанти за перевагами тощо. До

переваг використання МАІ у порівнянні з іншими методами вибору альтернативних проектів і визначення пріоритетності дослідники [12-14] відносять:

- використання ієрархічної структури та можливість особи, що приймає рішення (ОПР) визначити рівень стратегічних цілей і конкретні показники для більш якісної оцінки стратегічного вирівнювання логістичного сервісу;
- інтеграція кількісних і якісних параметрів;
- можливість ОПР виміряти відносну важливість проектів, в тому числі їх переваги, витрати, ризики, що сприяє більш ефективному використанню матеріальних та фінансових ресурсів;
- використання числових оцінок або експертних суджень, коли потрібні показники відсутні або недоступні;
- застосування аналізу чутливості, який надає більшу кількість аналітичних можливостей при розгляді того чи іншого сценарію.

Результати досліджень

Експериментальні дослідження запропонованого методу проведено на прикладі компанії з продажу автомобілів та комплектуючих запасних частин «Sfera-Avto». У компанії у якості головного стратегічного напрямку логістики обрано мінімізацію циклу замовлення клієнтів і виходячи з його змісту визначено десять найбільш важливих ключових індикаторів покращення яких сприятиме досягненню визначеної цілі:

- 1) I_1 – частка вчасно виконаних замовлень;
- 2) I_2 – рівень використання логістичної інфраструктури;
- 3) I_3 – сума штрафів через невиконання умов постачання;
- 4) I_4 – динаміка кількості виконаних замовлень;
- 5) I_5 – % зривів строків постачання;
- 6) I_6 – рівень запасів затребуваних товарів;
- 7) I_7 – витрати складування одиниці товару;
- 8) I_8 – середній час циклу замовлення;
- 9) I_9 – точність та повнота вантажообробки;
- 10) I_{10} – операційні логістичні витрати на одиницю товару

Для обґрунтованого використання визначених показників при вирішенні обраної стратегічної задачі логістики необхідно провести їх оцінку, співставивши ключові індикатори із конкретними критеріями, на основі якої будуть прийматися подальші управлінські рішення. До таких критеріїв нами віднесено:

- 1) C_1 – тривалість циклу виконання замовлення клієнта;
- 2) C_2 – відхилення у термінах виконання замовлення клієнта;
- 3) C_3 – логістичні витрати на виконання замовлення клієнта;
- 4) C_4 – час реакції на потреби клієнтів;
- 5) C_5 – середній рівень запасів компанії;

Критерії C_1 – C_5 дозволять оцінити найбільш суттєві параметри логістичної діяльності компанії: швидкість та тривалість виконання замовлення клієнта, стійкість та гнучкість логістики, величину поточних активів та ефективність виконання логістичних операцій.

Застосуємо МАІ для вирішення конкретних завдань. Для цього:

- на першому етапі експертній групі встановимо пріоритети параметрів, що демонструють основні особливості маркетингової та логістичної стратегій підприємства. Структуруємо розв'язувану задачу у вигляді ієрархії. Для цього визначимо три рівні ієрархії: цілі, критерії та альтернативи. У нашому випадку сама постановка стратегічного завдання логістики – мінімізація циклу замовлення клієнтів –

виступатиме як мета. Перелічені вище п'ять показників (C_1 - C_5) виступатимуть критеріями. Нарешті, ключові індикатори (I_1 - I_{10}) будуть представляти альтернативи досягнення поставленої мети.

Графічна формалізація задачі представлена на рис. 3.

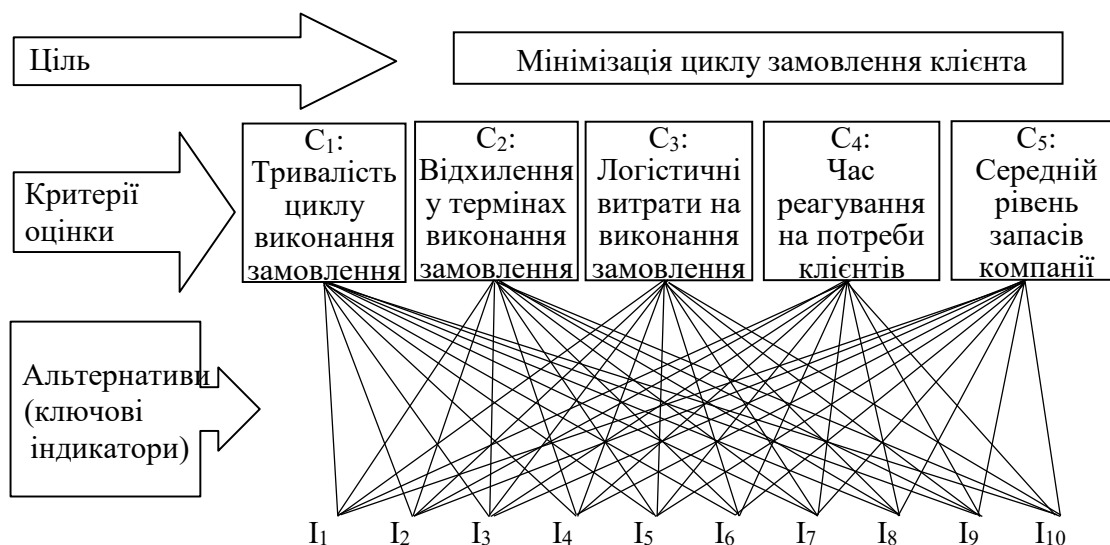


Рис. 3. Ієрархія для вибору комплексу базових логістичних послуг при формуванні логістичного сервісу.

– на другому етапі перед виконанням процедури попарних порівнянь елементів для кожного рівня ієрархії оцінимо альтернативи, що розглядаються, на їх оптимальність за Парето. І виключимо з аналізу ті альтернативи, які є завідомо програшними (не оптимальними за Парето). Для цього використовуємо таблицю 2 з показниками логістичної діяльності компанії «Sfera-Avto», формалізовану відповідно до структури задачі, показаної на рис 3, для критеріїв та альтернатив.

Таблиця 2

Показники значень критеріїв C_1 - C_5 для альтернатив I_1 - I_{10}

Альтернативи (ключові індикатори)	Критерії / одиниці виміру				
	C_1 , неділь	C_2 , неділь	C_3 , млн. грн./рік	C_4 , неділь	C_5 , млн. грн./рік
I_1	2	$\pm 3,5$	3	3,5	8
I_2	5	± 3	1,5	3	7
I_3	4,5	± 4	1,7	1,5	7
I_4	5,5	± 2	2,2	3,5	10
I_5	5,5	± 2	4	2,5	11
I_6	5,5	± 1	2,2	3,5	10
I_7	1	± 2	3	2,5	12
I_8	8	± 4	2,5	3,5	3
I_9	6,5	± 3	3,5	4	7
I_{10}	5	± 3	2	3,5	5

Зваживши на напрям оптимізації для усіх критеріїв – мінімізація – можемо помітити, що при співставленні декілька альтернатив є домінуючими над іншими. Так альтернативи I_2 та I_6 домінують над I_9 та I_4 відповідно. Отже останні можемо виключити

з подальшого розгляду.

– на третьому етапі проводимо попарні порівняння елементів кожного рівня попарно порівнюючи важливості альтернатив по кожному параметру, а саме:

1) порівнюємо між собою важливість критеріїв з огляду на можливість досягнення мети (реалізується з урахуванням ставлення ОПР до таких показників)

Для цього кожному i -му параметру обчислюємо власний вектор, який дорівнює середньо-геометричному кореню добутку пріоритетів рядка матриці попарного порівняння.

$$v_i = \sqrt[k]{\prod_{j=1}^k a_{ij}} \quad (2)$$

2) порівнюємо між собою показники альтернатив за кожним критерієм з огляду на їх значущість (це також реалізується з урахуванням ставлення ОПР до таких показників). Для цього обчислюємо власний нормалізований вектор, який показує внесок кожного параметра у досягнення мети:

$$v_{ij} = \frac{v_i}{\sum_{i=1}^k v_i} \quad (3)$$

Що дає можливість визначити ваги для кожного з критеріїв, а також коефіцієнти важливості для кожної альтернативи в розрізі відповідного критерію. Зазначені порівняння проводимо з використанням 10-бальної шкали.

Отримані дані оформлюємо у вигляді таблиць порівнянь. Враховуючи, що необхідно зіставити значущість самих критеріїв (між собою), а також значимість показників альтернатив по кожному з критеріїв, у межах завдання буде 8 таблиць із зазначеними попарними порівняннями. При зіставленні значень переводимо цифрові значення у лінгвістичну форму (рівна важливість; помірна перевага; значна перевага; сильна перевага; дуже сильна перевага), які згодом для реалізації розрахунків безпосередньо співставляємо з числовими характеристиками (1;3;5;7; 9 та їх проміжними значеннями 2;4;6;8;10 – відповідно). А оскільки аналізованих значень багато – 1 таблиця 5x5 та 5 таблиць 8x8 – і є ризик помилкового сприйняття даних, попарні порівняння перевіряємо на узгодженість. Для цього розраховуємо індекс узгодженості (ІУ) запропонований Т. Сааті та К. Керісом [15], значення якого має прагнути до «0».

$$I_U = \frac{\lambda_{\max} - k}{k - 1} \quad (4)$$

де $\lambda_{\max}$ – головне значення матриці парних порівнянь;

k – порядок квадратної матриці.

Для нашого завдання було визначено, що індекс узгодженості не має перевищувати 0,1.

Результати попарних порівнянь важливості заданих критеріїв (для досягнення мети) представлені у таблиці 3.

Таблиця 3

Результати попарних порівнянь важливості заданих критеріїв

Критерії	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	Власний вектор	Вага критерію, w _i (%)
C ₁	1	9	5	7	3	5	9
C ₂	1/9	1	1/5	1/3	1/7	1/5	1
C ₃	1/5	5	1	3	1/3	1	5
C ₄	1/7	3	1/3	1	1/5	1/3	3
C ₅	1/3	7	3	5	1	3	7

Результати попарних порівнянь значимості показників аналізованих альтернатив щодо критерію C_1 подані у таблиці 4.

Таблиця 4

Оцінка альтернатив за критерієм « C_1 : тривалість циклу виконання замовлення клієнта»

	I_1	I_2	I_3	I_5	I_6	I_7	I_8	I_{10}	Власний вектор	Важливість альтернативи, V_{IjC1} (%)
I_1	1	4	7	7	1/2	9	5	9	3,93	24
I_2	1/4	1	3	3	1/4	5	2	5	1,34	9
I_3	1/7	1/3	1	1	1/6	3	1/2	3	0,57	4
I_5	1/7	1/3	1	1	1/6	3	1/2	3	0,54	3
I_6	2	4	6	6	1	9	5	9	4,21	27
I_7	1/9	1/5	1/3	1/3	1/9	1	1/4	1	0,27	2
I_8	1/5	1/2	2	2	1/5	4	1	4	0,89	5
I_{10}	1/9	1/5	1/3	1/3	1/9	1	1/4	1	0,27	2

Таблиця 5

Розрахунок пріоритетності вибору сукупності ключових показників для одного із стратегічних завдань логістики при формуванні логістичного сервісу

	Вага критерію					Пріоритет альтернативи, %
	wC_1	wC_2	wC_3	wC_4	wC_5	
	0,42	0,03	0,12	0,05	0,24	
Альтернативи	Коефіцієнти важливості альтернатив за кожним критерієм					
	V_{IjC1}	V_{IjC2}	V_{IjC3}	V_{IjC4}	V_{IjC5}	
I_1	0,24	0,05	0,02	0,03	0,05	15,46
I_2	0,09	0,03	0,12	0,39	0,10	11,99
I_3	0,03	0,16	0,02	0,15	0,02	3,81
I_5	0,04	0,26	0,07	0,03	0,03	5,28
I_6	0,27	0,16	0,02	0,15	0,01	13,39
I_7	0,02	0,02	0,04	0,03	0,30	9,25
I_8	0,18	0,02	0,21	0,08	0,10	13,61
I_{10}	0,02	0,16	0,31	0,03	0,10	9,40

Порівняння показників інших критеріїв ($C_2 - C_5$) проводиться аналогічно. Вага критеріїв та значимість показників альтернатив за критеріями для зручності сприйняття інформації наведені у відсотках. У розрахунках використовуються дані значення у частках одиниці. Результати порівнянь у всіх таблицях перевірено на узгодженість. При цьому у всіх випадках було виконано вимогу $IV < 0,1$.

– на четвертому етапі обчислюємо кількісні показники для ухвалення рішення. Кількісні показники, що цікавлять нас, для прийняття рішення називають пріоритетами альтернатив. При цьому чим більше пріоритет, тим кращою для ОПР є альтернатива. Пріоритети альтернатив розраховуються за такою формулою:

$$V_j = \sum(w_i \times V_{IjCi}), \quad (5)$$

де V_j – пріоритет j -ї альтернативи $\{1, \dots, 10\}$;

w_i – вага або важливість i -го критерію $\{1, \dots, 5\}$;

V_{ijCi} – значимість показника j -ї альтернативи за i -м критерієм.

Розрахунки за цією формулою представлені у таблиці 5, підсумкові значення вказані в останньому стовпці. Найбільш пріоритетне значення виділено жирним шрифтом.

Для реалізації стратегічного завдання логістики компанії «Sfera-Avto» – «Мінімізація циклу замовлення клієнта» оптимальна (найприйнятніша) система логістичного сервісу включає такі цільові показники, як «Частка своєчасно виконаних замовлень», «Середній час циклу замовлення» та «Рівень запасів затребуваних товарів; Зауважимо, що для інших ОПР (з іншими перевагами) вибір сукупності ключових показників може бути іншим. Це можна віднести до переваг запропонованого підходу оптимізації багатокритеріальних рішень, оскільки, вибір таких завдань оптимізації залежить від системи переваг ОПР.

Варто зазначити, що найкраща альтернатива A_1 значно (на 2%) випереджає наступні за пріоритетністю комплекси логістичних послуг (альтернативи I_8 та I_6). При цьому усі вони безпосередньо стосуються тривалості циклу виконання замовлення, що відповідає назві стратегічного завдання логістики та логіці прийняття рішень. До того ж найкраща альтернатива прямо стосується своєчасності виконання замовлень. Це, до речі, зрозуміло на змістовному або вербальному рівні, враховуючи категорію товарів – комплектуючі, що приносять найбільший прибуток з ціни реалізації (високо маржинальні товари з високою оборотністю) і з обсягу (низько маржинальні товари з високою оборотністю).

Висновки

1. При оптимізації системи логістичного сервісу необхідно враховувати низку факторів, що впливають на діяльність компанії, але які неможливо точно визначити. До них відносяться стратегія компанії, характеристики діяльності клієнтів, конкурентів, постачальників і безпосередньо самої компанії – постачальника логістичних послуг.

2. В роботі запропоновано методіку оптимізації системи логістичного сервісу побудовану за методологією MAI в межах загальної політики обслуговування клієнтів. Її апробація на прикладі компанії «Sfera-Avto» показала, що обрана операційна політика у сфері обслуговування клієнтів, з огляду на найбільш значимі альтернативи I_1 «Частка своєчасно виконаних замовлень» з пріоритетом 15,46%, I_8 «Середній час циклу замовлення» з пріоритетом у 13,61%, та I_6 , «Рівень запасів затребуваних товарів» з пріоритетом у 13,39%, найбільш відповідають визначеному стратегічному завданню логістики «Мінімізація циклу замовлення клієнта». Зроблений вибір відображається в логістиці компанії від стратегічного рівня (побудова стратегічної карти підрозділу логістики та формування збалансованої системи показників логістики) до операційного рівня (виконання логістичних операцій у рамках реалізованих бізнес-процесів).

Список використаних джерел

1. Hussein A, Gruchmann T., Melkonyan A. Assessing the impact of sustainable logistics service quality on relationship quality: Survey-based evidence in Egypt, Cleaner Logistics and Supply Chain, Volume 4, 2022, 100036.;
2. Do Q. H., Kim T. Y., Wang X. Effects of logistics service quality and price fairness on customer repurchase intention: The moderating role of cross-border e-commerce experiences, Journal of Retailing and Consumer Services, Volume 70, 2023, 103165/;

3. Logistics Service Quality, Customer Satisfaction and Retention: Moderating Effects of Technological Capability. (2024). *Academic Journal of Interdisciplinary Studies*, 13(5), 163. <https://doi.org/10.36941/ajis-2024-0158>
4. Kong J., Chen Z., Liu X. A Review of Logistics Pricing Research Based on Game Theory. *Sustainability* 2022, 14, 10520. <https://doi.org/10.3390/su141710520>
5. Liu H., Zhao Y. Research on Manufacturers' Logistics Strategy Selection in the Context of E-Commerce. *Systems* 2023, 11 324. <https://doi.org/10.3390/systems11070324>;
6. Zagurskiy O., Savchenko L., Ohienko A., Zagurska S., Domin O. Methodology for the formation of the company's logistics service system. Proceedings of 23st International Scientific Conference Engineering for Rural Development 22-24.05.2024 Jelgava, LATVIA. 105-112. URL. <https://www.tf.lbtu.lv/conference/proceedings2024/>
7. Thompson A.A, Strickland A.J. Strategic Management: Concepts and Cases. McGraw-Hill/Irwin, 2003. 450.
8. Anaba D., Kess-Momoh A., Ayodeji S. Optimizing supply chain and logistics management: A review of modern practices. *Open Access Research Journal of Science and Technology*. 2024. 11. 020-028. 10.53022/oarjst.2024.11.2.0083.
9. Nnaji U., Benjamin L., Eyo-Udo N., Etukudoh E. Effective cost management strategies in global supply chains. *International Journal of Applied Research in Social Sciences*. 2024. 6. 945-953. 10.51594/ijarss.v6i5.1146.
10. Sang T. T., Minh Thu N., Hoang Khoi T., Thi Kim Huong N., Lan L.T.N., Van Thanh N. The Optimization of Transportation Costs in Logistics Enterprises during the Covid-19 Pandemic. *ARRUS Journal of Mathematics and Applied Science*, 2021. 1(2), 62-71.
11. Saaty T. L. The Hierarchon: A Dictionary of Hierarchies. Pittsburgh, Pennsylvania : RWS Publications, 1996. 510.
12. Ahmed S., El-Sayegh S. Critical Review of the Evolution of Project Delivery Methods in the Construction Industry. *Buildings* 2021, 11, 11. <https://doi.org/10.3390/buildings11010011>
13. Chaube S., Kumar A., Singh M., Kotecha K., Kumar A. An Overview of Multi-Criteria Decision Analysis and the Applications of AHP and TOPSIS Methods. *International Journal of Mathematical Engineering and Management Sciences*. 2024. 9. 581-615. 10.33889/IJMEMS.2024.9.3.030.
14. Saarikoski H., Mustajoki J., Barton D.N., Geneletti D., Langemeyer J., Gomez-Baggethun E., Marttunen M., Antunes P., Keune H., Santos R. Multi-Criteria Decision Analysis and Cost-Benefit Analysis: Comparing alternative frameworks for integrated valuation of ecosystem services, *Ecosystem Services*, Volume 22, Part B, 2016, 238-249.
15. Saaty T.L., Kearns K.P. Analytical Planning. The Organization of Systems. Pergamon Press, Oxford, New York, Toronto, Sydney, Frankfurt, 1985. 208.

References

1. Hussein A., Gruchmann T., Melkonyan A. (2022) Assessing the impact of sustainable logistics service quality on relationship quality: Survey-based evidence in Egypt, *Cleaner Logistics and Supply Chain*, Volume 4, 100036.
2. Do Q. H., Kim T. Y., Wang X. (2023) Effects of logistics service quality and price fairness on customer repurchase intention: The moderating role of cross-border e-commerce experiences, *Journal of Retailing and Consumer Services*, Volume 70, 103165/.
3. Logistics Service Quality, Customer Satisfaction and Retention: Moderating Effects of Technological Capability. (2024). *Academic Journal of Interdisciplinary Studies*, 13(5), 163. <https://doi.org/10.36941/ajis-2024-0158>

4. Kong J., Chen Z., Liu X. (2022) A Review of Logistics Pricing Research Based on Game Theory. *Sustainability*, 14, 10520. <https://doi.org/10.3390/su141710520>
5. Liu H., Zhao Y. (2023) Research on Manufacturers' Logistics Strategy Selection in the Context of E-Commerce. *Systems* 11. 324. <https://doi.org/10.3390/systems11070324>;
6. Zagurskiy O., Savchenko L., Ohiienko A., Zagurska S., Domin O. (2024) Methodology for the formation of the company's logistics service system. *Proceedings of 23st International Scientific Conference Engineering for Rural Development 22-24.05.2024 Jelgava, LATVIA*. 105-112. URL. <https://www.tf.lbtu.lv/conference/proceedings2024/>
7. Thompson A.A, Strickland A.J. (2003) *Strategic Management: Concepts and Cases*. McGraw-Hill/Irwin, 2003. 450.
8. Anaba D., Kess-Momoh A., Ayodeji S. (2024) Optimizing supply chain and logistics management: A review of modern practices. *Open Access Research Journal of Science and Technology*. 11. 020-028. 10.53022/oarjst.2024.11.2.0083.
9. Nnaji U., Benjamin L., Eyo-Udo N., Etukudoh E. (2024) Effective cost management strategies in global supply chains. *International Journal of Applied Research in Social Sciences*. 6. 945-953. 10.51594/ijarss.v6i5.1146.
10. Sang T. T., Minh Thu N., Hoang Khoi T., Thi Kim Huong N., Lan L.T.N., Van Thanh N. (2021) The Optimization of Transportation Costs in Logistics Enterprises during the Covid-19 Pandemic. *ARRUS Journal of Mathematics and Applied Science*, 2021. 1(2), 62-71.
11. Saaty T. L. (1996) *The Hierarchon: A Dictionary of Hierarchies*. Pittsburgh, Pennsylvania : RWS Publications, 10.
12. Ahmed S., El-Sayegh S. (2021) Critical Review of the Evolution of Project Delivery Methods in the Construction Industry. *Buildings* 11, 11. <https://doi.org/10.3390/buildings11010011>
13. Chaube S., Kumar A., Singh M., Kotecha K., Kumar A. (2024) An Overview of Multi-Criteria Decision Analysis and the Applications of AHP and TOPSIS Methods. *International Journal of Mathematical Engineering and Management Sciences*. 9. 581-615. 10.33889/IJMEMS.2024.9.3.030.
14. Saarikoski H., Mustajoki J., Barton D.N., Geneletti D., Langemeyer J., Gomez-Baggethun E., Marttunen M., Antunes P., Keune H., Santos R. (2016) Multi-Criteria Decision Analysis and Cost-Benefit Analysis: Comparing alternative frameworks for integrated valuation of ecosystem services, *Ecosystem Services*, Volume 22, Part B, 238-249.
15. Saaty T.L., Kearns K.P. (1985) *Analytical Planning. The Organization of Systems*. Pergamon Press, Oxford, New York, Toronto, Sydney, Frankfurt, 1985. 208.
16. Wang S., Yu Z., Wang J., Chen S. (2023). Research on CNN-LSTM brake pad wear condition monitoring based on gto multi-objective optimization. *Actuators*. Vol. 12. P. 301. <https://doi.org/10.3390/act12070301>.
17. Wei L., Choy Y.S., Cheung C.S. (2019). A study of brake contact pairs under different friction conditions with respect to characteristics of brake pad surfaces, *Tribology International*. Vol. 138. P. 99–110.

**НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ
SCIENCE JOURNAL**

**ТЕХНІЧНИЙ СЕРВІС АГРОПРОМИСЛОВОГО,
ЛІСОВОГО ТА ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСІВ
2025, № 26**

**TECHNICAL SERVICE OF AGRICULTURE,
FORESTRY AND TRANSPORT SYSTEMS
2025, № 26**

Українською, англійською мовами

**Підписано до друку 30.05.2025.
Формат 60×84 1/8 Папір офсетний. Друк
різографічний. Ум. друк. арк. 26,7. Обл.-вид. арк. 23,0.
Тираж 100 пр. Ціна договірна.**

**Адреса для листування: Україна, 61002, Харків, вул. Алчевських, 44,
Державний біотехнологічний університет
E-mail: gurnal_tc@ukr.net**

**Надруковано ТОВ «ПромАрт», Цифрова типографія,
м. Харків, вул. Весніна, 12,
+38 (057) 317-28-80,
E-mail: info@promart.in.ua**