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

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ
SCIENCE JOURNAL

ТЕХНІЧНИЙ СЕРВІС АГРОПРОМИСЛОВОГО, ЛІСОВОГО ТА ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСІВ

2024, № 25

TECHNICAL SERVICE OF AGRICULTURE, FORESTRY AND TRANSPORT SYSTEMS

2024, № 25

Харків – 2024 – 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 паливомастильних 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.

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.

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.

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.

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 №15 від 25.12.2024).

ISSN 2311-441X

© Державний біотехнологічний університет, 2024.

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 "Б" 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 № 15 from 25.12.2024).

ISSN 2311-441X

© State Biotechnological University, 2024.

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, Кишинеу).
Jozef Kolodziejv, д. т. н., проф. (Польща, Люблін).
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).
Антощенков 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).
J. Kolodziejv, Dr.Sc., Prof. (Poland, Lublin).
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. **Сиромятников Ю.М., Сиромятніков П.С.**
Тренди та інновації в аграрній механізації: підвищення сталості та енергоефективності у тваринництві 8-33

2. **Фесенко А.М.**
Оптимізація режимів випарювання соку по кольоровості у випарному відділенні цукрового заводу.....34-43

3. **Автухов А.К., Ковалевський Є.В.**
Розробка методики дослідження технологічних та експлуатаційних характеристик формуючих інструментів станів гарячої прокатки.....43-49

4. **Калюжний О.Б., Платков В.Я., Автухов А.К., Марченко М.М.**
Вплив комбінування пороутворювачів NaCl та $NaHCO_3$ на структуру та фізико-механічні властивості пористих політетрафторетиленів 50-57

5. **Рибалко І.М., Тіхонов О.В., Марков О.В., Захаров А.В., Рижков Р.С.**
Вплив модифікуючих домішок при нанесенні відновлювальних покриттів на зносостійкість.....58-67

6. **Клочко О.Ю., Дерябкіна Є.С.**
Дослідження впливу комбінованого аргонодугового наплавлення на якість антифрикційного шару.....68-79

7. **Тришевський О.І., Автухов А.К., Абдула А.Г.**
Визначення радіусів згинання на основі дослідження деформованого стану в місцях формування радіусів згинання гнутих профілів 80-90

8. **Сакунов Д.І.**
Вимоги до робочих органів агрегатів смугової обробки ґрунту для зменшення їх забивання пожнивними рештками.....91-99

9. **Осадчий І.О.**
Інноваційні рішення притискання секції та вплив притискної здатності на посів сільськогосподарської культури 100-109

10. **Петров Г.А., Надикто В.Т.**
Стабільність глибини оранки агрегатом із фронтальним плугом без опорного колеса..... 110-118

11. **Симан І.В.**
Аналіз методів випробування кабін зернозбиральних комбайнів..... 119-129

12. **Хмельовський О.В.**
Синтез параметрів глушника для вакуумної установки..... 130-143

13. **Науменко О.А., Сайчук О.В., Науменко А.О., Козій О.Б.**
Прогнозування обсягів списання сільськогосподарської техніки: методологічний підхід 144-152

14. **Коваленко В.О., Журавель О.В., Стрижак В.В., Іглін С.П., Стрижак М.Г.**
Прогнозування ваги мостових кранів методами аналізу даних..... 153-164

15. **Тицький О.Ю.**
Методи аналізу вихідних даних діагностування двигунів вантажних автомобілів 165-173

16. **Надточій О.В., Войтюк В.Д.**
Модель визначення експлуатаційних показників транспортних засобів категорії N процесу транспортування сіна в рулонах..... 174-186

17. **Уманський М.О.**
Особливості машиновикористання агродронів в технологіях виробництва сільськогосподарських культур. 187-194

18. **Євтушенко В.Д., Войтюк В.Д.**
Імітаційне моделювання вивантаження коренеплодів з кузова автотранспортного засобу. 195-206

19. **Загурський А.О.**
Конструктивні особливості гальмівних колодок сільськогосподарської техніки здатних впливати на їх ефективність за різних режимів експлуатації..... 207-218

20. **Шатров Р.В., Войтюк В.Д.**
Тестові дослідження схем розташування тари з яблуками в кузові автомобіля. 219-228

21. **Ничай І.М.**
Багатоатрибутивна декомпозиція необхідного рівня машиновикористання зернозбиральних комбайнів 229-241

22. **Соломка О.В., Войтюк В.Д.**
Перспективні пристрої для запобігання самовільного опускання платформи автомобіля. 242-250

23. **Швидун О.В.**
Алгоритм діагностування відеоендоскопією експлуатаційних дефектів агрегатів зернозбиральних комбайнів. 251-259

24. **Тітова Л.Л., Войтюк В.Д.**
Аналіз застосування багаторежимних гібридних силових агрегатів автомобілів в умовах аграрних підприємств. 260-269

25. **Роговський І.Л., Кісь-Коркіщенко Л.В.**
Особливості функціонування метантенка біогазової установки 270-281

26. **Росомаха Ю.О., Мартишко В.М.**
Аналіз параметрів транспортного засобу для потокової технології збирання плодів. 282-290

27. **Антощенков Р.В., Кусков М.А.**
До дослідження плоско-паралельного руху посівного машинно-тракторного агрегату. 291-305

CONTENTS

1. **Syromyatnikov Yu.M., Syromyatnikov P.S.**
Trends and innovations in agricultural mechanization: increasing sustainability and energy efficiency in livestock farming 8-33

2. **Fesenko A.M.**
Optimization of juice evaporation modes by coloration in evaporation section of sugar factor 34-43

3. **Avtukhov A.K., Kovalevsky E.V.**
Development of methodology for studying the technological and operational characteristics of forming tools of hot rolling mills 44-49

4. **Kalyuzhnyi O.B., Platkov V.Ya., Avtukhov A.K., Marchenko M.M.**
The influence of combining porogens NaCl and $NaHCO_3$ on structure and physic-mechanical properties of porous polytetrafluoroethylenes 50-57

5. **Rybalko I.M., Tihonov O.V., Markov O.V., Zakharov A.V., Ryzhkov R.S.**
Influence of modifying additives when applying restoration coatings on wear resistance..... 58-67

6. **Klochko O.Yu., Deryabkina E.S.**
Study of influence of combined argon-arc surfacing on quality of antifriction layer 68-79

7. **Trishevskiy O.I., Avtuhov A.K., Abdula A.G.**
Determination of bending radii based on study of deformed state in places of formation of bending radii of bent proofiles 80-90

8. Sakunov D.I.
Requirements for working bodies of strip tillage units to reduce their clogging with crop residues 91-99

9. **Osadchiy I.O.**
Innovative solutions for clamping section and effect of clamping capacity on sowing of agricultural crops 100-109

10. **Petrov G.A., Nadykto V.T.**
Ploughing depth stability with front plough without support wheel 110-118

11. **Syman I.V.**
Analysis of methods of testing cabins of grain harvesting combiners 119-129

12. **Khmelovskyi O.V.**
Synthesis of silencer parameters for vacuum unit 130-143

13. **Naumenko O.A., Saichuk O.V., Naumenko A.O., Koziy O.B.**
Forecasting the volume of agricultural machinery write-off: a methodological approach 144-152

14. **Kovalenko V.O., Zhuravel′ O.V., Stryzhak V.V., Ihlin S.P., Stryzhak M.H.**
Forecasting the weight of bridge cranes using data analysis methods.. 153-164

15. **Tytskyi O.Yu.**
Methods of analysis of output data for truck engine diagnostics 165-173

16. **Nadochiy O.V., Voytyuk V.D.**
Model for determining the performance indicators of category N vehicles
in process of transporting hay in rolls. 174-186

17. **Umanskiy M.O.**
Features of use of agricultural drones in crop production technologies..... 187-194

18. **Yevtushenko V.D., Voytyuk V.D.**
Simulation modeling of root crop unloading from body of vehicle. 195-206

19. **Zagurskiy A.O.**
Design features of brake pads of agricultural machinery that can affect
their efficiency under different operating conditions 207-218

20. **Shatrov R.V., Voytyuk V.D.**
Test studies of layout of container with apples in body of car. 219-228

21. **Nichay I.M.**
Multi-attribute decomposition of required level of machine utilization of combine
harvesters. 229-241

22. **Solomka O.V., Voytyuk V.D.**
Prospective devices to prevent unauthorized lowering of vehicle platform. 242-250

23. **Shvydun O.V.**
Algorithm for diagnosing operational defects of combine harvester units
by videoendoscopy 251-259

24. **Titova L.L., Voytyuk V.D.**
Analysis of use of multi -mode hybrid power units of cars
in agricultural enterprises. 260-269

25. **Rogovskii I.L., Kys-Korkyshchenko L.V.**
Features of the functioning of the biogas plant methane tank..... 270-281

26. **Rosomakha Yu.O., Martyshko V.M.**
Analysis of vehicle parameters for flow technology of fruit harvesting 282-290

27. **Antoshchenkov R.V., Kuskov M.A.**
On study of plane-parallel movement of sowing machine-tractor unit. 291-305

Сиромятников Ю.М.,
Сиромятніков П.С.
Державний біотехнологічний університет,
м. Харків, Україна
E-mail:
Gara176@btu.kharkov.ua
Ukridu@gmail.com

ТРЕНДИ ТА ІННОВАЦІЇ В АГРАРНІЙ МЕХАНІЗАЦІЇ: ПІДВИЩЕННЯ СТАЛОСТІ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ У ТВАРИННИЦТВІ

https://doi.org/10.37700/ts.2024.25.8-33

УДК 631.3:636:620.9

Сиромятников Ю.М., Сиромятніков П.С. ***Тренди та інновації в аграрній механізації: підвищення сталості та енергоефективності у тваринництві.***

Анотація. *Розглянуто сучасні тенденції та виклики механізації тваринництва з акцентом на впровадження інноваційних технологій, енергоефективність та сталість розвитку. Проаналізовано використання автоматизованих систем, точного землеробства, відновлюваних джерел енергії, таких як біогазові установки, сонячні панелі та геотермальні системи. Особливу увагу приділено екологічним, економічним і соціальним аспектам сталого розвитку. Визначено перспективи інтеграції цифрових технологій, штучного інтелекту та розширення нових ринків, зокрема у виробництві органічних добрив і біоенергії. Результати дослідження демонструють, що впровадження комплексного підходу до механізації сприяє підвищенню продуктивності, зниженню витрат і мінімізації негативного впливу на довкілля, забезпечуючи довгострокову сталість галузі. Ключові слова: механізація тваринництва, інноваційні технології, енергоефективність, сталість, відновлювані джерела енергії, автоматизація, переробка відходів, точне землеробство, екологічна сталість, економічна сталість, цифрові технології.*

Ключові слова*: механізація тваринництва, інноваційні технології, енергоефективність, сталість, відновлювані джерела енергії, автоматизація, переробка відходів, точне землеробство, екологічна сталість, економічна сталість, цифрові технології.*

Syromyatnikov Yu.M., Syromyatnikov P.S. ***Trends and innovations in agricultural mechanization: increasing sustainability and energy efficiency in livestock farming****.*

Abstract. *Modern trends and challenges of livestock mechanization are considered with an emphasis on the introduction of innovative technologies, energy efficiency and sustainable development. The use of automated systems, precision agriculture, renewable energy sources, such as biogas plants, solar panels and geothermal systems, is analyzed. Particular attention is paid to environmental, economic and social aspects of sustainable development. The prospects for the integration of digital technologies, artificial intelligence and the expansion of new markets are identified, in particular in the production of organic fertilizers and bioenergy. The results of the study demonstrate that the implementation of an integrated approach to mechanization contributes to increasing productivity, reducing costs and minimizing the negative impact on the environment, ensuring the long-term sustainability*

of the industry. Keywords: livestock mechanization, innovative technologies, energy efficiency, sustainability, renewable energy sources, automation, waste processing, precision agriculture, environmental sustainability, economic sustainability, digital technologies.

Key words: *livestock mechanization, innovative technologies, energy efficiency, sustainability, renewable energy sources, automation, waste processing, precision agriculture, environmental sustainability, economic sustainability, digital technologies.*

Syromyatnikov Yu.M., Syromiatnikov P.S. ***Theoretical analysis of seed movement in inter-deck space of vibro-friction separator.***

Постановка проблеми

Механізація є невід'ємною частиною сучасного аграрного сектору, яка спрямована на підвищення продуктивності, ефективності та сталого розвитку виробничих процесів. У галузі тваринництва механізація забезпечує раціональне використання ресурсів, автоматизацію трудомістких процесів та впровадження інноваційних технологій. Сучасні виклики, зокрема зміна клімату, необхідність зменшення вуглецевого сліду, інтеграція відновлюваних джерел енергії та зростаюча конкуренція, вимагають нових підходів до організації технологічних процесів у тваринництві.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Сталий розвиток тваринництва передбачає інтеграцію енерго- та ресурсозберігаючих технологій, таких як біомаса, сонячна та вітрова енергія. Наприклад, дослідження Kodirov et al. [1] показує, що впровадження біогазових установок для утилізації відходів тваринництва дозволяє зменшити викиди CO_2 та виробляти енергію для внутрішніх потреб.

Дослідження інноваційних підходів до інтеграції механізації та відновлюваних джерел енергії стало об'єктом багатьох наукових праць. Наприклад, Cui et al. [2] аналізують застосування відновлюваних енергетичних технологій у системах обігріву птахівництва, підкреслюючи важливість їхнього використання для зменшення залежності від викопних ресурсів. У свою чергу, Paul et al. [3] вивчають шляхи мінімізації агроекологічних компромісів через впровадження сталого інтенсифікованого тваринництва у дрібних господарствах Танзанії.

Ключову роль у розвитку сталого тваринництва відіграють біомасові енергетичні технології. Наприклад, Paris et al. [4] демонструють, як впровадження біомасових систем у молочному господарстві дозволяє підвищити енергоефективність та економічну стійкість виробництва. Аналогічно, Augustyn et al. [5] зазначають, що інтегровані системи обігріву і живлення можуть бути ефективно використані в умовах автономного енергозабезпечення.

Вплив механізації на зменшення вуглецевого сліду є актуальною темою. Наприклад, Romaniuk et al. [6] досліджують ефективність біомасових технологій у молочному господарстві та їхню роль у зниженні екологічного впливу. Wahyudi [7] аналізує потенціал біогазових установок для скорочення викидів парникових газів у фермерських господарствах. Дослідження Ćehajić [8] підкреслює переваги когенераційних біогазових систем на фермах. У свою чергу, Reddy et al. [9] зосереджуються на економічній і екологічній оцінці багатогенераційних відновлюваних енергосистем для молочних ферм, демонструючи їхній значний потенціал. Подібно, Pochwatka et al. [10] аналізують енергетичні та економічні аспекти експлуатації біогазових станцій у середніх фермерських господарствах Польщі, Shalini et al. [11] в

Індії, Radko [12] в Україні. Інтеграція відновлюваних джерел енергії має велике значення для сталого розвитку. Наприклад, Salman et al. [13], Bagdadee et al. [14] розглядають гібридні енергосистеми на основі біогазу, сонячної енергії та кінетичної енергії. Дослідження Aisyah et al. [15] підкреслюють потенціал біогазу як відновлюваного джерела енергії для малих фермерських господарств у південних регіонах Індонезії. Liu et al. [16] досліджують вплив механізації на зменшення використання добрив, акцентуючи увагу на її енергетичних перевагах.

Дослідження Gousiya et al. [17] аналізують структуру використання енергії у механізованому виробництві рису в Індії. Подібним чином, Purba et al. [18] досліджують ефективність механізації в зрошуваних районах Індонезії. Інноваційні підходи у механізації сприяють підвищенню продуктивності та ефективності. Manwatkar et al. [19] розглядають сучасні тенденції механізації в аграрному секторі Індії. Miyamoto et al. [20] досліджують впровадження технологій для покращення аграрних процесів в Індонезії. Namdeo et al. [21] аналізують рівень механізації для виробництва сільськогосподарських культур у плато Бастар, Індія. Подібним чином, Rakhra et al. [22] оцінюють ефективність різних видів механізованих інструментів у фермерських господарствах. Chaudhari et al. [23] зосереджуються на статусі механізації для виробництва пшениці та рису в Уттар-Прадеш, Індія. Mallesh et al. [24] підкреслюють необхідність інновацій для підвищення продуктивності у цьому ж регіоні.

Ключовим напрямом досліджень є впровадження новітніх технологій у фермерських господарствах. Kandpal et al. [25] розглядають структуру володіння технікою в аграрному секторі Індії та аналізують її вплив на продуктивність. Yamamoto et al. [26] вивчають механізовані системи у фруктовому виробництві Японії.

Sudhakar et al. [27] досліджують селективну механізацію та шляхи підвищення продуктивності та рентабельності вирощування сафлору.

Sunil et al. [28] підкреслюють перспективи точного землеробства як інструменту майбутнього для фермерів Індії. Pitono [29] вивчає можливості точного фермерства для вирощування перцю в Індонезії. Ahmed et al. [30] аналізують вплив механізації на продуктивність фермерських господарств у субтропічних регіонах Джамму і Кашмір. Beluhova-Uzunova et al. [31] підкреслюють концепції точного фермерства як ключові перспективи сталого розвитку. Kusumandari et al. [32] досліджують можливості використання гною як джерела біогазу для відновлюваної енергетики. Stadnik et al. [33] розглядають незалежне енергопостачання для ферм на основі відновлюваних джерел енергії.

Nugraha et al. [34] аналізують концепцію розвитку біогазових систем як відновлюваного джерела енергії в сільських районах Індонезії. Indrawati et al. [35] досліджують інтегровані енергетичні технології для ферм у регіоні Тангеранг. Caetano et al. [36] демонструють можливості конверсії біогазу з тваринницького гною в електроенергію за допомогою двигунів Стірлінга. Hidayati et al. [37] оцінюють технічні та технологічні аспекти біогазової агропромисловості, заснованої на коров'ячому гною.

Wahyuni et al. [38] наголошують на важливості групового підходу до впровадження біогазових технологій у сільській місцевості. Aquilani et al. [39] аналізують точні технології у системах випасу худоби, підкреслюючи їхній потенціал для сталого розвитку. Maturo et al. [40] досліджують проєктування енергетично незалежних спільнот у тваринництві, демонструючи приклад ферми в Північній Італії. Medvedev [41] аналізує енергозберігаючі технології для управління фермами з вирощування великої рогатої худоби.

Sklyar et al. [42] вивчають покращення енергетичних систем у птахофабриках. Araújo et al. [43] оцінюють техніко-економічну доцільність використання трубчастих

біодигесторів і сонячної енергії в умовах сільського господарства. Costantino et al. [44] пропонують методологію сертифікації енергетичної ефективності тваринницьких будівель, зокрема свинарників. Bartkowiak [45] розглядає концепцію енергозберігаючих і низьковуглецевих будівель для фермерських господарств.

Shablia et al. [46] аналізують ефективність ручних та механізованих технологій видалення гною. Moustakas et al. [47] підкреслюють сучасні виклики у впровадженні відновлюваних енергетичних систем. Sekaran et al. [48] досліджують інтегровані системи рослинництва та тваринництва як стратегію підвищення продуктивності та забезпечення продовольчої безпеки. Walston et al. [49] підкреслюють перспективи агровольтаїчних систем для досягнення синергії між енергетичними та екологічними цілями.

Henchion et al. [50] аналізують майбутні тренди споживання м'яса, молока та яєць, наголошуючи на важливості тваринницьких систем у глобальному виробництві білків. Al-Shetwi [51] досліджує вплив стійкого розвитку відновлюваної енергетики на енергетичний сектор. Martin et al. [52] підкреслюють потенціал багатовидового тваринництва для підвищення сталості ферм. Al-Ghussain et al. [53] досліджують інтегровані системи, що базуються на сонячній, вітровій енергії та біомасі, для автономного енергозабезпечення.

Danda [54] аналізує вплив інновацій у сільськогосподарській техніці на підвищення ефективності фермерських господарств. Gorjian et al. [55] підкреслюють потенціал сучасної сільськогосподарської техніки, що працює на сонячній енергії, як рішення для сталих фермерських операцій. Jiang et al. [56] досліджують вплив популяризації механізації на енергетичну та екологічну продуктивність у сільському господарстві Китаю. Wu et al. [57] розглядають шляхи зниження енергоінтенсивності сільськогосподарських процесів шляхом структурних змін та підвищення ефективності.

Sharma et al. [58] вивчають роль технологічних революцій у впровадженні інтелектуального фермерства, підкреслюючи виклики та перспективи. Moerkerken et al. [59] аналізують чинники енергоефективності у молочному секторі Нідерландів, наголошуючи на дилемах стійкості. Nsabiyeze et al. [60] оцінюють глобальну ефективність політик зниження викидів вуглецю в сільському господарстві, підкреслюючи їхню актуальність у контексті зміни клімату. Vaintrub et al. [61] досліджують точні технології у тваринництві, наголошуючи на можливостях їхнього застосування у пасовищних системах.

Parra-López et al. [62] аналізують впровадження цифрових технологій у сільське господарство для адаптації до змін клімату. Rong et al. [63] вивчають механізми впливу зелених технологічних інновацій на інтенсивність викидів CO2 у сільському господарстві. Corigliano et al. [64] проводять комплексне дослідження енергоспоживання у харчовій промисловості, підкреслюючи виклики та вплив на екологію. Ren et al. [65] аналізують роль інновацій і природних ресурсів у забезпеченні зеленого зростання сільського господарства.

SaberiKamarposhti et al. [66] оцінюють вплив штучного інтелекту на зменшення викидів парникових газів у сільському господарстві. Bragaglio et al. [67] порівнюють дві молочні ферми, демонструючи ефективність точного землеробства як стратегії підвищення сталості. He et al. [68] досліджують технології зеленого сільського господарства для підвищення низьковуглецевої ефективності в Китаї. Javaid et al. [69] підкреслюють роль технологій Agriculture 4.0 у розвитку розумного фермерства. Egas et al. [70] оцінюють енергоефективність малих систем виробництва молока, підкреслюючи їхню екологічну та економічну доцільність.

Ці дослідження підкреслюють, що інтеграція сучасних технологій та відновлюваних джерел енергії у тваринництво є ключем до вирішення викликів

сучасного агропромислового сектору. Зокрема, механізація у поєднанні з автоматизацією процесів сприяє підвищенню продуктивності, енергоефективності та екологічної сталості.

Аналіз наявних наукових даних підтверджує, що сталий розвиток галузі залежить від адаптації технологій до місцевих умов, раціонального використання ресурсів та впровадження низьковуглецевих рішень. Наприклад, використання біогазу, сонячної енергії, гібридних енергетичних систем та точного землеробства дозволяє значно зменшити вуглецевий слід фермерських господарств, оптимізуючи витрати і підвищуючи ефективність виробництва.

Метою подальших досліджень має стати створення стратегій для забезпечення сталого розвитку тваринництва шляхом інтеграції сучасних підходів до механізації, автоматизації та енергоефективності. Особлива увага повинна приділятися розробці локалізованих рішень, які відповідають потребам малих та середніх фермерських господарств у різних регіонах світу.

Застосування нових підходів дозволить досягти балансу між продуктивністю та екологічною відповідальністю, що є основою для сталого розвитку тваринництва у XXI столітті.

Формулювання мети досліджень

Метою даного дослідження є аналіз сучасних тенденцій, інноваційних підходів та технологій механізації у галузі тваринництва з акцентом на впровадження енергоефективних і сталих рішень. Особлива увага приділяється інтеграції відновлюваних джерел енергії, автоматизації виробничих процесів та їхньому впливу на продуктивність, зниження вуглецевого сліду і раціональне використання природних ресурсів.

Цілі дослідження включають:

1. Визначення ключових викликів і тенденцій розвитку механізації у тваринництві.
2. Огляд новітніх технологій, таких як біогазові установки, автоматизовані системи годування та точне землеробство.
3. Аналіз впливу впровадження механізації на енергоефективність та екологічну сталість.
4. Оцінка соціально-економічних наслідків автоматизації в умовах сільського господарства.

Результати досліджень

Сучасні виклики механізації тваринництва. Механізація тваринництва стикається з низкою викликів, обумовлених як технологічними, так і екологічними, соціально-економічними та організаційними аспектами. Вирішення цих проблем є ключовим для забезпечення сталого розвитку галузі.

Екологічні виклики. Однією з основних проблем є вплив тваринництва на довкілля. У процесі механізації, особливо у великих господарствах, виникає значний вуглецевий слід, пов'язаний із використанням викопного палива для роботи машин і обладнання. Дослідження показують, що впровадження відновлюваних джерел енергії, таких як біогаз і сонячна енергія, дозволяє скоротити викиди вуглекислого газу [1, 4, 62].

Інша важлива екологічна проблема – управління відходами. Відходи тваринництва можуть спричиняти забруднення ґрунтів і водних ресурсів. Використання

біогазових установок для переробки органічних відходів дозволяє не лише мінімізувати їхній вплив на довкілля, але й отримувати додаткову енергію [24, 48, 56].

Енергоефективність. Енергозатратність є ще одним важливим викликом. У тваринництві витрачається значна кількість енергії на обігрів приміщень, забезпечення водопостачання, годування тварин тощо. Рішенням стає інтеграція сучасних енергоефективних технологій, таких як комбіновані системи тепла та електроенергії, сонячні панелі та геотермальні джерела [5, 42, 50].

Технологічні виклики. Сучасні технології вимагають значних капіталовкладень і кваліфікованого обслуговування. У невеликих господарствах це може стати бар'єром для впровадження інновацій. Наприклад, автоматизовані системи годування чи доїння, хоч і підвищують продуктивність, вимагають відповідних інвестицій [45, 46].

Соціально-економічні виклики. Механізація впливає на зайнятість у сільській місцевості. Хоча автоматизація створює нові можливості для працевлаштування у сфері обслуговування техніки, вона також скорочує кількість традиційних робочих місць у тваринництві [11, 63]. Це ставить перед суспільством завдання адаптації сільського населення до нових умов і підвищення рівня освіти.

Таблиця 1

Сучасні виклики механізації тваринництва

Категорія викликів	Опис	Можливі рішення	Джерела
Екологічні виклики	Викиди вуглекислого газу через використання викопного палива; забруднення ґрунтів і вод органічними відходами.	Впровадження відновлюваних джерел енергії (біогаз, сонячна енергія), утилізація відходів через біогазові установки.	[1, 4, 24, 48, 62]
Енергоефективність	Високі витрати енергії на обігрів приміщень, водопостачання, годування тварин.	Інтеграція енергоефективних систем (комбіновані тепло-електростанції, сонячні панелі, геотермальні джерела).	[5, 42, 50]
Технологічні виклики	Висока вартість сучасного обладнання; потреба у кваліфікованому персоналі для обслуговування техніки.	Інвестиції в навчання персоналу, адаптація доступних за ціною рішень для малих фермерських господарств.	[45, 46]
Соціально-економічні виклики	Скорочення традиційних робочих місць у тваринництві через автоматизацію; потреба в підвищенні кваліфікації працівників.	Перенавчання персоналу для роботи з новими технологіями; розвиток сервісних центрів з обслуговування обладнання.	[11, 63]
Організаційні виклики	Необхідність оптимізації логістичних процесів і впровадження ефективних стратегій управління новими технологіями.	Розробка стратегій впровадження інновацій; планування технічного обслуговування, підтримка малого бізнесу у впровадженні нових технологій.	[2, 7, 52]

Організаційні виклики. Впровадження новітніх технологій потребує розробки ефективних стратегій управління. Важливу роль відіграє оптимізація логістичних процесів, забезпечення технічного обслуговування та навчання персоналу для роботи з новими технологіями [2, 7, 52].

Перспективи вирішення викликів. Попри існуючі проблеми, сучасні дослідження демонструють шляхи їхнього вирішення. Впровадження точного землеробства, автоматизація процесів, використання локальних відновлюваних джерел енергії та відповідальне управління природними ресурсами можуть стати основою для сталого розвитку галузі [3, 27, 41]. Стратегічне планування та міжнародна співпраця сприятимуть подоланню перешкод і впровадженню інновацій.

Таким чином, вирішення сучасних викликів механізації тваринництва потребує комплексного підходу, що враховує екологічні, соціально-економічні та технологічні аспекти. Основні виклики, які виникають у процесі механізації тваринництва, а також можливі підходи до їх вирішення наведені в (табл. 1).

Пропорційний розподіл основних викликів механізації тваринництва представлено на діаграмі (рис.1). Найбільшу частку займають екологічні виклики, які становлять 30% від загального обсягу проблем.

Це зумовлено значними викидами парникових газів унаслідок використання викопного палива та проблемами управління органічними відходами, які забруднюють ґрунти і водні ресурси [1, 4, 24, 48, 62].

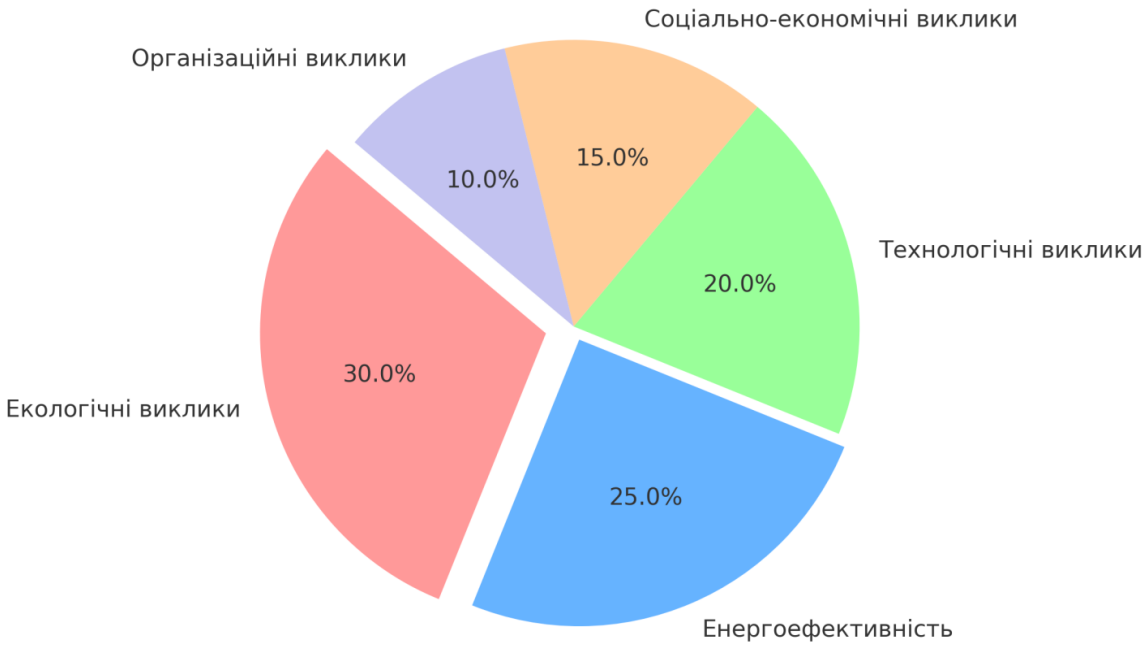


Рис. 1. Пропорційний розподіл основних викликів механізації тваринництва.

Другу позицію займають виклики енергоефективності, що складають 25%. Значні енергозатрати на обігрів приміщень, водопостачання та годування тварин вимагають впровадження сучасних енергоефективних рішень, таких як сонячні панелі, біогазові установки та геотермальні системи [5, 42, 50]. Технологічні виклики становлять 20% і пов'язані з високою вартістю обладнання, що створює бар'єри для малих господарств, а також з потребою у кваліфікованому персоналі для обслуговування техніки [45, 46]. Соціально-економічні виклики складають 15% і стосуються скорочення робочих місць через автоматизацію виробничих процесів, що потребує перенавчання працівників для роботи з новими технологіями [11, 63].

Організаційні виклики, що займають 10%, пов'язані з необхідністю розробки ефективних стратегій управління новими технологіями та оптимізації логістичних процесів [2, 7, 52]. Таким чином, найбільша увага має бути зосереджена на вирішенні екологічних та енергоефективних проблем, які разом складають 55% усіх викликів механізації тваринництва.

Інноваційні технології у механізації тваринництва. Інноваційні технології відіграють вирішальну роль у розвитку механізації тваринництва, сприяючи підвищенню продуктивності, ефективності та сталості виробництва. Основні напрямки впровадження таких технологій охоплюють автоматизацію, використання відновлюваних джерел енергії, точне землеробство та інтеграцію сучасних інформаційних систем.

Автоматизація процесів. Автоматизовані системи годування, доїння та управління фермою стали базовим компонентом сучасного тваринництва. Вони дозволяють скоротити витрати праці, зменшити втрати корму і підвищити точність виконання завдань. Наприклад, автоматичні системи годування забезпечують оптимальне дозування кормів, що позитивно впливає на продуктивність тварин [45, 46].

Доїльні роботи значно підвищують якість молока та ефективність роботи ферм, мінімізуючи вплив людського фактора [11, 63].

Використання відновлюваних джерел енергії. Інтеграція біогазових установок, сонячних панелей та геотермальних джерел енергії є важливим напрямком у сталому розвитку тваринництва. Біогазові установки дозволяють переробляти відходи тваринництва, отримуючи енергію для внутрішніх потреб господарства [24, 48]. Сонячні панелі використовуються для енергопостачання систем освітлення, вентиляції та обігріву приміщень [42, 62].

Точне землеробство та моніторинг. Технології точного землеробства, які включають використання датчиків, GPS та програмного забезпечення для аналізу даних, успішно впроваджуються у тваринництві. Вони дозволяють відстежувати стан здоров'я тварин, контролювати витрати корму та води, а також оптимізувати використання ресурсів [7, 27]. Датчики для моніторингу мікроклімату в приміщеннях для утримання тварин допомагають підтримувати оптимальні умови, що знижує стрес у тварин і підвищує їхню продуктивність [58].

Інтегровані системи управління. Сучасні інформаційні системи для управління фермою об'єднують дані про стан тварин, витрати ресурсів та ефективність процесів. Такі системи дозволяють приймати обґрунтовані рішення для підвищення продуктивності й сталості виробництва [67].

Інноваційні рішення для енергоефективності. Комбіновані системи тепла та електроенергії, які працюють на біомасі, дозволяють значно зменшити витрати на енергопостачання. Наприклад, використання теплових насосів і систем рекуперації тепла сприяє економії енергії у великих господарствах [50, 66].

Перспективи впровадження. Інноваційні технології в механізації тваринництва дозволяють не лише знижувати витрати, а й мінімізувати негативний вплив на довкілля. Їхнє впровадження сприяє підвищенню рентабельності, що особливо важливо для великих ферм і малих господарств, які хочуть залишатися конкурентоспроможними [1, 5, 53].

Таким чином, інноваційні технології у механізації тваринництва є основою сталого розвитку галузі, забезпечуючи ефективне використання ресурсів, зниження витрат і підвищення якості продукції.

Узагальнюючі ключові напрями інноваційних технологій у механізації тваринництва, їхні переваги та джерела для подальшого вивчення представлені в (табл. 2).

Таблиця 2

Інноваційні технології у механізації тваринництва

Напрямок технологій	Опис	Переваги	Джерела
Автоматизація процесів	Використання автоматизованих систем годування, доїння, моніторингу стану тварин.	Скорочення витрат праці, мінімізація втрат корму, підвищення продуктивності.	[11, 45, 46, 63]
Відновлювані джерела енергії	Інтеграція біогазових установок, сонячних панелей, геотермальних джерел енергії.	Скорочення енергозатрат, утилізація відходів, зменшення викидів вуглекислого газу.	[24, 42, 48, 62]
Точне землеробство	Використання GPS, датчиків і програмного забезпечення для моніторингу стану тварин і оптимізації ресурсів.	Контроль здоров'я тварин, оптимізація використання кормів і води, зниження витрат.	[7, 27, 58]
Моніторинг мікроклімату	Датчики для вимірювання температури, вологості, якості повітря в приміщеннях для утримання тварин.	Підтримання оптимальних умов, зниження стресу тварин, підвищення продуктивності.	[7, 58]
Інтегровані системи управління	Програмні системи для аналізу та управління даними про стан тварин, витрати ресурсів, ефективність процесів.	Прийняття обґрунтованих рішень, зниження витрат, підвищення ефективності.	[67]
Енергоефективні рішення	Використання теплових насосів, систем рекуперації тепла, комбінованих теплоелектростанцій на біомасі.	Зниження витрат на енергію, підвищення енергоефективності великих господарств.	[50, 66]
Переробка відходів	Використання органічних відходів для виробництва біогазу, добрив або енергії.	Зменшення забруднення, отримання додаткової енергії або прибутку від реалізації добрив.	[24, 48]

Розподіл внеску основних інноваційних технологій у механізацію тваринництва ілюструє (рис.2). Найбільший внесок припадає на автоматизацію процесів, яка охоплює системи годування, доїння та моніторинг тварин. Впровадження цих технологій дозволяє значно скоротити витрати праці, зменшити втрати корму та підвищити ефективність господарств [45, 46, 63].

Відновлювані джерела енергії, такі як біогазові установки, сонячні панелі та геотермальні системи, займають значну частку, оскільки вони сприяють скороченню енергозатрат і мінімізації екологічного впливу [24, 42, 48, 62].

Технології точного землеробства, що використовують GPS, датчики та програмне забезпечення, забезпечують оптимізацію використання ресурсів і моніторинг стану тварин, що також має значний вплив на сталий розвиток [7, 27].

Моніторинг мікроклімату за допомогою датчиків для контролю температури та вологості допомагає підтримувати комфортні умови для тварин, знижуючи стрес і покращуючи продуктивність [58]. Інтегровані системи управління дозволяють ефективно аналізувати дані про стан тварин, витрати ресурсів і ефективність

виробничих процесів, що сприяє прийняттю обґрунтованих рішень для підвищення продуктивності [67].

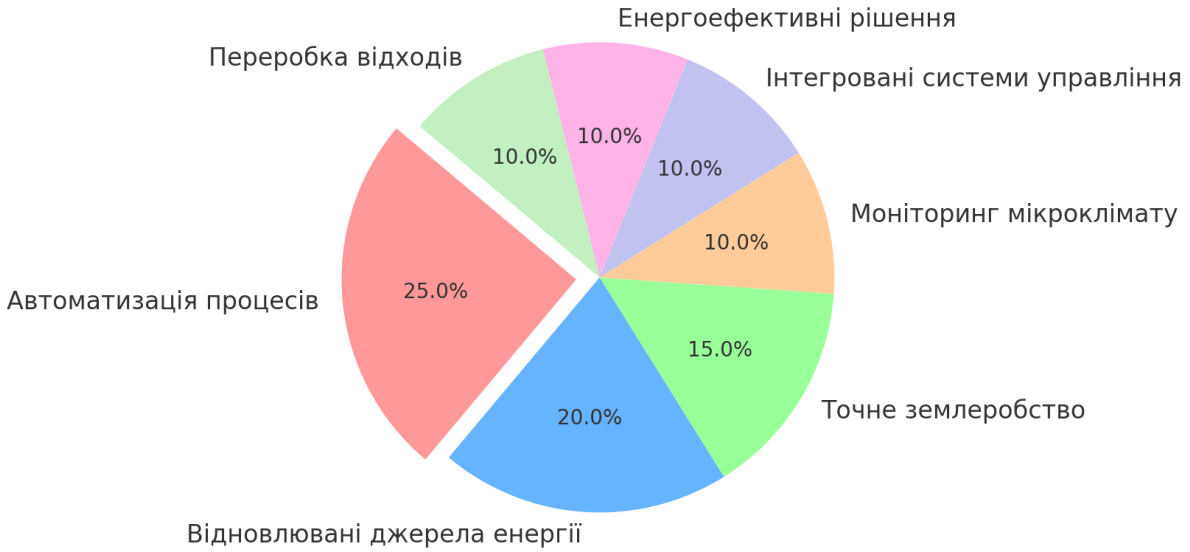


Рис. 2. Розподіл внеску інноваційних технологій у механізацію тваринництва.

Енергоефективні рішення, такі як комбіновані теплоелектростанції та системи рекуперації тепла, сприяють скороченню витрат на енергопостачання та підвищенню ефективності великих господарств [50, 66].

Переробка відходів через біогазові установки або виробництво органічних добрив забезпечує екологічну та економічну вигоду, зменшуючи негативний вплив на довкілля [24, 48].

Енергоефективність та збереження ресурсів. Енергоефективність і раціональне використання ресурсів є ключовими аспектами сталого розвитку механізації тваринництва. Впровадження сучасних технологій дозволяє зменшити енергозатрати, оптимізувати використання природних ресурсів і мінімізувати негативний вплив на довкілля.

Відновлювані джерела енергії. Одним із важливих напрямів є використання відновлюваних джерел енергії. Біогазові установки, що працюють на органічних відходах тваринництва, забезпечують енергією для внутрішніх потреб ферм і зменшують залежність від викопного палива. Це також сприяє утилізації відходів і зменшенню викидів парникових газів [24, 48]. Сонячні панелі широко застосовуються для забезпечення освітлення, вентиляції та обігріву приміщень, особливо в регіонах із високою інсоляцією [42, 62]. Геотермальні системи використовуються для обігріву та охолодження, забезпечуючи стабільність мікроклімату на фермах [4, 50].

Теплоенергетичні рішення. Сучасні системи комбінованого виробництва тепла та електроенергії (когенераційні установки) дозволяють ефективно використовувати енергію, знижуючи витрати на її виробництво. Наприклад, використання систем рекуперації тепла забезпечує повторне використання теплової енергії для обігріву приміщень і підготовки води [66].

Збереження водних ресурсів. Раціональне використання води в тваринництві забезпечується через впровадження сучасних систем зрошення та водозабезпечення. Датчики для контролю вологості та автоматизовані системи подачі води дозволяють

зменшити втрати, забезпечуючи точне водопостачання [47, 61]. Управління стоками також сприяє збереженню якості водних ресурсів і зменшенню їх забруднення [29].

Оптимізація використання кормів. Технології автоматизованого годування дозволяють точно дозувати корм, що знижує його перевитрати та покращує раціон тварин. Це не лише зменшує витрати, а й сприяє підвищенню продуктивності за рахунок раціонального використання ресурсів [45, 46].

Переробка відходів. Органічні відходи тваринництва переробляються у біогаз або використовуються для виробництва органічних добрив. Це забезпечує як економічну, так і екологічну вигоду, мінімізуючи забруднення довкілля [24, 48].

Перспективи розвитку. Інтеграція енергоефективних рішень у механізацію тваринництва дозволяє не лише зменшити енергозатрати, але й забезпечити стабільність виробництва навіть у складних кліматичних умовах. Використання відновлюваних джерел енергії, раціонального водопостачання та автоматизації годування створює основу для сталого розвитку галузі [7, 42, 58].

Таким чином, енергоефективність і збереження ресурсів є фундаментальними напрямками для забезпечення рентабельності та екологічності тваринництва. Впровадження цих рішень сприяє підвищенню продуктивності, зниженню витрат і збереженню природних ресурсів для майбутніх поколінь.

Таблиця 3 підсумовує ключові напрямки енергоефективності та збереження ресурсів у механізації тваринництва, їхні переваги та джерела для подальшого вивчення.

Таблиця 3

Енергоефективність та збереження ресурсів у механізації тваринництва

Напрямок	Опис	Переваги	Джерела
Відновлювані джерела енергії	Використання біогазу, сонячних панелей, геотермальних систем для забезпечення енергії.	Скорочення енергозатрат, зменшення залежності від викопного палива, утилізація відходів.	[24, 42, 48, 62]
Теплоенергетичні рішення	Комбіновані когенераційні системи, рекуперація тепла для обігріву та нагріву води.	Економія енергії, повторне використання тепла, зниження витрат на енергопостачання.	[50, 66]
Збереження водних ресурсів	Автоматизовані системи подачі води, датчики вологості, управління стоками.	Зменшення втрат води, збереження її якості, оптимізація використання в господарствах.	[47, 61, 29]
Оптимізація використання кормів	Автоматизовані системи годування для точного дозування корму.	Зниження перевитрат, покращення раціону, підвищення продуктивності тварин.	[45, 46]
Переробка відходів	Перетворення органічних відходів на біогаз або органічні добрива.	Мінімізація забруднення, додатковий прибуток, використання відходів як ресурсів.	[24, 48]

Рисунок 3 ілюструє розподіл основних напрямків енергоефективності та збереження ресурсів у механізації тваринництва. Найбільшу частку займає використання відновлюваних джерел енергії, таких як біогазові установки, сонячні

панелі та геотермальні системи, які забезпечують скорочення енергозатрат, утилізацію відходів та зменшення викидів парникових газів [24, 42, 48, 62].

На другому місці знаходяться теплоенергетичні рішення, включаючи когенераційні системи та рекуперацію тепла, які дозволяють повторно використовувати теплову енергію для обігріву приміщень і підігріву води, знижуючи витрати енергії [50, 66].

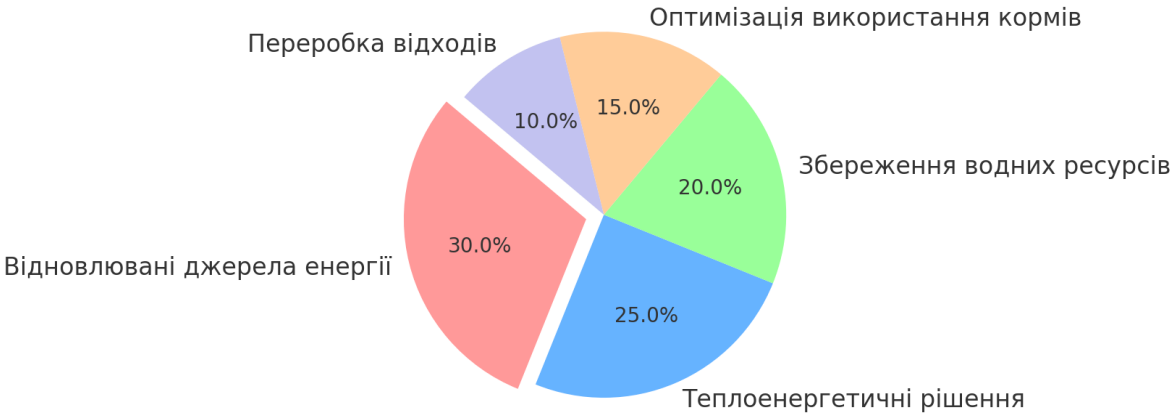


Рис. 3. Розподіл напрямків енергоефективності та збереження ресурсів у тваринництві.

Збереження водних ресурсів також є важливим аспектом. Автоматизовані системи подачі води, контроль вологості та управління стоками сприяють зменшенню втрат води та забезпеченню її раціонального використання [47, 61, 29].

Оптимізація використання кормів, завдяки автоматизованим системам годування, дозволяє знизити перевитрати корму, поліпшити раціон тварин і підвищити продуктивність [45, 46].

Переробка відходів займає значну частку в структурі енергоефективності. Органічні відходи використовуються для виробництва біогазу або органічних добрив, що мінімізує забруднення довкілля та приносить додаткову економічну вигоду [24, 48].

Рисунок підкреслює важливість інтеграції різних напрямків енергоефективності для сталого розвитку галузі тваринництва.

Сталість та перспективи розвитку. Сталий розвиток механізації тваринництва є основним завданням сучасної агропромислової галузі. Він спрямований на інтеграцію екологічних, економічних і соціальних підходів для забезпечення довготривалих позитивних результатів.

Екологічна сталість. Одним із ключових аспектів є зниження екологічного впливу. Використання відновлюваних джерел енергії (біогаз, сонячні панелі, геотермальні системи) і впровадження технологій утилізації відходів дозволяють мінімізувати забруднення ґрунтів, води й атмосфери. Це сприяє зменшенню викидів парникових газів і забезпеченню чистоти навколишнього середовища [24, 42, 48, 62].

Економічна сталість. Економічна ефективність досягається через оптимізацію витрат і підвищення продуктивності. Впровадження автоматизованих систем годування, доїння та моніторингу тварин дозволяє зменшити витрати праці й ресурсів, що робить фермерські господарства більш конкурентоспроможними. Крім того, переробка органічних відходів на біогаз або органічні добрива приносить додатковий прибуток [45, 46, 24].

Соціальна сталість. Механізація створює нові можливості для зайнятості, зокрема в обслуговуванні сучасного обладнання та управлінні фермерськими

системами. Перенавчання працівників і створення умов для їхньої адаптації до нових технологій сприяє збереженню соціальної рівноваги в сільських регіонах [11, 63].

Інтеграція сталих технологій. Сталість розвитку механізації також залежить від впровадження точного землеробства та інтегрованих систем управління. Ці технології дозволяють ефективно управляти ресурсами, приймати обґрунтовані рішення на основі даних і оптимізувати виробничі процеси [7, 67].

Перспективи розвитку. Перспективи сталого розвитку механізації тваринництва охоплюють такі напрями:

1. Розширення використання відновлюваних джерел енергії. Ширше впровадження сонячних панелей, біогазових установок і геотермальних систем забезпечить енергетичну незалежність фермерських господарств [24, 42].

2. Інтеграція цифрових технологій. Використання штучного інтелекту та великих даних для моніторингу, прогнозування та управління процесами значно підвищить ефективність виробництва [67].

3. Розвиток нових ринків. Виробництво органічних добрив і біогазу відкриває додаткові джерела прибутку для фермерів [24, 48].

Таблиця 4 підсумовує основні напрямки сталості та перспективи розвитку механізації тваринництва, акцентуючи увагу на екологічних, економічних і соціальних перевагах.

Таблиця 4

Сталість та перспективи розвитку механізації тваринництва

Напрямок сталості	Опис	Переваги	Джерела
Екологічна сталість	Використання відновлюваних джерел енергії та утилізація відходів.	Зменшення забруднення довкілля, скорочення викидів парникових газів.	[24, 42, 48, 62]
Економічна сталість	Оптимізація витрат через автоматизацію та переробку відходів у біогаз і добрива.	Зниження витрат, підвищення продуктивності, додатковий прибуток.	[45, 46, 24]
Соціальна сталість	Створення нових робочих місць у сфері обслуговування техніки та управління.	Збереження зайнятості, розвиток нових професій у сільській місцевості.	[11, 63]
Інтеграція технологій	Використання точного землеробства та цифрових систем управління.	Оптимізація ресурсів, обґрунтоване управління, підвищення ефективності виробничих процесів.	[7, 67]
Розширення відновлюваних джерел	Ширше впровадження біогазових установок, сонячних панелей та геотермальних систем.	Енергетична незалежність, скорочення витрат на традиційні джерела енергії.	[24, 42]
Інтеграція цифрових технологій	Використання штучного інтелекту та великих даних для моніторингу та прогнозування.	Підвищення ефективності, зниження ризиків, покращення управління процесами.	[66, 67, 68, 69]
Розвиток нових ринків	Виробництво органічних добрив і біогазу.	Нові джерела доходів, розвиток екологічно чистої продукції.	[24, 48]

Рисунок 4 ілюструє розподіл основних напрямків сталого розвитку механізації тваринництва, акцентуючи увагу на ключових аспектах екологічної, економічної та соціальної сталості. Найбільшу частку займає екологічна сталість, що включає використання відновлюваних джерел енергії (біогазові установки, сонячні панелі, геотермальні системи) та утилізацію органічних відходів. Ці заходи сприяють зменшенню забруднення довкілля та скороченню викидів парникових газів [24, 42, 48, 62]. Економічна сталість займає другу за величиною частку, охоплюючи автоматизацію процесів та переробку відходів для отримання біогазу та органічних добрив, що знижує витрати і приносить додатковий прибуток [45, 46, 24].

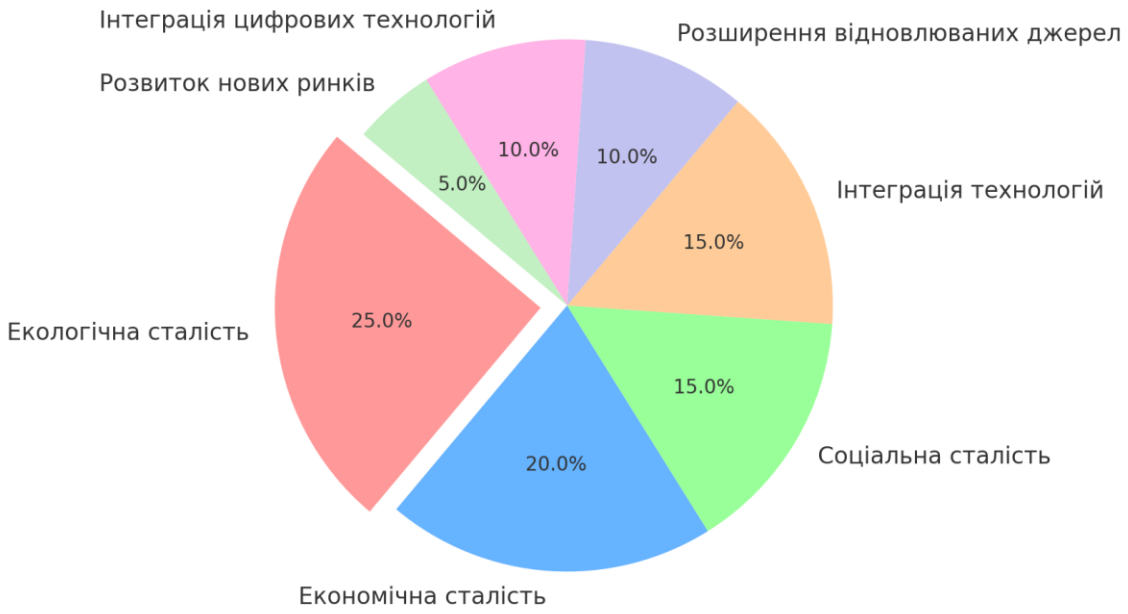


Рис. 4. Розподіл напрямків сталості та перспектив розвитку механізації тваринництва.

Соціальна сталість представлена створенням нових робочих місць у сфері обслуговування техніки та управління фермерськими системами, що сприяє розвитку сільських регіонів і збереженню соціальної рівноваги [11, 63].

Інтеграція технологій, включаючи точне землеробство та цифрові системи управління, сприяє ефективному використанню ресурсів і прийняттю обґрунтованих управлінських рішень [7, 67].

Розширення відновлюваних джерел енергії, таких як біогазові установки і сонячні панелі, забезпечує енергетичну незалежність фермерських господарств [24, 42]. Інтеграція цифрових технологій, включаючи штучний інтелект і великі дані, відкриває нові можливості для управління та моніторингу [67, 68, 69].

Розвиток нових ринків, наприклад виробництва органічних добрив і біогазу, створює додаткові джерела доходу для фермерів і сприяє зростанню попиту на екологічно чисту продукцію [24, 48].

Обговорення

Сучасна механізація тваринництва демонструє значний прогрес у впровадженні інноваційних технологій, спрямованих на підвищення продуктивності, ефективності й

сталості. Однак реалізація таких рішень супроводжується викликами, що потребують комплексного підходу та ретельного планування.

Екологічні аспекти. Впровадження відновлюваних джерел енергії, таких як біогазові установки, сонячні панелі та геотермальні системи, дозволяє значно знизити екологічне навантаження. Водночас, для максимального ефекту необхідна оптимізація процесів утилізації відходів, що може стати економічно вигідним за рахунок виробництва органічних добрив або додаткової енергії [24, 42, 48, 62].

Економічні вигоди та обмеження. Автоматизація процесів годування, доїння та моніторингу тварин є одним із найважливіших напрямів. Вона дозволяє зменшити витрати на ручну працю, підвищити якість продукції та зменшити втрати корму. Проте впровадження таких систем часто вимагає значних початкових інвестицій, що може бути перешкодою для малих господарств [45, 46, 63].

Соціальний вплив. Інтеграція сучасних технологій сприяє створенню нових робочих місць у сферах обслуговування техніки, управління та аналізу даних. Водночас автоматизація може скоротити кількість традиційних робочих місць, що створює виклики для зайнятості в сільських регіонах. Це потребує перенавчання працівників і створення умов для адаптації до змін [11, 63].

Технологічні перспективи. Точне землеробство, цифрові системи управління та інтелектуальні технології відкривають нові можливості для підвищення ефективності. Вони дозволяють зменшити втрати ресурсів, покращити управління мікрокліматом і відстежувати стан тварин у реальному часі. Проте їх впровадження потребує доступу до сучасного обладнання та висококваліфікованих кадрів [7, 67].

Перспективи розвитку. Перспективними напрямами є розширення використання відновлюваних джерел енергії, інтеграція штучного інтелекту та великих даних для управління фермерськими системами, а також розвиток нових ринків органічної продукції та добрив. Це дозволить забезпечити конкурентоспроможність тваринництва на глобальному рівні, зберігаючи при цьому екологічну та соціальну сталість [24, 48, 67].

Висновки

1. Інноваційні технології як основа розвитку. Сучасна механізація тваринництва базується на впровадженні інноваційних технологій, таких як автоматизація, використання відновлюваних джерел енергії, точне землеробство та інтегровані системи управління. Це дозволяє оптимізувати виробничі процеси, підвищувати продуктивність та зменшувати витрати.

2.Енергоефективність і збереження ресурсів. Інтеграція енергоефективних рішень, таких як когенераційні установки, біогазові системи, сонячні панелі та геотермальні джерела, забезпечує зниження енергозатрат і раціональне використання природних ресурсів. Це сприяє як економічній, так і екологічній сталості.

3. Сталий розвиток. Механізація тваринництва сприяє сталому розвитку, інтегруючи екологічні, економічні та соціальні аспекти. Використання екологічно чистих технологій знижує забруднення навколишнього середовища, а економічні переваги, зокрема додатковий прибуток від переробки відходів, забезпечують конкурентоспроможність фермерських господарств.

4. Соціальний вплив. Автоматизація створює нові можливості для зайнятості в управлінні й обслуговуванні технологій, але потребує перенавчання працівників. Це сприяє розвитку сільських регіонів і збереженню соціальної рівноваги.

5. Перспективи розвитку. Майбутні дослідження мають бути зосереджені на інтеграції штучного інтелекту, великих даних і автоматизованих систем для

підвищення ефективності управління. Подальше розширення використання відновлюваних джерел енергії та розвиток нових ринків, таких як органічні добрива, сприятиме довгостроковій сталості галузі.

6. Необхідність комплексного підходу. Розвиток механізації тваринництва потребує комплексного підходу, який враховує взаємозв'язок економічних, екологічних і соціальних факторів. Підтримка з боку державних структур, міжнародна співпраця та обмін технологіями стануть ключовими елементами успішної інтеграції інновацій.

Таким чином, механізація тваринництва має великий потенціал для забезпечення сталого розвитку галузі. Інноваційні рішення, спрямовані на енергоефективність, автоматизацію й інтеграцію сучасних технологій, створюють основу для підвищення продуктивності, зменшення витрат і збереження природних ресурсів.

Список використаних джерел

1. Kodirov, D., Muratov, K., Tursunov, O., Ugwu, E., & Durmanov, A. The use of renewable energy sources in integrated energy supply systems for agriculture. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. 614(1). 012007. https://doi.org/10.1088/1755-1315/614/1/012007

2 Cui, Y., Theo, E., Gurler, T., Su, Y., & Saffa, R. A comprehensive review on renewable and sustainable heating systems for poultry farming. International Journal of Low-Carbon Technologies. 2020. 15(1). p.p.121–135. https://doi.org/10.1093/ijlct/ctz048

3. Paul, B., Groot, J., Birnholz, C., Nzogela, B., Notenbaert, A., Woyessa, K., Sommer, R., Nijbroek, R., & Tittonell, P. Reducing agro-environmental trade-offs through sustainable livestock intensification across smallholder systems in Northern Tanzania. International Journal of Agricultural Sustainability. 2020. 18(1). p.p. 31–52. https://doi.org/10.1080/14735903.2019.1695348

4. Paris, B., Vandorou, F., Tyris, D., Balafoutis, A., Vaiopoulos, K., Kyriakarakos, G., Manolakos, D., & Papadakis, G. Energy use in the EU livestock sector: A review recommending energy efficiency measures and renewable energy sources adoption. Applied Sciences. 2022. 12(4), 2142. https://doi.org/10.3390/app12042142

5. Augustyn, G., Mikulik, J., Rumin, R., & Szyba, M. Energy self-sufficient livestock farm as the example of agricultural hybrid off-grid system. Energies. 2021. 14(21). 7041. https://doi.org/10.3390/en14217041

6. Romaniuk, W., Mazur, K., Borek, K., Borusiewicz, A., Wardal, W. J., Tabor, S., & Kuboń, M. Biomass energy technologies from innovative dairy farming systems. Processes. 2021. 9(2). 335. https://doi.org/10.3390/PR9020335

7. Wahyudi, J. The potential of energy production and greenhouse gases emissions reduction of dairy farm biogas production. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. 1034(1), 012085. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1034/1/012085

8. Ćehajić, N. Biogas cogeneration plant on a dairy farm. Energetika. 2023. 25(3). p.p. 89–98. https://doi.org/10.24094/ptk.023.015

9. Reddy, B. V., Cuomo, M., Kool, E., & Rosen, M. Economic and environmental analyses of multi-generation renewable energy systems for dairy farms. European Journal of Sustainable Development Research. 2021. 5(4). 11397. https://doi.org/10.21601/ejosdr/11397

10. Pochwatka, P., Kowalczyk-Juśko, A., Sołowiej, P., Wawrzyniak, A., & Dach, J. Biogas plant exploitation in a middle-sized dairy farm in Poland: Energetic and economic aspects. Energies. 2020. 13(22). 6058. https://doi.org/10.3390/en13226058

11. Shalini, Kukshal, P., Singh, V., & Kushwaha, G. Gross energetics in the evaluation of the functioning of instructional dairy farm at Pantnagar, India. Indian Journal of Animal Sciences. 2022. 92(5). p.p. 386–392. https://doi.org/10.56093/ijans.v92i5.115858

12. Radko, V. Economic aspects of energy efficiency in Ukrainian agricultural enterprises' dairy farming. Ekonomika APK. 2019. 148(1). p.p. 65–75. https://doi.org/10.33245/2310-9262-2019-148-1-65-75

13. Salman, D., Aisyah, R. S., Siregar, A. R., & Baba, S. Coexistence mode of production based dairy cow supporting farming in producing biogas as renewable energy resources. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. 473(1). 012113. https://doi.org/10.1088/1755-1315/473/1/012113

14. Bagdadee, A. H., Maitraya, A. M., Islam, M. A., & Siddique, M. N. A review on hybrid energy generation: Cow dung biogas, solar thermal and kinetic energy integration for power production. Energy and Environment. 2023. 34(9). p.p. 123–135. https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2023.09.004

15. Aisyah, R. S., Salman, D., Siregar, A. R., & Baba, S. Potential of biogas production as renewable energy in smallholder dairy farming in Enrekang District, South Sulawesi. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. 473(1). 012114. https://doi.org/10.1088/1755-1315/473/1/012114

16. Liu, J., Xu, Q., & Zhou, T. Role of mechanization: The impact of the cropland use scale on fertilizer reduction. Frontiers in Environmental Science. 2022. 10, 1053715. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1053715

17. Gousiya, S., & Suseela, K. Energy use pattern and energy efficiency of mechanized rice production in West Godavari District of Andhra Pradesh, India. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. 2020. 9(8). p.p. 1548–1557. https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.908.178

18. Purba, T., Helmi, H., Sembiring, F., Siagian, D. R., Haloho, L., Girsang, M. A., & Ramija, K. E. Measuring the effectiveness of agricultural mechanization performance on irrigated rice area in Batubara Regency. EAI Endorsed Transactions on Scalable Information Systems. 2021. 9(36). e2304503. https://doi.org/10.4108/eai.14-9-2020.2304503

19. Manwatkar, A., Khobragade, P., Waghmare, S., & Khope, P. Trends of mechanization in Indian agricultural fields: A review. International Journal of Innovative Engineering and Sciences. 2021. 6(9). p.p. 8–15. https://doi.org/10.46335/ijies.2021.6.9.2

20. Miyamoto, D., Desrial, & Edris, I. Technologies required to improve agricultural issues of Indonesia. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. 557(1). 012037. https://doi.org/10.1088/1757-899X/557/1/012037

21. Namdeo, A., Victor, V., & Dhruwe, N. K. (2020). Status of farm mechanization under animal farming in Bastar Plateau agro-climatic zone of Chhattisgarh. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. 2020. 9(5). p.p. 412–418. https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.905.047

22. Rakhra, M., Deb, P., Dahiya, O., Chandel, S., Bhutta, B., Badotra, S., Kumar, S., Shaukat, A., & Singh, D. An analytical study of the types of implements used by farmers in mechanized agriculture. IEEE Conference Publications. 2022. 9751983. https://doi.org/10.1109/MECON53876.2022.9751983

23. Chaudhari, A., & Moses, S. C. A study on agricultural mechanization status under paddy and wheat crop production in central region of Uttar Pradesh, India. International Journal of Environment and Climate Change. 2023. 13(10). p.p. 948–963. https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i102948

24. Mallesh, S., & Yadav, E. B. Farm mechanization level for paddy production in Uttar Pradesh: A review. The Pharma Innovation Journal. 2020. 9(8). p.p. 64–70. https://doi.org/10.22271/tpi.2020.v9.i8b.5011

25. Kandpal, A., Kar, A., Immanuelraj, K. T., Singh, A., Jha, G., & Singh, P. Insights on ownership pattern and demand for machinery in Indian agriculture. Indian Journal of Agricultural Sciences. 2022. 92(1). p.p. 89–97. https://doi.org/10.56093/ijas.v92i1.120880

26. Yamamoto, A., Kusudo, T., Kimura, M., & Matsuno, Y. Performance assessment of farm machinery for persimmon fruit cultivation in a Japanese mountainous area. Agricultural Engineering. 2022. 4(1). p.p. 11–22. https://doi.org/10.3390/agriengineering4010002

27. Sudhakar, C., & Sudha Rani, C. Selective mechanization: A way forward in augmenting the productivity and profitability of safflower (Carthamus tinctorius L.). Journal of Oilseeds Research, 37(Special Issue). (2023). p.p. 21–30. https://doi.org/10.56739/jor.v37ispecialissue.140949

28. Sunil, Paras, D., Loura, A., Fedotov, A. G., Kumar, S., & Shalu. Precision agriculture: Future demand of India. Research Biotica. 2021. 3(1). p.p. 1–9. https://doi.org/10.54083/resbio/3.1.2021.01-09

29. Pitono, J. Precision farming in pepper cultivation. Perspektif. 2020. 18(2). p.p. 91–103. https://doi.org/10.21082/PSP.V18N2.2019.91-103

30. Ahmed, S., Bagal, Y. S., Mahajan, R., & Sharma, L. K. Impact of farm mechanization on crop productivity in sub-tropical areas of Jammu and Kashmir. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. 2020. 9(5). p.p. 1073–1082. https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.905.128

31. Beluhova-Uzunova, R., & Dunchev, D. Precision farming: Concepts and perspectives. Zagadnienia Ekonomiki Rolnej. 2019(4). p.p. 118–130. https://doi.org/10.30858/zer/112132

32. Kusumandari, K., Iriani, Y., Suryana, R., Nurosyid, F., Widiyandari, H., & Khairuddin, K. Utilization of livestock manure as a source of biogas for renewable energy. Journal of Physics: Conference Series. 2021. 1825(1). 012100. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1825/1/012100

33. Stadnik, M., Gunko, I., & Protsenko, D. Independent electricity supply to livestock farms based on renewable energy sources. Technology Audit and Production Reserves. 2020. 1(15). p.p. 12–16. https://doi.org/10.37128/2520-6168-2020-1-15

34. Nugraha, A. T., Prayitno, G., & Himah, D. A. The concept for the development of biogas as renewable energy in rural Indonesia. International Journal of Sustainable Development and Planning. 2021. 16(6). p.p. 1063–1074. https://doi.org/10.18280/ijsdp.160618

35. Indrawati, R., Prasetiyowati, S. H., & Widyaputra, P. K. Teknologi peternakan terpadu berbasis energi baru terbarukan di Kabupaten Tangerang. Jurnal Kacanegara. 2021. 4(1). p.p. 75–86. https://doi.org/10.28989/kacanegara.v4i1.857

36. Caetano, B., Santos, N. D. S. A., Hanriot, V. M., Sandoval, O. R., & Huebner, R. Energy conversion of biogas from livestock manure to electricity using a Stirling engine. Energy Conversion and Management: X. 2022. 13. 100224. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100224

37. Hidayati, S., Utomo, T. P., Suroso, E., & Maktub, Z. A. Technical and technological aspects assessment of biogas agroindustry from cow manure. Journal of Physics: Conference Series. 2019. 230(1), 012072. https://doi.org/10.1088/1755-1315/230/1/012072

38. Wahyuni, S., Sutjahjo, S., Purwanto, Y., Fuah, A. M., & Kurniawan, R. The model of biogas utilization from livestock manure using farmer group approach to meet alternative energy at household scale. Jurnal Teknologi. 2019. 8(5). p.p. 17–23. (No DOI available).

39. Aquilani, C., Confessore, A., Bozzi, R., Sirtori, F., & Pugliese, C. Precision livestock farming technologies in pasture-based livestock systems. Animal. 2021. 15(6). 100429. https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100429

40. Maturo, A., Petrucci, A., Forzano, C., Giuzio, G., Buonomano, A., & Athienitis, A. Design and environmental sustainability assessment of energy-independent communities:

The case study of a livestock farm in the North of Italy. Energy Reports. 2021. 7(1). p.p. 4605–4615. https://doi.org/10.1016/j.egyrep.2021.05.080

41. Medvedev, A. Energy-saving technological decisions of steers management. Sel'skokhozyaistvennaya Energia. 2020. 10(7). p.p. 24–35. https://doi.org/10.33920/SEL-10-2007-06

42. Sklyar, A., Marinchenko, T., Davydova, M., & Asryan, G. Improving the energy system of a poultry enterprise. Journal of Physics: Conference Series. 2019. 403(1). 012043. https://doi.org/10.1088/1755-1315/403/1/012043

43. Araújo, G. L., Feiden, A., Nogueira, C. C., & Reis, G. Technical-economic viability of tubular biodigester and photovoltaic energy for rural property. International Journal of Development Research. 2022. 10(6). p.p. 55–61. https://doi.org/10.37118/ijdr.24748.6.2022

44. Costantino, A., & Fabrizio, E. Envisioning an energy performance certificate for livestock houses: A general methodological development and a specific application to growing-finishing pig houses. Journal of Cleaner Production. 2023. 383. 139279. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139279

45. Bartkowiak, A. M. Energy-saving and low-emission livestock buildings in the concept of a smart farming. Journal of Water and Land Development. 2023. 58(4). p.p. 32–45. https://doi.org/10.24425/jwld.2021.139935

46. Shablia, V. P., & Tkachova, I. V. Machine and manual working actions for different manure removing technologies. Boletim de Indústria Animal. 2020. 77. p.p. 1-14. https://doi.org/10.17523/bia.2020.v77.e1482

47. Moustakas, K., Loizidou, M., Rehan, M., & Nizami, A. S. A review of recent developments in renewable and sustainable energy systems: Key challenges and future perspective. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2020. 119. p.p. 109418. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109418

48. Sekaran, U., Lai, L., Ussiri, D. A., Kumar, S., & Clay, S. Role of integrated crop-livestock systems in improving agriculture production and addressing food security–A review. Journal of Agriculture and Food Research. 2021. 5. 100190. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100190

49. Walston, L. J., Barley, T., Bhandari, I., Campbell, B., McCall, J., Hartmann, H. M., & Dolezal, A. G. Opportunities for agrivoltaic systems to achieve synergistic food-energy-environmental needs and address sustainability goals. Frontiers in Sustainable Food Systems. 2022. 6. 932018. https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.932018

50. Henchion, M., Moloney, A. P., Hyland, J., Zimmermann, J., & McCarthy, S. Trends for meat, milk and egg consumption for the next decades and the role played by livestock systems in the global production of proteins. Animal. 2021. 15. 100287. https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100287

51. Al-Shetwi, A. Q. Sustainable development of renewable energy integrated power sector: Trends, environmental impacts, and recent challenges. Science of The Total Environment 2022. 822. 153645. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153645

52. Martin, G., Barth, K., Benoit, M., Brock, C., Destruel, M., Dumont, B., ... & Primi, R. Potential of multi-species livestock farming to improve the sustainability of livestock farms: A review. Agricultural Systems. 2020. 181. 102821. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102821

53. Al-Ghussain, L., Ahmad, A. D., Abubaker, A. M., & Mohamed, M. A. An integrated photovoltaic/wind/biomass and hybrid energy storage systems towards 100% renewable energy microgrids in university campuses. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2021. 46. 101273. https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101273

54. Danda, R. R. Innovations in Agricultural Machinery: Assessing the Impact of Advanced Technologies on Farm Efficiency. Journal of Artificial Intelligence and Big Data. 2024. 2(1). p.p. 64-83. https://doi.org/10.31586/jaibd.2022.1156

55. Gorjian, S., Ebadi, H., Trommsdorff, M., Sharon, H., Demant, M., & Schindele, S. The advent of modern solar-powered electric agricultural machinery: A solution for sustainable farm operations. Journal of cleaner production. 2021. 292. 126030. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126030

56. Jiang, M., Hu, X., Chunga, J., Lin, Z., & Fei, R. Does the popularization of agricultural mechanization improve energy-environment performance in China's agricultural sector?. Journal of Cleaner Production. 2020. 276. 124210. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124210

57. Wu, S., & Ding, S. Efficiency improvement, structural change, and energy intensity reduction: Evidence from Chinese agricultural sector. Energy Economics. 2021. 99. 105313. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105313

58. Sharma, V., Tripathi, A. K., & Mittal, H. Technological revolutions in smart farming: Current trends, challenges & future directions. Computers and Electronics in Agriculture. 2022. 201. 107217. https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107217

59. Moerkerken, A., Duijndam, S., Blasch, J., van Beukering, P., & Smit, A. Determinants of energy efficiency in the Dutch dairy sector: dilemmas for sustainability. Journal of Cleaner Production. 2021. 293. 126095. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126095

60. Nsabiyeze, A., Ma, R., Li, J., Luo, H., Zhao, Q., Tomka, J., & Zhang, M. Tackling climate change in agriculture: A global evaluation of the effectiveness of carbon emission reduction policies. Journal of Cleaner Production. 2024. 142973. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142973

61. Vaintrub, M. O., Levit, H., Chincarini, M., Fusaro, I., Giammarco, M., & Vignola, G. Precision livestock farming, automats and new technologies: Possible applications in extensive dairy sheep farming. Animal. 2021. 15(3). 100143. https://doi.org/10.1016/j.animal.2020.100143

62. Parra-López, C., Abdallah, S. B., Garcia-Garcia, G., Hassoun, A., Sánchez-Zamora, P., Trollman, H., ... & Carmona-Torres, C. Integrating digital technologies in agriculture for climate change adaptation and mitigation: State of the art and future perspectives. Computers and Electronics in Agriculture. 2024. 226. 109412. https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109412

63. Rong, J., Hong, J., Guo, Q., Fang, Z., & Chen, S. Path mechanism and spatial spillover effect of green technology innovation on agricultural CO2 emission intensity: A case study in Jiangsu Province, China. Ecological Indicators. 2023. 157. 111147. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111147

64. Corigliano, O., & Algieri, A. A comprehensive investigation on energy consumptions, impacts, and challenges of the food industry. Energy Conversion and Management: X. 2024. 100661. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100661

65. Ren, X., He, J., & Huang, Z. Innovation, natural resources abundance, climate change and green growth in agriculture. Resources Policy. 2023. 85, 103970. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103970

66. SaberiKamarposhti, M., Why, N. K., Yadollahi, M., Kamyab, H., Cheng, J., & Khorami, M. Cultivating a sustainable future in the artificial intelligence era: A comprehensive assessment of greenhouse gas emissions and removals in agriculture. Environmental Research. 2024. 118528. https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118528

67. Bragaglio, A., Romano, E., Brambilla, M., Bisaglia, C., Lazzari, A., Giovinazzo, S., & Cutini, M. A comparison between two specialized dairy cattle farms in the upper Po Valley. Precision agriculture as a strategy to improve sustainability. Cleaner Environmental Systems. 2023. 11, 100146. https://doi.org/10.1016/j.cesys.2023.100146

68. He, P., Zhang, J., & Li, W. (2021). The role of agricultural green production technologies in improving low-carbon efficiency in China: Necessary but not effective. Journal of Environmental Management. 2021. 293, 112837. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112837

69. Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., & Suman, R. (2022). Enhancing smart farming through the applications of Agriculture 4.0 technologies. International Journal of Intelligent Networks. 2022. 3. p.p. 150-164. https://doi.org/10.1016/j.ijin.2022.09.004

70. Egas, D., Ponsá, S., Llenas, L., & Colón, J. Towards energy-efficient small dairy production systems: An environmental and economic assessment. Sustainable Production and Consumption. 2021. 28, p.p. 39-51. https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.03.021

References

1. Kodirov, D., Muratov, K., Tursunov, O., Ugwu, E., & Durmanov, A. (2020). The use of renewable energy sources in integrated energy supply systems for agriculture. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 614(1), 012007. https://doi.org/10.1088/1755-1315/614/1/012007

2 Cui, Y., Theo, E., Gurler, T., Su, Y., & Saffa, R. (2020). A comprehensive review on renewable and sustainable heating systems for poultry farming. International Journal of Low-Carbon Technologies, 15(1), 121–135. https://doi.org/10.1093/ijlct/ctz048

3. Paul, B., Groot, J., Birnholz, C., Nzogela, B., Notenbaert, A., Woyessa, K., Sommer, R., Nijbroek, R., & Tittonell, P. (2020). Reducing agro-environmental trade-offs through sustainable livestock intensification across smallholder systems in Northern Tanzania. International Journal of Agricultural Sustainability, 18(1), 31–52. https://doi.org/10.1080/14735903.2019.1695348

4. Paris, B., Vandorou, F., Tyris, D., Balafoutis, A., Vaiopoulos, K., Kyriakarakos, G., Manolakos, D., & Papadakis, G. (2022). Energy use in the EU livestock sector: A review recommending energy efficiency measures and renewable energy sources adoption. Applied Sciences, 12(4), 2142. https://doi.org/10.3390/app12042142

5. Augustyn, G., Mikulik, J., Rumin, R., & Szyba, M. (2021). Energy self-sufficient livestock farm as the example of agricultural hybrid off-grid system. Energies, 14(21), 7041. https://doi.org/10.3390/en14217041

6. Romaniuk, W., Mazur, K., Borek, K., Borusiewicz, A., Wardal, W. J., Tabor, S., & Kuboń, M. (2021). Biomass energy technologies from innovative dairy farming systems. Processes, 9(2), 335. https://doi.org/10.3390/PR9020335

7. Wahyudi, J. (2021). The potential of energy production and greenhouse gases emissions reduction of dairy farm biogas production. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1034(1), 012085. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1034/1/012085

8. Ćehajić, N. (2023). Biogas cogeneration plant on a dairy farm. Energetika, 25(3), 89–98. https://doi.org/10.24094/ptk.023.015

9. Reddy, B. V., Cuomo, M., Kool, E., & Rosen, M. (2021). Economic and environmental analyses of multi-generation renewable energy systems for dairy farms. European Journal of Sustainable Development Research, 5(4), 11397. https://doi.org/10.21601/ejosdr/11397

10. Pochwatka, P., Kowalczyk-Juśko, A., Sołowiej, P., Wawrzyniak, A., & Dach, J. (2020). Biogas plant exploitation in a middle-sized dairy farm in Poland: Energetic and economic aspects. Energies, 13(22), 6058. https://doi.org/10.3390/en13226058

11. Shalini, Kukshal, P., Singh, V., & Kushwaha, G. (2022). Gross energetics in the evaluation of the functioning of instructional dairy farm at Pantnagar, India. Indian Journal of Animal Sciences, 92(5), 386–392. https://doi.org/10.56093/ijans.v92i5.115858

12. Radko, V. (2019). Economic aspects of energy efficiency in Ukrainian agricultural enterprises' dairy farming. Ekonomika APK, 148(1), 65–75. https://doi.org/10.33245/2310-9262-2019-148-1-65-75

13. Salman, D., Aisyah, R. S., Siregar, A. R., & Baba, S. (2020). Coexistence mode of production based dairy cow supporting farming in producing biogas as renewable energy resources. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 473(1), 012113. https://doi.org/10.1088/1755-1315/473/1/012113

14. Bagdadee, A. H., Maitraya, A. M., Islam, M. A., & Siddique, M. N. (2023). A review on hybrid energy generation: Cow dung biogas, solar thermal and kinetic energy integration for power production. Energy and Environment, 34(9), 123–135. https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2023.09.004

15. Aisyah, R. S., Salman, D., Siregar, A. R., & Baba, S. (2020). Potential of biogas production as renewable energy in smallholder dairy farming in Enrekang District, South Sulawesi. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 473(1), 012114. https://doi.org/10.1088/1755-1315/473/1/012114

16. Liu, J., Xu, Q., & Zhou, T. (2022). Role of mechanization: The impact of the cropland use scale on fertilizer reduction. Frontiers in Environmental Science, 10, 1053715. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1053715

17. Gousiya, S., & Suseela, K. (2020). Energy use pattern and energy efficiency of mechanized rice production in West Godavari District of Andhra Pradesh, India. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 9(8), 1548–1557. https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.908.178

18. Purba, T., Helmi, H., Sembiring, F., Siagian, D. R., Haloho, L., Girsang, M. A., & Ramija, K. E. (2021). Measuring the effectiveness of agricultural mechanization performance on irrigated rice area in Batubara Regency. EAI Endorsed Transactions on Scalable Information Systems, 9(36), e2304503. https://doi.org/10.4108/eai.14-9-2020.2304503

19. Manwatkar, A., Khobragade, P., Waghmare, S., & Khope, P. (2021). Trends of mechanization in Indian agricultural fields: A review. International Journal of Innovative Engineering and Sciences, 6(9), 8–15. https://doi.org/10.46335/ijies.2021.6.9.2

20. Miyamoto, D., Desrial, & Edris, I. (2019). Technologies required to improve agricultural issues of Indonesia. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 557(1), 012037. https://doi.org/10.1088/1757-899X/557/1/012037

21. Namdeo, A., Victor, V., & Dhruwe, N. K. (2020). Status of farm mechanization under animal farming in Bastar Plateau agro-climatic zone of Chhattisgarh. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 9(5), 412–418. https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.905.047

22. Rakhra, M., Deb, P., Dahiya, O., Chandel, S., Bhutta, B., Badotra, S., Kumar, S., Shaukat, A., & Singh, D. (2022). An analytical study of the types of implements used by farmers in mechanized agriculture. IEEE Conference Publications, 2022, 9751983. https://doi.org/10.1109/MECON53876.2022.9751983

23. Chaudhari, A., & Moses, S. C. (2023). A study on agricultural mechanization status under paddy and wheat crop production in central region of Uttar Pradesh, India. International Journal of Environment and Climate Change, 13(10), 948–963. https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i102948

24. Mallesh, S., & Yadav, E. B. (2020). Farm mechanization level for paddy production in Uttar Pradesh: A review. The Pharma Innovation Journal, 9(8), 64–70. https://doi.org/10.22271/tpi.2020.v9.i8b.5011

25. Kandpal, A., Kar, A., Immanuelraj, K. T., Singh, A., Jha, G., & Singh, P. (2022). Insights on ownership pattern and demand for machinery in Indian agriculture. Indian Journal of Agricultural Sciences, 92(1), 89–97. https://doi.org/10.56093/ijas.v92i1.120880

26. Yamamoto, A., Kusudo, T., Kimura, M., & Matsuno, Y. (2022). Performance assessment of farm machinery for persimmon fruit cultivation in a Japanese mountainous area. Agricultural Engineering, 4(1), 11–22. https://doi.org/10.3390/agriengineering4010002

27. Sudhakar, C., & Sudha Rani, C. (2023). Selective mechanization: A way forward in augmenting the productivity and profitability of safflower (Carthamus tinctorius L.). Journal of Oilseeds Research, 37(Special Issue), 21–30. https://doi.org/10.56739/jor.v37ispecialissue.140949

28. Sunil, Paras, D., Loura, A., Fedotov, A. G., Kumar, S., & Shalu. (2021). Precision agriculture: Future demand of India. Research Biotica, 3(1), 1–9. https://doi.org/10.54083/resbio/3.1.2021.01-09

29. Pitono, J. (2020). Precision farming in pepper cultivation. Perspektif, 18(2), 91–103. https://doi.org/10.21082/PSP.V18N2.2019.91-103

30. Ahmed, S., Bagal, Y. S., Mahajan, R., & Sharma, L. K. (2020). Impact of farm mechanization on crop productivity in sub-tropical areas of Jammu and Kashmir. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 9(5), 1073–1082. https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.905.128

31. Beluhova-Uzunova, R., & Dunchev, D. (2019). Precision farming: Concepts and perspectives. Zagadnienia Ekonomiki Rolnej, 2019(4), 118–130. https://doi.org/10.30858/zer/112132

32. Kusumandari, K., Iriani, Y., Suryana, R., Nurosyid, F., Widiyandari, H., & Khairuddin, K. (2021). Utilization of livestock manure as a source of biogas for renewable energy. Journal of Physics: Conference Series, 1825(1), 012100. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1825/1/012100

33. Stadnik, M., Gunko, I., & Protsenko, D. (2020). Independent electricity supply to livestock farms based on renewable energy sources. Technology Audit and Production Reserves, 1(15), 12–16. https://doi.org/10.37128/2520-6168-2020-1-15

34. Nugraha, A. T., Prayitno, G., & Himah, D. A. (2021). The concept for the development of biogas as renewable energy in rural Indonesia. International Journal of Sustainable Development and Planning, 16(6), 1063–1074. https://doi.org/10.18280/ijsdp.160618

35. Indrawati, R., Prasetiyowati, S. H., & Widyaputra, P. K. (2021). Teknologi peternakan terpadu berbasis energi baru terbarukan di Kabupaten Tangerang. Jurnal Kacanegara, 4(1), 75–86. https://doi.org/10.28989/kacanegara.v4i1.857

36. Caetano, B., Santos, N. D. S. A., Hanriot, V. M., Sandoval, O. R., & Huebner, R. (2022). Energy conversion of biogas from livestock manure to electricity using a Stirling engine. Energy Conversion and Management: X, 13, 100224. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100224

37. Hidayati, S., Utomo, T. P., Suroso, E., & Maktub, Z. A. (2019). Technical and technological aspects assessment of biogas agroindustry from cow manure. Journal of Physics: Conference Series, 230(1), 012072. https://doi.org/10.1088/1755-1315/230/1/012072

38. Wahyuni, S., Sutjahjo, S., Purwanto, Y., Fuah, A. M., & Kurniawan, R. (2019). The model of biogas utilization from livestock manure using farmer group approach to meet alternative energy at household scale. Jurnal Teknologi, 8(5), 17–23. (No DOI available).

39. Aquilani, C., Confessore, A., Bozzi, R., Sirtori, F., & Pugliese, C. (2021). Precision livestock farming technologies in pasture-based livestock systems. Animal, 15(6), 100429. https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100429

40. Maturo, A., Petrucci, A., Forzano, C., Giuzio, G., Buonomano, A., & Athienitis, A. (2021). Design and environmental sustainability assessment of energy-independent communities: The case study of a livestock farm in the North of Italy. Energy Reports, 7(1), 4605–4615. https://doi.org/10.1016/j.egyrep.2021.05.080

41. Medvedev, A. (2020). Energy-saving technological decisions of steers management. Sel'skokhozyaistvennaya Energia, 10(7), 24–35. https://doi.org/10.33920/SEL-10-2007-06

42. Sklyar, A., Marinchenko, T., Davydova, M., & Asryan, G. (2019). Improving the energy system of a poultry enterprise. Journal of Physics: Conference Series, 403(1), 012043. https://doi.org/10.1088/1755-1315/403/1/012043

43. Araújo, G. L., Feiden, A., Nogueira, C. C., & Reis, G. (2022). Technical-economic viability of tubular biodigester and photovoltaic energy for rural property. International Journal of Development Research, 10(6), 55–61. https://doi.org/10.37118/ijdr.24748.6.2022

44. Costantino, A., & Fabrizio, E. (2023). Envisioning an energy performance certificate for livestock houses: A general methodological development and a specific application to growing-finishing pig houses. Journal of Cleaner Production, 383, 139279. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139279

45. Bartkowiak, A. M. (2023). Energy-saving and low-emission livestock buildings in the concept of a smart farming. Journal of Water and Land Development, 58(4), 32–45. https://doi.org/10.24425/jwld.2021.139935

46. Shablia, V. P., & Tkachova, I. V. (2020). Machine and manual working actions for different manure removing technologies. Boletim de Indústria Animal, 77, 1-14. https://doi.org/10.17523/bia.2020.v77.e1482

47. Moustakas, K., Loizidou, M., Rehan, M., & Nizami, A. S. (2020). A review of recent developments in renewable and sustainable energy systems: Key challenges and future perspective. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 119, 109418. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109418

48. Sekaran, U., Lai, L., Ussiri, D. A., Kumar, S., & Clay, S. (2021). Role of integrated crop-livestock systems in improving agriculture production and addressing food security–A review. Journal of Agriculture and Food Research, 5, 100190. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100190

49. Walston, L. J., Barley, T., Bhandari, I., Campbell, B., McCall, J., Hartmann, H. M., & Dolezal, A. G. (2022). Opportunities for agrivoltaic systems to achieve synergistic food-energy-environmental needs and address sustainability goals. Frontiers in Sustainable Food Systems, 6, 932018. https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.932018

50. Henchion, M., Moloney, A. P., Hyland, J., Zimmermann, J., & McCarthy, S. (2021). Trends for meat, milk and egg consumption for the next decades and the role played by livestock systems in the global production of proteins. Animal, 15, 100287. https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100287

51. Al-Shetwi, A. Q. (2022). Sustainable development of renewable energy integrated power sector: Trends, environmental impacts, and recent challenges. Science of The Total Environment, 822, 153645. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153645

52. Martin, G., Barth, K., Benoit, M., Brock, C., Destruel, M., Dumont, B., ... & Primi, R. (2020). Potential of multi-species livestock farming to improve the sustainability of livestock farms: A review. Agricultural Systems, 181, 102821. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102821

53. Al-Ghussain, L., Ahmad, A. D., Abubaker, A. M., & Mohamed, M. A. (2021). An integrated photovoltaic/wind/biomass and hybrid energy storage systems towards 100% renewable energy microgrids in university campuses. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 46, 101273. https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101273

54. Danda, R. R. (2024). Innovations in Agricultural Machinery: Assessing the Impact of Advanced Technologies on Farm Efficiency. Journal of Artificial Intelligence and Big Data, 2(1), 64-83. https://doi.org/10.31586/jaibd.2022.1156

55. Gorjian, S., Ebadi, H., Trommsdorff, M., Sharon, H., Demant, M., & Schindele, S. (2021). The advent of modern solar-powered electric agricultural machinery: A solution for sustainable farm operations. Journal of cleaner production, 292, 126030. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126030

56. Jiang, M., Hu, X., Chunga, J., Lin, Z., & Fei, R. (2020). Does the popularization of agricultural mechanization improve energy-environment performance in China's agricultural sector?. Journal of Cleaner Production, 276, 124210. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124210

57. Wu, S., & Ding, S. (2021). Efficiency improvement, structural change, and energy intensity reduction: Evidence from Chinese agricultural sector. Energy Economics, 99, 105313. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105313

58. Sharma, V., Tripathi, A. K., & Mittal, H. (2022). Technological revolutions in smart farming: Current trends, challenges & future directions. Computers and Electronics in Agriculture, 201, 107217. https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107217

59. Moerkerken, A., Duijndam, S., Blasch, J., van Beukering, P., & Smit, A. (2021). Determinants of energy efficiency in the Dutch dairy sector: dilemmas for sustainability. Journal of Cleaner Production, 293, 126095. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126095

60. Nsabiyeze, A., Ma, R., Li, J., Luo, H., Zhao, Q., Tomka, J., & Zhang, M. (2024). Tackling climate change in agriculture: A global evaluation of the effectiveness of carbon emission reduction policies. Journal of Cleaner Production, 142973. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142973

61. Vaintrub, M. O., Levit, H., Chincarini, M., Fusaro, I., Giammarco, M., & Vignola, G. (2021). Precision livestock farming, automats and new technologies: Possible applications in extensive dairy sheep farming. Animal, 15(3), 100143. https://doi.org/10.1016/j.animal.2020.100143

62. Parra-López, C., Abdallah, S. B., Garcia-Garcia, G., Hassoun, A., Sánchez-Zamora, P., Trollman, H., ... & Carmona-Torres, C. (2024). Integrating digital technologies in agriculture for climate change adaptation and mitigation: State of the art and future perspectives. Computers and Electronics in Agriculture, 226, 109412. https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109412

63. Rong, J., Hong, J., Guo, Q., Fang, Z., & Chen, S. (2023). Path mechanism and spatial spillover effect of green technology innovation on agricultural CO2 emission intensity: A case study in Jiangsu Province, China. Ecological Indicators, 157, 111147. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111147

64. Corigliano, O., & Algieri, A. (2024). A comprehensive investigation on energy consumptions, impacts, and challenges of the food industry. Energy Conversion and Management: X, 100661. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100661

65. Ren, X., He, J., & Huang, Z. (2023). Innovation, natural resources abundance, climate change and green growth in agriculture. Resources Policy, 85, 103970. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103970

66. SaberiKamarposhti, M., Why, N. K., Yadollahi, M., Kamyab, H., Cheng, J., & Khorami, M. (2024). Cultivating a sustainable future in the artificial intelligence era: A

comprehensive assessment of greenhouse gas emissions and removals in agriculture. Environmental Research, 118528. https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118528

67. Bragaglio, A., Romano, E., Brambilla, M., Bisaglia, C., Lazzari, A., Giovinazzo, S., & Cutini, M. (2023). A comparison between two specialized dairy cattle farms in the upper Po Valley. Precision agriculture as a strategy to improve sustainability. Cleaner Environmental Systems, 11, 100146. https://doi.org/10.1016/j.cesys.2023.100146

68. He, P., Zhang, J., & Li, W. (2021). The role of agricultural green production technologies in improving low-carbon efficiency in China: Necessary but not effective. Journal of Environmental Management, 293, 112837. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112837

69. Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., & Suman, R. (2022). Enhancing smart farming through the applications of Agriculture 4.0 technologies. International Journal of Intelligent Networks, 3, 150-164. https://doi.org/10.1016/j.ijin.2022.09.004

70. Egas, D., Ponsá, S., Llenas, L., & Colón, J. (2021). Towards energy-efficient small dairy production systems: An environmental and economic assessment. Sustainable Production and Consumption, *28*, 39-51. https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.03.021

Фесенко А.М.
Державний біотехнологічний університет,
м. Харків, Україна
E-mail:
alla.ecology3006@gmail.com

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ ВИПАРЮВАННЯ СОКУ ПО КОЛЬОРОВОСТІ У ВИПАРНОМУ ВІДДІЛЕННІ ЦУКРОВОГО ЗАВОДУ

https://doi.org/10.37700/ts.2024.25.34-43

УДК 664.1: 519.71

Фесенко А.М. ***Оптимізація режимів випарювання соку по кольоровості у випарному відділенні цукрового заводу***

Анотація. *Розглянуто проблеми неефективної роботи цукрових заводів в Україні. Увага приділена оптимізації роботи випарного відділення цукрового заводу, яке забезпечує парою всі основні виробництва заводу і визначає енергоефективність усього виробництва. Визначено проблеми у виробництві цукру, що знижують конкурентоспроможність галузі в Україні. Проведеним дослідженням визначено вплив якісних показників соку на якість цукру і недоліки в системі управління технологічним процесом випарювання, які пов'язані зі змінами в режимі роботи випарної установки. Показано, що при неврахуванні показників якості цукрової сировини знижується як якість продукції, так і ефективність всієї системи управління виробництвом. Визначено проблеми у функціонуванні системи оптимізації технологічного процесу випарювання. Враховуючи складність процесу випарювання соку у багатокорпусній випарній установці і вплив багатьох показників процесу, як технологічного, так і якісного характеру, визначено основні вектори процесу управління при оптимізації випарювання соку по якісним показникам. Розглянуто основні критерії ефективності цукрового виробництва, нормативні вимоги, теоретичні основи та практичний досвід впровадження та використання критеріїв якості у системі оптимізації в країнах, що використовують енергоефективні та конкурентоспроможні технології у цукровому виробництві. Обґрунтована ефективність запропонованих критеріїв якості продукції для математичного забезпечення роботи системи управління процесом випарювання. Зроблені висновки, що отриманий критерій ефективності по якісних показниках дає можливість використовувати запропоноване математичне забезпечення для оптимізації режимів роботи в системі управління випарюванням соку у багатокорпусній випарній установці цукрового заводу.*

Ключові слова: *оптимізація, математична модель, показники якості, багатокорпусна випарна установка, критерії ефективності, технологічний процес, система управління.*

Fesenko A.M. ***Optimization of juice evaporation modes by coloration in evaporation section of sugar factory***

Abstract. *The problems of inefficient operation of sugar factories in Ukraine are considered. Attention is paid to optimizing the operation of the evaporation section of a sugar factory, which provides steam to all the main production units of the plant and determines the energy efficiency of the entire production. Problems in sugar production that reduce the*

competitiveness of the industry in Ukraine are identified. The conducted research has determined the influence of juice quality indicators on sugar quality and shortcomings in the evaporation process control system, which are associated with changes in the operation mode of the evaporation unit. It is shown that if the quality indicators of sugar raw materials are not taken into account, both the quality of products and the efficiency of the entire production management system are reduced. Problems in the functioning of the evaporation process optimization system are identified. Taking into account the complexity of the juice evaporation process in a multi-body evaporation plant and the influence of many process indicators, both technological and qualitative, the main vectors of the management process for optimizing juice evaporation by qualitative indicators are determined. The main criteria for the efficiency of sugar production, regulatory requirements, theoretical foundations and practical experience in implementing and using quality criteria in the optimization system in countries that use energy-efficient and competitive technologies in sugar production are considered. The effectiveness of the proposed product quality criteria for mathematical support of the evaporation process control system is substantiated.It was concluded that the obtained efficiency criterion for qualitative indicators makes it possible to use the proposed mathematical software for optimizing the operating modes in the juice evaporation control system in a multi-body evaporator of a sugar factory.

Keywords: *optimization, mathematical model, quality indicators, multi-body evaporator, efficiency criteria, technological process, control system.*

Постановка проблеми

За умов стрімкого розвитку технологій, техніки та інформаційних систем конкурентоспроможність і забезпечення технологічних процесів у цукровій галузі повинні відповідати сучасним вимогам і досягненням науки. Цукрове виробництво тут відрізняється за двома складовими. Це одне з найбільш енергозатратних виробництв, а вартість енергоносіїв набуває визначального значення на нинішньому етапі. Також важливим аспектом є якість продукції, що підтримує конкурентоспроможність та прибутковість галузі. Для підвищення ефективності роботи технологічного комплексу цукрового заводу доцільно доповнювати системи управління технологічним процесом (далі – ТП) моделями, методами та алгоритмами діагностики і прогнозування, які дозволять у реальному часі оперативно виявляти, розпізнавати і прогнозувати зміни в технологічному процесі. Також важливими є знаходження, обґрунтування та реалізація коригуючих впливів у системі управління технологічними процесами, що дають можливість привести рівень роботи виробництва до конкурентоспроможного рівня, з відповідною якістю продукції [1, 2].

Високоефективне цукрове виробництво характеризується, у першу чергу, такими показниками: якість, енергоефективність, собівартість. Досягнення цих ефективних показників забезпечується використанням найсучасніших технологій виробництва, обладнання, автоматизованих систем управління процесами, компютерізацією виробничих процесів, а також організаційними інструментами. В наш час, в умовах ринкової економіки переважають неперервні технологічні процеси великої потужності зі складними комплексами енергетичних і матеріальних потоків і жорсткими вимогами до якості продукції, безпеки персоналу, збереження обладнання та до дії на навколишнє середовище. Все це призводить до необхідності створення сучасних ефективних систем управління.

Цукровий завод складається з таких важливих відділень: дифузійне, сокоочисне, випарне та кристалізаційне. Ці відділення використовують неперервні процеси із енергетично-тепловими складовими. Основним відділенням, що впливає на

енергоефективність роботи цукрового заводу є випарне, яке приймає та розподіляє пар по інших відділеннях [3, 4].

Багатокорпусна випарна установка здійснює випарювання соку до заданої концентрації, забезпечує вторинними парами теплообмінне обладнання не тільки у випарному відділенні, а і по інших відділеннях заводу. Таким чином, однією з основних задач багатокорпусної випарної установки (далі – БВУ) є отримання на виході установки фіксованого концентрованого розчину з вмістом, необхідним для отримання якісної продукції, сухих речовин, РН, тощо. Невідповідність якісних показників отриманого розчину вимагає додаткових витрат пари на процес кристалізації у вакуум-апаратах у відділенні кристалізації [3, 4].

Таким чином, основним завданням управління ВУ є: підтримка необхідного технологічного режиму, з фіксованими значеннями технологічного процесу, стабілізація рівнів розчину в апаратах, одержання необхідного кольору розчину та забезпечення користувачів парою.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

На основі останніх досліджень можна виділити такі головні проблеми в роботі випарного відділення [3, 4, 5]:

- забезпечення якості сировини, що повинна відповідати розрахунковим значенням на усіх етапах виробництва;
- динамічність змін розчину при роботі БВУ викликана змінюваними в часі якісними параметрами уварюваного розчину та змінюваними показниками тепло- та масообмінних процесів;
- невідповідність реагування системи управління на зміни в технологічному процесі випарювання;
- складність інженерних розрахунків теплового процесу випарювання, що застосовуються в системі управління (застосування приблизних критеріїв та табличні значення, що використовуються при розрахунку теплових показників процесу випарювання, що постійно змінюється);
- застосування ефективного математичного забезпечення у системі управління технологічним процесом випарювання.

Для отримання конкурентоспроможної цукрової продукції в Україні необхідно вимоги до якості цукрової продукції привести у відповідність до нормативних європейських вимог та вимог, що використовуються у країнах з розвиненою цукровою галуззю [6, 7].

Низька якість сиропу після випарювання є однією з основних причин погіршення якості цукру, зокрема більш високий вміст в ньому золи і підвищена кольоровість.

Відомо, що для отримання цукру високої якості чистота сиропу повинна бути не нижче 92%. Величина чистоти сиропу залежить від якості перероблюваної буряків, параметрів процесів екстрагування цукру і очищення дифузійного соку. Помилки, допущені при добуванні сахарози і очищення соку, в подальшому практично виправити неможливо. [3, 4, 7]

Значне наростання кольоровості спостерігається при згущенні соку зниженого якості, особливо що містить значну кількість редукувальних речовин. Це має місце при переробці буряків зниженого якості і при недостатньому розкладанні редукувальних речовин в процесі вапняно-вуглекислотного очищення. У випарній установці, в присутності азотовмісних речовин, при підвищеній температурі, в результаті реакції Майяра утворюються інтенсивно забарвлені речовини – меланоїдини.

При відхиленнях, що мають місце у технологічних процесах перед випарюванням соку, буде відбуватися загоряння поверхні нагрівання випарної установки. У цьому випадку збільшується час перебування соку в апаратах установки і відповідно збільшується кількість розкладається сахарози і зростає кольоровість.

Час перебування соку і температура випарювання залежать також від конструкції і принципу роботи застосовуваних випарних апаратів і їх компонування в схемі випарної установки.

Також важливим фактором, що впливає на якість випарюваного соку, є накип, що утворюється на гріючої поверхні випарної установки (ВА). Накип значно знижує коефіцієнт теплопередачі у ВА, призводить до зниження продуктивності обладнання, збільшення часу перебування соку і наростання кольоровості. Вплив накипу зменшують за допомогою різних хімічних препаратів, що зменшують утворення накипу у ВА, що дуже важливо для підвищення якості продуктів і поліпшення якості цукру [8, 9].

Відповідно, виходячи з сутності процесу випарювання, треба відмітити необхідність контролю технологічних показників (тиск, температура, концентрація, кольоровість тощо), що постійно змінюються в залежності від змін показників розчину у процесі випарювання [9].

Тепловий розрахунок процесу випарювання полягає у визначенні площі поверхні теплообміну випарних апаратів та витрати пару і містить досить складну методику. Велика кількість показників, що враховується у розрахунку ускладнюють визначення реальних значень ТП випарювання, що, в свою чергу, призводить до зниження ефективності процесу випарювання та роботи системи управління [3, 4, 10].

Сучасна теорія управління включає в себе теорію оптимального управління, тобто оптимальні системи, при функціонуванні яких мінімізується або максимізується заданий функціонал якості. Крім того, важливим питанням, щодо визначення ефективності процесу випарювання є визначення критеріїв управління [10, 11].

Виходячи з наведеного аналізу ефективності основних напрямків у виробництві та переробці цукру можна зробити висновки, що для підвищення конкурентоспроможності галузі необхідно вирішувати цілий комплекс проблем на всіх етапах цукрового виробництва. При цьому, однією с основних складових підвищення якості, є удосконалення системи управління у випарному відділенні, яке дасть можливість привести якісні показники розчину до нормативних, і отримати нормативні значення якості цукру.

Формулювання мети досліджень

Метою роботи є підвищення ефективності БВУ цукрового заводу за рахунок розробки та впровадження сучасних критеріїв та математичних моделей визначення якості соку у системі управління технологічним процесом випарювання.

Для досягнення поставленої мети було визначено наступні задачі: аналіз та обґрунтування застосування сучасних критеріїв якості соку та оцінка різного виду збурень у процесі випарюванні щодо якості продукції для застосуванні у системі управління ТП випарного відділення.

Результати досліджень

Аналіз та обґрунтування застосування сучасних ефективних критеріїв якості соку для системи управління випарним відділенням цукрового заводу. Основними показниками якості цукру є вміст сахарози, зола, редукувальні речовини, вологість та

кольоровість [6].

Основними якісними показниками цукру, що використовуються Європейським Співтовариством і державами, які ефективно займаються виробництвом цукру, а також відповідно до ДСТУ 4623:2006, є кольоровість. Нормативні значення показників кольоровості у розчині, відповідно цих вимог, для цукру 1-ї категорії – не більше ніж 45 одиниць ICUMSA, 2-ї категорії - 60, 3 категорії – 104, а 4-ї категорії 195 од. Відповідно до наказу Мінагрополітики від 02.11.2017 № 592 «Про затвердження Вимог до видів цукрів, призначених для споживання людиною», впроваджено основні якісні показники цукру, що відповідають міжнародним вимогам, кольоровість у розчині, для категорії «екстра білий цукор» – не більше ніж 22,5 од. ICUMSA.

На цукрових заводах БВУ як і інші відділення виробництва працюють в невизначених умовах, які, в свою чергу, поділяються по невизначеності мети, невизначеності зовнішнього середовища та невизначеності особи, що приймає рішення. У більшості випадків за критерій управління БВУ беруть мінімум енергетичних витрат, тобто мінімум витрати пари. При визначенні якісних показників – мінімум середньоквадратичного відхилення концентрації сиропу на виході з ВУ. Але таке задання критерію веде до неповного врахування тих параметрів, які входять в обмеження, а отже, до недостачі вторинної пари користувачам, недоцільне перевищення витрати пари і т.д. Тому найповнішим критерієм функціонування БВУ може бути буде згортка названих. Але нестаціонарність роботи БВУ, що викликана змінними в часі параметрами уварюваного розчину та змінними показниками тепло- та масообмінних процесів випарювання, ускладнює визначення такого загального критерію і знижує ефективність визначення цього критерію.

Типові збурення, що призводять до нестаціонарності роботи, ділять на зовнішні та внутрішні. Ці збурення збільшують час випарювання, і, відповідно підвищують кольоровість.

Теоретично, визначення часу перебування розчину у БВУ здійснюється із розгляду фізичної суті процесу випарювання, який полягає у термічному концентруванні розчинів при кипінні та частковому видаленню води у вигляді пару [11].

Лінійність термічного розкладання сахарози від часу процесу дозволяє спростити задачу її визначення шляхом використання середнього часу перебування, яке визначається як відношення обсягу витрати розчину $(\mathbf{V_р})$ до величини обсягу розчину, що міститься в апараті $(\mathbf{V_а})$:

$$\tau = \frac{V_р}{V_а} \quad (1)$$

Збільшення часу випарювання та збільшення температури кипіння призводить до зростання втрат цукру від термічного розкладу та наростання кольоровості сиропу. Наростання цукрових речовин та втрати цукру корелюють між собою [13].

Відповідно, знаючи величину об'ємної втрати розчину із БВА і його густину можливо визначити величину середнього часу перебування розчину у кожному ВА, і відповідно і у всій БВУ. По результатах розрахунків, проведених відповідно до наведеної формули (2), отримано значення нормативного терміну перебування розчину у БВУ заводу з продуктивністю 3000 т. буряка/добу, з площами теплообміну по корпусах БВУ – 1к-2360м^2, 2к-3000м^2; 3к-2360/1200м^2: 4к-1200м^2; 5к-100м^2, які відображено в таблиці 1. Для порівняння в табл. 1 наведено і значення фактичних режимів роботи БВУ з різного виду збуреннями, які призводять до зміни кольоровості [7, 11].

Аналіз показав, що за впливу різного виду збурень кольоровість, у середньому підвищується на 30-50%. Значення pH до та після БВУ коливалось у межах від 8,3 та

9,1, а СР від 14% до 68%. В процесі випарювання застосовувались різного виду хімічні препарати для очистки розчину. При значних порушеннях режиму роботи кольоровість після БВУ може підвищуватися до 900 од. ICUMSA [14].

Таблиця 1

Усереднені значення терміну випарювання та кольоровості у БВУ цукрових заводів

Вид режиму випарювання	БВУ на заводі з продуктивністю 6000 т/добу		
	Кольоровість сиропу до ВУ, од. ICUMSA	Термін випарювання, хв.	Кольоровість сиропу після ВУ, од. ICUMSA
Нормативний (розрахунковий)	150-250	43-57	250-300
Фактичний	200-350	82-104	300-550

Визначення та оцінка впливу різного виду збурень при випарюванні на кольоровість сиропу для застосування системі управління випарного відділення цукрового заводу. Основою системи управління є математичне забезпечення з використанням сучасних критеріїв якості, математичних моделей та відповідних інженерних розрахунків.

Тому для визначення впливу різних факторів на процес випарювання води з соку у випарній установці, необхідно розглянути рівняння матеріального балансу [4,16]:

$$G_п = G_к + W, \quad (2)$$

де $G_п$ – продуктивність по початковому розчину, кг/год;

$G_к$– продуктивність по кінцевому розчину, кг/год;

W – загальна кількість випареної води, кг/год.

У розчині, який випаровується у ВУ, повинна зберігатися рівність твердої маси, яка визначається такими корелюючими показниками як концентрація розчину, кольоровість, каламутність тощо. З урахуванням кольоровості розчину рівність твердої речовини можна відобразити наступним чином [15, 16]:

$$G_п К_п = G_к К_к, \quad (3)$$

де $К_п$ та $К_к$– початкова та кінцева кольоровість розчину, од.ICUMSA.

Скориставшись формулами (2) та (3), визначимо загальну кількість води $W_з$, що випаровується за бажаної кольоровості:

$$W_з = G_п\left(1 - \frac{К_п}{К_к}\right). \quad (4)$$

При цьому концентрація та кольоровість розчину корелюють, і відповідно до ДСТУ 4866:2007 [17].

З рівняння (3) визначимо кольоровість продукції, яке буде мати вигляд:

$$К_к = \frac{К_п}{1 - \frac{W_з}{G_п}}. \quad (5)$$

Відображення диференціалу через кольоровість дає можливість більш точно показати чутливість до різного виду збурень при випарюванні. Продиференцюювавши вираз (6) по $W_з/G_п$ отримаємо чутливість кольоровості розчину до співвідношення гріючої пари і продуктивності соку [18]:

$$\frac{dК_к}{d\left(\frac{W_з}{G_п}\right)} = \frac{К_к(К_к - К_п)}{К_п}. \quad (6)$$

Скориставшись формулою (5), ми встановили, що кольоровість розчину підвищилася впродовж процесу випарювання на 1,1-1,5% від нормативних 250 од. ICUMSA для цукру 1-ї категорії (табл. 1). Проведений аналіз показує, що запропонований підхід з використанням показника якості є доволі ефективним, і його можна використовувати в СУ цукровому виробництві [18].

Запропонований якісний критерій ефективності процесу випарювання (розрахунок 6), введений у алгоритм руху та порядку застосування даних у тепловому розрахунку для математичного забезпечення СУ ТП БВУ (рис. 1).

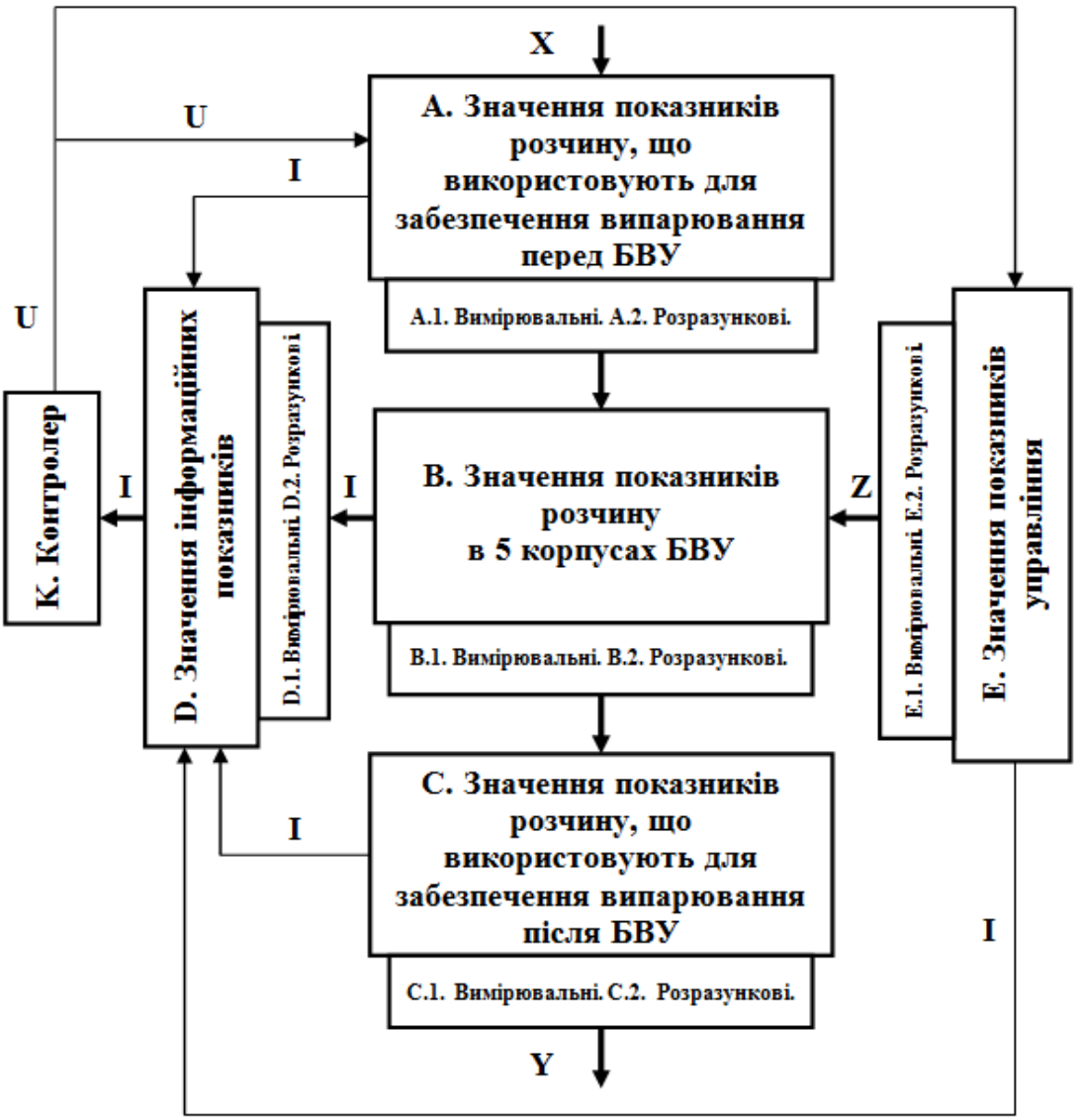


Рис. 1. Алгоритм руху та порядок застосування даних у тепловому розрахунку процесу випарювання для математичного забезпечення СУ ТП БВУ: X – вхідний вектор; Y – вихідний вектор; U – вектор керування; Z – вектор збурень; I – інформаційний вектор; A - інформаційні значення показників для СУ до БВУ; B – інформаційні значення показників з об'єкту управління для СУ; C – інформаційні значення показників для СУ після БВУ; D – обробка інформаційних показників; E – інформаційні значення показників управління; K – контролер

Всі інформаційні показники I (виміряні та розрахункові), з відображених баз даних на рис. 1 (A, B, C, E) надають інформацію в базу D для обробки та розрахунку теплового режиму роботи БВУ у відповідний час [18].

Висновки

Підвищення конкурентоспроможності цукрової продукції можна досягнути шляхом введення в математичне забезпечення процесу оптимізації режимів роботи випарної установки впливу збурень, які мають місце при випарюванні води з цукрового соку. Коригування виробництва цукру, а відповідно і процесу випарювання, необхідно здійснювати з використанням показника кольоровості. Кольоровість залежить від часу випарювання у БВУ та різних збурень в ТП. Ефективна система управління щодо забезпечення оптимальних режимів роботи випарної установки підвищить якісні показники цукру при врахуванні кольоровості при випарюванні соку у БВУ. Отримано залежність цього критерію від впливу таких видів збурень процесу випарювання як теплове навантаження, продуктивність розчину та якісні показники розчину. Запропоновано алгоритм руху процесу управління випарюванням та порядок застосування даних у тепловому розрахунку процесу випарювання для математичного забезпечення системи управління БВУ. Отримані результати щодо визначення впливу показників збурень на якісний показник демонструють ефективність запропонованого підходу і доцільність використання в системі математичного забезпечення управління процесом випарювання.

Список використаних джерел

1. Вимоги до виробництва цукру приведено у відповідність до європейських. Урядовий портал. Режим доступу: https://www.kmu.gov.ua/ua/news/vimogi-do-virobnictva-cukru-privedeno-u-vidpovidnist-do-yevropejskih

2. Власенко Л.О. Ладанюк А.П. Підвищення ефективності функціонування технологічного комплексу цукрового заводу за рахунок використання методів діагностики та прогнозування. Східноєвропейський журнал передових технологій. 2010. № 2/3 (44). С. 57–62

3. Штангеєв К. О. Випарні установки та теплові схеми цукрових заводів. Київ. 2015. 57 с.

4. Дідур В.А., Стручаєв М.І. Теплотехніка, теплопостачання і використання теплоти в сільському господарстві. Київ. Аграрна освіта. 2008. 233 с.

5. Ensinas A.V., Nebra S.A., Lozano M.A., Serra L. Design of evaporation systems and heaters networks in sugar cane factories using a thermoeconomic optimization procedure. Int. J. of Thermodynamics. 2007. Vol. 10 (No. 3). P. 97–105.

6. ДСТУ 4623-2006. Національний стандарт України. Цукор білий. Технічні умови. Київ. 2007. 18 с.

7. Ляшенко С.О., Фесенко А.М., Ляшенко О.С., Кісь В.М. Обґрунтування застосування показників якості в енерго- та екологічно ефективних АСУ цукрового виробництва. Інженерія природокористування: науковий журнал. 2019. №4 (14). С. 47–56.

8. Ляшенко С.О., Фесенко А.М., Ляшенко О.С. Определение параметров производственных опасных факторов для моделирования процесса выпаривания в сахарном производстве. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Харків. 2017. Вип. 180. С. 182–190.

9. Процеси та апарати хімічних виробництв. Distance Learning. СумДУ. Режим доступу: https://dl.sumdu.edu.ua/textbooks/22852/266104/index.html.

10. Ковриго Ю.М., Степанець О.В., Баган Т.Г., Бунке О.С. Сучасна теорія управління. Частина 2. Прикладні аспекти сучасної теорії управління: підручник. Київ. КПІ імені Ігоря Сікорського. 2017. 155 с. Режим доступу: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/23117/1/Suchasna-teoriia-upravlinnia_Kovrygo_et.al.pdf.

11. Штангеев К.О. Час перебування розчину у випарній установці. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи розвитку цукрової промисловості України». Київ. НУХТ. 2019. С. 98–101. Режим доступу: http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/30325/1/evaporation%20plant.pdf.

12. Опорний конспект лекцій з дисципліни «Теорія прийняття рішень». Режим доступу: http://dspace.tneu.edu.ua/retrieve/52501/lek.pdf

13. Галацан Л.А. Робота цукрових заводів України при переробці цукрових буряків урожаю 2018 року. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції цукровиків України «Перспективи розвитку цукрової промисловості України». Київ. НУХТ. 2019. С. 18–30.

14. Рева Л.П., Виговський В.Ю. Підвищення якості та виходу цукру шляхом адсорбційного очищення сиропу в сучасній технологічній схемі. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції цукровиків України «Перспективи розвитку цукрової промисловості України». Київ. НУХТ. 2019. С. 89–96.

15. Ladanyuk A., Kyshenko V., Shkolna O. Evaporator control under conditions of uncertainty: intellectualization of applied functions. Scientific works of The National University of Food Technologies. 2015. Vol. 21. Issue 6. P. 7–15.

16. Ляшенко С.А., Фесенко А.М., Ляшенко А.С. Выбор автоматизированных режимов работы выпарной установки сахарного завода. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Харків. 2010. Вип. 106. С. 217–231.

17. Методи визначення кольоровості і каламутності розчину. ДСТУ 4866:2007. Київ: Держспоживстандарт України. 2007. 12 с.

18. Liashenko S., Fesenko A., Liashenko O., Kis V., Ivashchenko H. Determination and estimation of the influence of different types of disturbances on the thick juice colour to apply in automated process control systems of the sugar mill evaporators. International Journal of Emerging Technologies in Engineering Research (IJETER). 2020. Vol. 8. Issue 5. P. 2133–2139. http://www.warse.org/IJETER/static/pdf/file/ijeter107852020.pdf

References

1. The requirements for sugar production have been brought into line with European ones. Government portal. Access mode: https://www.kmu.gov.ua/ua/news/vimogi-do-virobnictva-cukru-privedeno-u-vidpovidnist-do-yevropejskih

2. Vlasenko L.O., Ladanyuk A.P. (2010). Increasing the efficiency of the functioning of the technological complex of a sugar factory through the use of diagnostic and forecasting methods. Eastern European Journal of Advanced Technologies. № 2/3 (44). P. 57–62

3. Shtangeev K.O. (2015). Evaporation plants and thermal schemes of sugar factories. Kyiv. 57 p.

4. Didur V.A., Struchayev M.I. (2008). Heat engineering, heat supply and heat use in agriculture. Kyiv. Agrarian education. 233 p.

5. Ensinas A.V., Nebra S.A., Lozano M.A., Serra L. (2007). Design of evaporation systems and heaters networks in sugar cane factories using a thermoeconomic optimization procedure. Int. J. of Thermodynamics. Vol. 10 (No. 3). P. 97–105.

6. DSTU 4623-2006. (2007). National standard of Ukraine. White sugar. Technical conditions. Kyiv. 18 p.

7. Lyashenko S.O., Fesenko A.M., Lyashenko O.S., Kis V.M. (2019). Justification of the use of quality indicators in energy and environmentally efficient ACS of sugar production. Environmental Engineering: Scientific Journal. №4 (14). P. 47–56.

8. Lyashenko S.O., Fesenko A.M., Lyashenko O.S. (2017). Determination of parameters of production hazardous factors for modeling the evaporation process in sugar production. Bulletin of the Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture. Kharkiv. Vol. 180. P. 182–190.

9. Chemical production processes and devices. Distance Learning. Sumy State University. Access mode: https://dl.sumdu.edu.ua/textbooks/22852/266104/index.html.

10. Kovrygo Yu.M., Stepanets O.V., Bagan T.G., Bunke O.S. (2017). Modern management theory. Part 2. Applied aspects of modern management theory: textbook. Kyiv. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. 155 p. Access mode: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/23117/1/Suchasna-teoriia-upravlinnia_Kovrygo_et.al.pdf.

11. Shtangeev K.O. (2019). The residence time of the solution in the evaporation unit. Proceedings of the international scientific and technical conference "Prospects for the development of the sugar industry of Ukraine". Kyiv. NUHT. P. 98–101. Access mode: http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/30325/1/evaporation%20plant.pdf

12. Reference lecture notes on the discipline "Decision Making Theory". Access mode: http://dspace.tneu.edu.ua/retrieve/52501/lek.pdf

13. Galatsan L.A. (2016). Work of Ukrainian sugar factories in processing sugar beets of the 2018 harvest. Materials of the International Scientific and Technical Conference of Ukrainian Sugar Producers "Prospects for the Development of the Sugar Industry of Ukraine". Kyiv. NUHT. P. 18–30.

14. Reva L.P., Vyhovsky V.Yu. (2019). Improving the quality and yield of sugar by adsorption purification of syrup in a modern technological scheme. Materials of the International Scientific and Technical Conference of Sugar Producers of Ukraine "Prospects for the Development of the Sugar Industry of Ukraine". Kyiv. NUHT. P. 89–96.

15. Ladanyuk A., Kyshenko V., Shkolna O. (2015). Evaporator control under conditions of uncertainty: intellectualization of applied functions. Scientific works of The National University of Food Technologies. Vol. 21. Issue 6. P. 7–15.

16. Lyashenko S.A., Fesenko A.M., Lyashenko A.S. (2010). Choice of automated operating modes of the evaporation unit of a sugar factory. Bulletin of the Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture. Kharkiv. Vol. 106. P. 217–231.

17. DSTU 4866:2007. (2007). Methods for determining the color and turbidity of a solution. Kyiv. State Consumer Standard of Ukraine. 12 p.

18. Liashenko S., Fesenko A., Liashenko O., Kis V., Ivashchenko H. (2020). Determination and estimation of the influence of different types of disturbances on the thick juice colour to apply in automated process control systems of the sugar mill evaporators. International Journal of Emerging Technologies in Engineering Research (IJETER). Vol. 8. Issue 5. P. 2133–2139. http://www.warse.org/IJETER/static/pdf/file/ijeter107852020.pdf

Автухов А.К.,
Ковалевський Є.В.
Державний біотехнологічний університет,
м. Харків, Україна
E-mail:
a.k.avtukhov@gmail.com

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОРМУЮЧИХ ІНСТРУМЕНТІВ СТАНІВ ГАРЯЧОЇ ПРОКАТКИ

https://doi.org/10.37700/ts.2024.25.44-49

УДК 621.746

Автухов А.К., Ковалевський Є.В. ***Розробка методики дослідження технологічних та експлуатаційних характеристик формуючих інструментів станів гарячої прокатки***

Анотація. *Показано, що при проведенні досліджень, які направлені на визначення впливу технологічних та експлуатаційних характеристик формуючих інструментів на їх ресурс, використовують досить велику кількість показників. Враховуючи те, що вихідні дані містять інформацію за різні періоди досліджень, то виникає необхідність перевірки можливості об'єднання різних вибірок в одну для можливості формування статистичних гіпотез. Зазначено, що для визначення можливості об'єднання вибірок експлуатаційних характеристик прокатних валків за різний термін часу доцільно розглядати два варіанти підходів: 1 − якщо для аналізу даних потрібно використання функцій розподілу випадкової величини, наприклад, для ймовірнісної оцінки ресурсу валків, то в цьому випадку необхідна наявність однорідності двох вибірок, тобто рівність функцій розподілу; 2 − якщо для аналізу даних достатньо використовувати лише статистики випадкової величини (середнє значення аналізованої величини, середнє квадратичне відхилення, коефіцієнт варіації), наприклад, при розгляді кількості установок за період експлуатації валка, то в цьому випадку можна використовувати методику перевірки гіпотези про рівність середніх значень довільної величини. Перевірку гіпотези про однорідність двох вибірок рекомендується виконувати за наступною методикою: вся в сукупність з двох вибірок поділялася на інтервали, потім у двох масивах по цих інтервалах визначається кожна вибірка окремо і обчислюється критерій перевірки гіпотези по залежності, що враховує обсяг першої та другої вибірок; частоту в інтервалі для першої та другої вибірок; кількість інтервалів розбиття сукупної вибірки. Для перевірки гіпотези про вид розподілу рекомендується використовувати критерій Колмогорова, послідовність обчислень при використанні цього критерію наступна: вибірка розбивається на інтервали та визначається експериментальне накопичені частоти; розраховується теоретичне накопичення частоти виходячи з пропонованого виду розподілу, параметри якого розраховані за вихідними даними; визначається максимальна різниця між накопиченими теоретичними та експериментальними частотами у відповідному інтервалі; обчислюється параметр* $D_{max} = (m_m - m_e)/n$, *а потім критерій =* $Dmax \sqrt{n}$. *За відповідними таблицями для критерію визначається ймовірність* $P(\lambda)$ *того, що гіпотетична функція розподілу не суперечить вибірковим даним.*

Ключові слова: *формуючі інструменти, хромонікелевий чавун, технологічні характеристики, експлуатаційні характеристики, статистичні дослідження, випадкові величини, кореляційний аналіз.*

Avtukhov A.K., Kovalevsky E.V. ***Development of methodology for studying the technological and operational characteristics of forming tools of hot rolling mills***

Abstract. *It is shown that when conducting research aimed at determining the influence of technological and operational characteristics of forming tools on their resource, a fairly large number of indicators are used. Given that the initial data contain information for different periods of research, there is a need to check the possibility of combining different samples into one for the possibility of forming statistical hypotheses. It is noted that to determine the possibility of combining samples of operational characteristics of rolling rolls for different periods of time, it is advisable to consider two options for approaches: 1 − if data analysis requires the use of random variable distribution functions, for example, for probabilistic assessment of the resource of rolls, then in this case the homogeneity of the two samples is necessary, i.e. equality of distribution functions; 2 − if for data analysis it is sufficient to use only statistics of a random variable (mean value of the analyzed variable, standard deviation, coefficient of variation), for example, when considering the number of installations during the period of operation of the roller, then in this case it is possible to use the method of testing the hypothesis of equality of the mean values of a random variable.It is recommended to perform the hypothesis test on the homogeneity of two samples using the following method: the entire set of two samples is divided into intervals, then in two arrays, each sample is determined separately according to these intervals and the criterion for testing the hypothesis is calculated based on the dependence, which takes into account the volume of the first and second samples; the frequency in the interval for the first and second samples; the number of intervals for dividing the total sample. To test the hypothesis on the type of distribution, it is recommended to use the Kolmogorov criterion, the sequence of calculations when using this criterion is as follows: the sample is divided into intervals and the experimental accumulated frequency is determined; the theoretical accumulation of frequency is calculated based on the proposed type of distribution, the parameters of which are calculated from the initial data; the maximum difference between the accumulated theoretical and experimental frequencies in the corresponding interval is determined; the parameter* $D_{max}= (m_m- m_e)/n$ *is calculated, and then the criterion =* $Dmax \sqrt{n}$*. According to the corresponding tables for the criterion, the probability* $P(\lambda)$ *that the hypothetical distribution function does not contradict the sample data is determined.*

Keywords: *forming tools, chromium-nickel cast iron, technological characteristics, operational characteristics, statistical research, random variables, correlation analysis.*

Постановка проблеми

Продуктивність прокатного виробництва і собівартість прокату, що випускається, нерозривно пов'язані з якістю та експлуатаційною стійкістю формуючих інструментів – прокатних валків.

Протягом останніх років для виготовлення формуючих інструментів гарячої прокатки широко використовується хромонікелевий чавун. З цього сплаву виготовляють шаропрокатні та сортопрокатні валки, у тому числі, з литими струмками [1], а також робочий шар – листопрокатних валків як стаціонарного, так і відцентрового виливка [2].

Двошарові хромонікелеві форуючі інструменти знаходять широке застосування в клітинах безперервних і напівбезперервних широкосмугових, середньо-і товстолистових, а також дресирувальних станів.

Вітчизняні та зарубіжні розробки, що стосуються виробництва, застосування та підвищення терміну служби формуючих інструментів, показують, що реалізація проблеми підвищення їхньої стійкості проводиться в декількох напрямках. Головні з них включають розробку нових та оптимізацію застосовуваних складів валкових чавунів; їх зміну; удосконалення технології виливки та термообробки [3].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

При проведенні досліджень, що направлені на визначення впливу технологічних та експлуатаційних характеристик валків на їх ресурс, використовують досить велику кількість показників такі, як: твердість поверхні бочки; напрацювання вадка за період експлуатації; величина знімання металу з поверхні валка при перешліфування за весь період експлуатації; число установок перешліфовок за весь період експлуатації; середнє напрацювання валка на 1 мм знятого шару металу при перешліфування; середній наробіток валка за встановлення; середнє знімання металу за встановлення та інші [4,5,6].

Для аналізу технологічних та експлуатаційних характеристик формуючих інструментів використовувують методи статистичних досліджень: розрахунок статистичних параметрів, перевірка статистичних гіпотез, кореляційний та регресійний аналіз [6].

Під час проведення досліджень отримують об'ємні вибірки даних експлуатаційних показників прокатних валків за різні періоди часу.

Враховуючи те, що вихідні дані містять інформацію за різні періоди досліджень, то виникає необхідність перевірки можливості об'єднання різних вибірок в одну для можливості формування статистичних гіпотез [7]. Використання більшого масиву даних під час проведення статистичних аналізів суттєво підвищує точність отриманих результатів.

Формулювання мети досліджень

Мета роботи: розробка методики дослідження технологічних та експлуатаційних характеристик формуючих інструментів станів горячої прокатки.

Результати досліджень

Для визначення можливості об'єднання вибірок експлуатаційних характеристик прокатних валків за різний термін часу доцільно розглядати два варіанти підходів:

1) якщо для аналізу даних потрібно використання функцій розподілу випадкової величини, наприклад, для ймовірнісної оцінки ресурсу валків, то в цьому випадку необхідна наявність однорідності двох вибірок, тобто рівність функцій розподілу;

2) якщо для аналізу даних достатньо використовувати лише статистики випадкової величини (середнє значення аналізованої величини, середнє квадратичне відхилення, коефіцієнт варіації), наприклад, при розгляді кількості установок за період експлуатації валка, то в цьому випадку можна використовувати методику перевірки гіпотези про рівність середніх значень довільної величини.

Перевірку гіпотези про однорідність двох вибірок рекомендується виконувати за наступною методикою: вся в сукупність з двох вибірок поділялася на інтервали (для

виконання розрахунків доцільно прийняти 7 інтервалів), потім у двох стовпцях по цих інтервалах визначається кожна вибірка окремо і обчислюється критерій перевірки гіпотези x^2 по залежності

$$x^2 = n_1 n_2 \sum_{k=1}^{k} \frac{1}{m_{l1} + m_{l2}} \left(\frac{m_{l1}}{n_1} - \frac{m_{l2}}{n_2} \right)$$

де n_1 та n_2 – обсяг першої та другої вибірок;

m_{i1} та m_{i2} – частота в інтервалі для першої та другої вибірок;

k – кількість інтервалів розбиття сукупної вибірки.

Гіпотеза про однорідність двох вибірок приймається, якщо за заданим рівнем значущості α дотримується нерівність:

$$x^2 < x^2_{\alpha;k-1}$$

де k-1 – число ступенів свободи, а $x^2_{\alpha;k-1}$ – табличне значення критерію за відповідним рівнем значущості α.

Для перевірки гіпотези та рівності середніх значень випадкової величини у двох вибірках рекомендується проводити, насамперед, розрахунок статистик з кожної вибірки. На наступному етапі перевіряється гіпотеза про рівність дисперсій двох вибірок за критерієм Фішера $F=S_1^2/ S_2^2$, який має F-розподіл с $k_1 = n_1$-1та $k_2 = n_2$-1 ступенями свободи, де S_1^2, n_1 та S_2^2, n_2 відповідно дисперсії ($S_1^2 > S_2^2$) та обсяги двох вибірок [7].

При прийнятому рівні значущості α гіпотеза щодо рівності дисперсій двох вибірок підтверджується, якщо $F<F\alpha$; k_1; k_2, де Fα; k_1; k_2 – табличні значення критеріїв. Потім перевіряється гіпотеза щодо рівності середніх значень випадкової величини двох вибірок, при цьому якщо гіпотеза рівності дисперсії не була відкинута для перевірки гіпотези рівності середніх обчислюється критерій Стьюдента

$$t = \frac{x_1 - x_2}{s} \sqrt{\cdot n_1 \cdot n_2 / \cdot n_1 + n_2}$$

де

$$S = \sqrt{\cdot (n_1 - 1) S_1^2 + \cdot (n_2 - 1) S_2^2 / \cdot n_1 + n_2 - 2}$$

Умовою прийняття гіпотези про рівність середніх є нерівність $|t| < t_{a/2;k}$, де $t_{a/2;k}$ - табличні значення критерію Стьюдента або рівня значущості α с числом ступенів свободи $k=n_1+n_2-2$.

Якщо ж гіпотеза рівності дисперсії відкинута, то перевірка гіпотези про рівність середніх виконується за зазначеною вище схемою, але число ступенів свободи обчислюється за формулою:

$$k' = \frac{1}{\frac{c^2}{n_1 - 1} + \frac{(1-c)^2}{n_2 - 1}}$$

де

$$c = \frac{\frac{S_1^2}{n_1}}{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}$$

Для перевірки гіпотези про вид розподілу рекомендується використовувати критерій Колмогорова, послідовність обчислень при використанні цього критерію наступна: вибірка розбивається на інтервали та визначається експериментальне накопичені частоти; розраховується теоретичне накопичення частоти виходячи з пропонованого виду розподілу, параметри якого розраховані за вихідними даними; визначається максимальна різниця між накопиченими теоретичними ($m_т$) та експериментальними частотами (m_e) у відповідному інтервалі; обчислюється параметр $D_{max}= (m_т- m_e)/n$, а потім критерій = Dmax √n, де n - обсяг вибірки. За відповідними таблицями для критерію визначається ймовірність P(λ) того, що гіпотетична функція розподілу не суперечить вибірковим даним. Кореляційний аналіз використовується з метою виявлення зв'язків між окремими технологічними та експлуатаційними характеристиками, на базі яких можливо зробити практичні корисні висновки. Для оцінювання взаємозв'язку між характеристиками запрпропновано використовувати коефіцієнт кореляції, що визначається з співвідношення

$$r = \frac{\frac{\sum xy}{n} - x_s \cdot y_s}{S_\chi' \cdot S_\gamma'}$$

де n – обсяг виборки; x_s і y_s – середнє значення; $S_\chi' \cdot S_\gamma'$ — середні квадратичні відхилення (невиправлені) відповідних випадкових величин.

Використовуючи дані щодо коефіцієнтів парної кореляції, пропонується обчислювати і коефіцієнти відповідних рівнянь регресії. Наприклад, при двох факторах лінійне рівняння має вигляд:

$$y=a_0 +a_1x_1 + a_2x_2$$

У якому коефіцієнти a_0, a_1, a_2 обчислюються за відповідними залежностями.

$$a_1=\beta_1 Sy/ Sx_1;\ \ a_2=\beta_2 Sy/ Sx_2.$$

$$\overline{a}_0=\overline{x}-a_1\overline{x}_1+\cdot a_2\overline{x}_2$$

При цьому

$$\beta_1=(r_yx_1-\cdot r_yx_2\cdot\cdot r\cdot x_1x_2)/1-\cdot r^2\cdot x_1x_2$$

$$\beta_2=(r_yx_2-\cdot r_yx_1\cdot\cdot r\cdot x_1x_2)/1-\cdot r^2\cdot x_1x_2$$

При аналізі взаємних зв'язків характеристик валків доцільно використовувати графи кореляційних зв'язків, до яких входять тільки зв'язки виявлені при рівні 005.

Висновки

Використання наведеної методики надасть можливість здійснити достовірний аналіз впливу технологічних та експлуатаційних характеристик прокатних валків на їх ресурс при експлуатації. Отримані результати допоможуть визначити фактори, зміни яких можуть суттєво підвищити експлуатаційні характеристики формуючих інструментів станів гарячої прокатки.

Список використаних джерел

1. Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Александрова Н.М., Белкин Е.Л., Власовец В.М., Клочко О.Ю., Мартыненко А.Д. Производство и применение прокатных валков. Справочник. Под ред. проф. Т.С. Скобло. Харьков. Изд. ЦД № 1. 2013. 572 с.

2. Автухов А. К. Методичні засади оцінки економічної ефективності у технологіях виробництва прокатних валків. Актуальні проблеми інноваційної економіки. 2017. №2. С. 25–31.

3.Автухов А.К. Обобщение разработок по использованию и производству хромоникелевого чугуна для изготовления прокатных валков. Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві: Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. 2017. Вип. 183. С.64–76.

4. Скобло Т.С., Автухов А.К., Соколов Р.Г. Опыт эксплуатации рабочих валков стана 2000. Научният потенциал на света-13. Материали за IX Международна научна практична конференци. Болгария. 2013. Том 20. С. 13–27.

5. Автухов А.К. Подбор в комплект двухслойных хромоникелевых валков исполнения ЛПХНМд. Вісник національного технічного університету «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. Харків. НТУ «ХПІ». 2015. №24 (1133). С. 3–8.

6. Автухов А.К,. Полянский О.С. Методика і методологія проведення досліджень підвищення довговічності прокатних валків з хромонікелевого чавуну. Вісник національного технічного університету «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. Харків. НТУ «ХПІ». 2017. №43(1265). С. 5–9.

7. Руденко В.М. Математична статистика: навчальний посібник. Київ. Центр учбової літератури. 2012. 304 с.

References

1. Skoblo T.S., Sidashenko A.I., Aleksandrova N.M., Belkin E.L., Vlasovets V.M., Klochko O.Yu., Martynenko A.D. (2013). Production and application of rolling rolls. Reference book. Ed. Prof. T.S. Skoblo. Kharkiv. Izd. CD No. 1. 572 p.

2. Avtukhov A.K. (2017). Methodical principles of economic efficiency assessment in rolling roll production technologies. Actual Problems of Innovative Economy. №2. P. 25–31.

3. Avtukhov A.K. (2017). Generalization of developments on the use and production of chromium-nickel cast iron for the manufacture of rolled rolls. Resource-saving technologies, materials and equipment in repair production: Bulletin of the Kharkiv National Technical University of Agriculture. Vol. 183. P. 64–76.

4. Skoblo T.S., Avtukhov A.K., Sokolov R.G. (2013). Experience of exploitation of workers rolls of stan 2000. The Scientific Potential of the World-13. Materials for the IX International Scientific Practical Conference. Bulgaria. Vol. 20. P. 13–27.

5. Avtukhov A.K. (2015). Selection in a set of two-layer chromium-nickel rolls performed by LPHNMd. Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment for material processing in mechanical engineering and metallurgy. Kharkiv. NTU "KhPI". №24 (1133). P. 3–8.

6. Avtukhov A.K., Polyanskiy O.S. (2017). Methods and methodology for conducting research on increasing the durability of rolled rolls made of chromium-nickel cast iron. Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment for material processing in mechanical engineering and metallurgy. Kharkiv. NTU "KhPI". №43(1265). P. 5–9.

7. Rudenko V.M. (2012). Mathematical statistics: textbook. Kyiv. Center for Educational Literature. 304 p.

Калюжний О.Б.[1],
Платков В.Я.[2],
Автухов А.К.[1],
Марченко М.М.[1]
[1]Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна
[2]Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, м. Київ, Україна
E-mail: vplatkov@gmail.com

ВПЛИВ КОМБІНУВАННЯ ПОРОУТВОРЮВАЧІВ NaCl ТА $NaHCO_3$ НА СТРУКТУРУ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОРИСТИХ ПОЛІТЕТРАФТОРЕТИЛЕНІВ

https://doi.org/10.37700/ts.2024.25.50-57

УДК 669.162.252.442.8

Калюжний О.Б., Платков В.Я., Автухов А.К., Марченко М.М. ***Вплив комбінування пороутворювачів NaCl та $NaHCO_3$ на структуру та фізико-механічні властивості пористих політетрафторетиленів***

Анотація. *Досліджено методологію створення пористих полімерних матеріалів на основі політетрафторетилену (ПТФЕ) з використанням пороутворювачів NaCl і $NaHCO_3$ та їх комбінацій. Проаналізовано вплив складу пороутворювачів на морфологію пор і пористих структур і фізико-механічні властивості та їх взаємопов'язаність. Встановлено, що NaCl створює регулярну порову структуру з міцними міжпоровими перегородками, тоді як $NaHCO_3$ внаслідок руйнування міжпорових перегородок сприяє формуванню взаємопов'язаної порової структури з підвищеною зв'язаністю порового простору, але зі зниженою механічною міцністю. Комбінування пороутворювачів NaCl і $NaHCO_3$ формує матеріали зі складною морфологією порового простору, дозволяє досягти балансу між її розгалуженістю та міцністю. Отримані результати вказують шляхи створення пористих ПТФЕ, адаптованих до сучасних експлуатаційних вимог при застосування таких матеріалів у фільтраційних системах, біомедичних пристроях, теплообмінниках та інших технологічно важливих областях.*

Ключові слова: *політетрафторетилен (ПТФЕ), пористі полімери, порова структура, мікротвердість, пороутворювачі, мікроструктури, механічні властивості.*

Kalyuzhnyi O.B., Platkov V.Ya., Avtukhov A.K., Marchenko M.M. ***Influence of combining porogens NaCl and $NaHCO_3$ on structure and physic-mechanical properties of porous polytetrafluoroethylenes***

Abstract. *The methodology for creating porous polymeric materials based on polytetrafluoroethylene (PTFE) using NaCl, $NaHCO_3$, and their combinations as porogens has been studied. The influence of porogen composition on pore morphology, porous structures, and physic-mechanical properties, as well as their interdependence, has been analyzed. It has been established that NaCl forms a regular porous structure with strong inter-pore walls, while $NaHCO_3$, due to the destruction of these walls, promotes the formation*

of an interconnected porous structure with enhanced pore space connectivity but reduced mechanical strength. The combination of NaCl and $NaHCO_3$ as porogens creates materials with complex pore space morphology, allowing a balance between its branching and strength to be achieved. The obtained results suggest pathways for developing porous PTFE adapted to modern operational requirements for applications in filtration systems, biomedical devices, heat exchangers, and other technologically significant fields.

Keywords: *polytetrafluoroethylene (PTFE), porous polymers, pore structure, microhardness, porogen, microstructures, mechanical properties.*

Постановка проблеми

Актуальність проблеми створення пористих матеріалів із заданими властивостями обумовлена широким спектром їх застосування у ключових галузях науки та техніки.

Зростаючий попит на матеріали з пористою структурою, які можуть бути адаптовані до специфічних умов експлуатації, сприяє активному розвитку технологій їх виробництва.

Зокрема, пористі полімери з унікальними властивостями, такими як висока хімічна стійкість, біологічна інертність, регульована теплопровідність та газопроникність, знаходять застосування у фільтраційних системах, біомедичних пристроях, будівництві та інших напрямах [1].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Формування пористої структури з контрольованими параметрами є критичне завдання, оскільки саме вона визначає експлуатаційні характеристики пористих полімерів. Різноманітність методів формування пористої структури, включно з застосуванням варіативних пороутворювачів, відкриває можливості для створення пористих матеріалів з заданими властивостями [2].

Особливий інтерес в якості основи пористих матеріалів викликає полімер політетрафторетилен (ПТФЕ), що демонструє надзвичайно високі фізико-хімічні властивості та здатність працювати в екстремальних умовах [3].

Сучасні дослідження зосереджуються на оптимізації умов синтезу: варіюванні складу пороутворювачів, процесах змішування компонентів суміші, тиску компактування, температурному режимі для забезпечення необхідного порового простору структури [1]. Таким чином, проблема формування порової структури полімерів залишається актуальною в наслідок її значущості для розробки нових функціональних матеріалів, що відповідають викликам сучасної промисловості та медицини.

Дані дослідження спрямовані на вивченні впливу комбінування пороутворювачів на структуру та фізико-механічні властивості пористих ПТФЕ, які можуть дати змогу створювати пористі полімери зі специфічними експлуатаційними характеристиками, зокрема високою міцністю, стабільністю або підвищеною розгалуженістю порового простору.

Особлива увага приділена оптимізації співвідношення пороутворювачів NaCl і $NaHCO_3$, що дозволяє керувати морфологією порового простору, забезпечуючи бажану геометрію пор і будову міжпорових перегородок [4].

Такі дослідження мають вирішальне значення для розробки функціональних матеріалів, які можуть знайти застосування у фільтраційних системах, біомедичних пристроях, теплообмінниках та інших технологічно важливих сферах.

Формулювання мети досліджень

Мета роботи: розробка методології дослідження впливу комбінування пороутворювачів NaCl та $NaHCO_3$ на структуру та фізико-механічні властивості пористих політетрафторетиленів.

Результати досліджень

Пористі полімерні матеріали виготовляли шляхом попередньої підготовки суміші полімеру і диспергованих пороутворювачів в необхідному співвідношенні, їх змішування, таблетування, термообробки, вилуговування пороутворювачів і сушіння [5, 6]. В якості матеріалу основи використовувався порошкоподібний ПТФЕ (розмір часток 80 ÷ 120 мкм, щільність $2{,}19 \cdot 10^3$ кг/м^3). Як розчинний пороутворювач використовувався комерційний хлорид натрію (NaCl), а в якості пороутворювача, який частково газифікується, було обрано гідрокарбонат натрію ($NaHCO_3$). Щільність NaCl та $NaHCO_3$ становлять $2{,}17 \cdot 10^3$ кг/м^3 та $2{,}16 \cdot 10^3$ кг/м^3 відповідно, що близькі до щільності ПТФЕ. Це забезпечує якісне змішування компонентів суміші. Маси компонентів суміші, напівфабрикатів і пористих ПТФЕ визначалися з точністю ±0,01 г, а розміри напівфабрикатів і пористих ПТФЕ – з точністю ±0,01 мм.

Таблетування композиційних сумішей здійснювалось гідравлічним пресом у прес-формі при питомому тиску 100 ÷ 150 МПа.

Отримані заготівки розташовувались в електропечі, разом з піччю розігрівались до температури 380 °С, витримувались при цій температурі протягом 1,5 год. та охолоджувались разом з піччю.

Видалення пороутворювача здійснювалось шляхом зануренням заготівок в ємність з водою. В залежності від товщини заготівок водорозчинний пороутворювач видалявся протягом 5 ÷ 12 год.

Пористість матеріалів φ визначали розрахунковим методом [5]:

$$\varphi = \left(1 - \frac{m}{V\rho_{\text{птфэ}}}\right) \cdot 100, \% \qquad (1)$$

де m – маса пористого матеріалу, кг; V – об'єм пористого матеріалу, м^3; $\rho_{\text{птфэ}}$ – щільність ПТФЕ, кг/м^3.



Рис. 1. Прилад і зовнішній вигляд дослідженого зразка: 1 – твердомір Шора моделі 5610 зі шкалою А; 2 – зразок пористого ПТФЕ після вимірювань.

Порові структури вивчалися оптичним методом за допомогою цифрового мікроскопа USB Digital Microscope 1600X 8 LED.

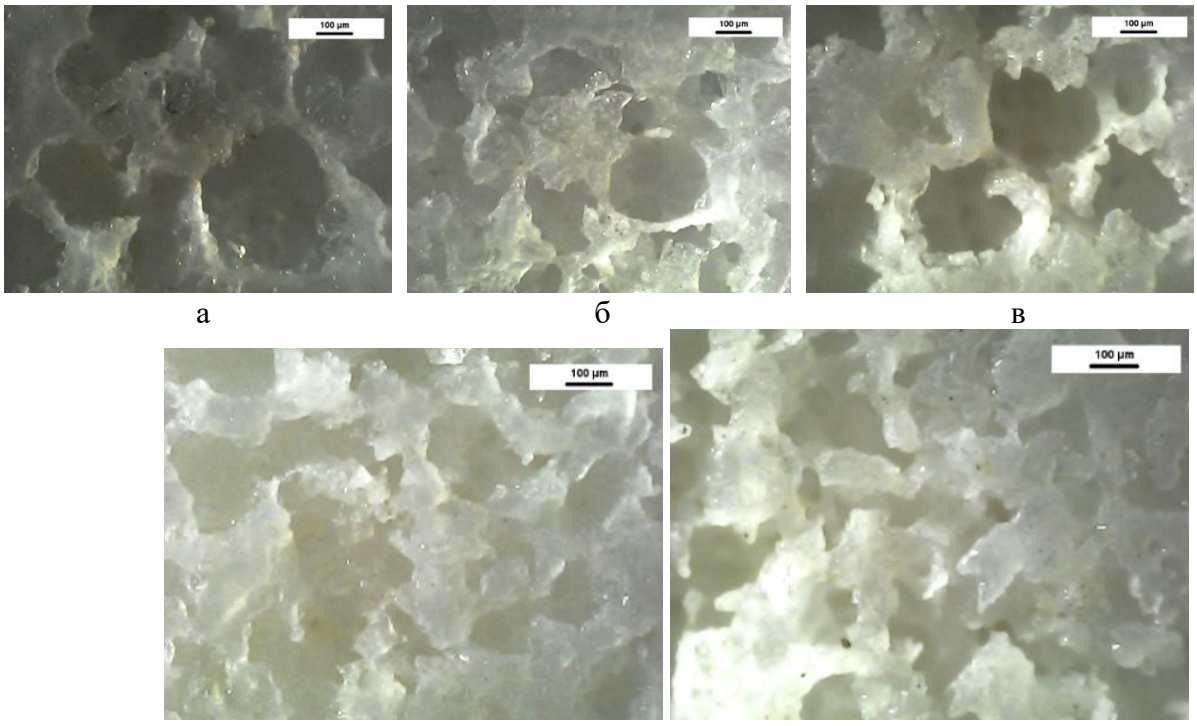
Про фізико-механічні властивості пористих ПТФЕ судили за мікротвердістю, яка визначалась методом Шора (HSa) відповідно стандарту ISO 868:2003 [7]. Для визначення мікротвердості використовувався цифровий твердомір (дюрометр) Шора моделі 5610 зі шкалою А з точністю вимірювання ±0,5 HSa (рис. 1). В процесі вимірювання HSa глибина проникнення індендора h_i збільшується з часом, при цьому час виходу на плато становив ~30 с. Значення h_i, які відповідають рівням виходу залежності $h_i(t)$ на плато, визначають дійсну мікротвердість пористих ПТФЕ. Зміна глибини проникнення індендора h_i у часі фіксувалася шляхом безперервного запису показань дюрометра.

На кожному пористому ПТФЕ, отриманому з використанням певного пороутворювача, у різних точках їхньої поверхні, здійснювалось 50 вимірювань HSa, на основі яких виконувався статистичний аналіз даних. Усі вимірювання виконані при температурі 20°С. Вивчено морфологію порового простору пористого ПТФЕ з пористістю 80%, отриманого методом вилуговування пороутворювача з різними співвідношеннями NaCl і $NaHCO_3$. Склад пороутворювачів та їх кодування (табл. 1).

Таблиця 1

Склад пороутворювачів, та їх кодування

Код пороутворювача	Пороутворювачі та їх співвідношення
100C	100% NaCl
75C25N	75% NaCl, 25% $NaHCO_3$
50C50N	50% NaCl, 50% $NaHCO_3$
25C75N	25% NaCl, 75% $NaHCO_3$
100N	100% $NaHCO_3$



а б в

г д

Рис. 2. Порова структура ПТФЕ сформована різними пороутворювачами:
а – 100C; б – 75C25N; в –50C50N; г – 25C75N; д – 100N

На рис. 2 наведені мікроструктури пористих ПТФЕ з пористістю 80%, отриманих різними пороутворювачами.

Встановлено, що склад пороутворювача впливає на морфологію порової структури ПТФЕ. Пористий ПТФЕ, створений пороутворювачем NaCl, має порову структуру з незруйнованими міжпоровими перегородками (рис. 1а). При цьому формуються пори, розмір яких прямо залежить від розміру частинок пороутворювача, але сформована порова структура не достатньо зв'язана.

Додавання 25% $NaHCO_3$ до складу пороутворювача NaCl призводить до руйнування міжпорових перегородок і зростання взаємозв'язку порової структури (рис. 1б). Зі збільшенням вмісту $NaHCO_3$ у складі пороутворювача морфологія пор різко змінюється: пори набувають неправильної форми (рис. 1в,г). Можна бачити, що комбінування NaCl і $NaHCO_3$ формує пористі структури з різним розміром і типом пор. Зміною співвідношення цих компонентів пороутворювача можна впливати на форму і ступінь зв'язаності пор. При цьому утворюється більш складна порова структура, що поєднує великі й дрібні пори.

При використанні в якості пороутворювача $NaHCO_3$ часткова газифікація формує порову структуру з високою взаємозв'язаністю пор і при цьому утворює розгалужений та безперервний поровий простір (рис. 1д).

Мікротвердість є ключовий показник, який характеризує фізико-механічні властивості пористих матеріалів. Вона визначає здатність матеріалу протидіяти локальним механічним впливам, таким як вдавлювання чи подряпини. Вивчення мікротвердості дозволяє оцінити міцність і надійність пористого матеріалу в умовах експлуатації, а також визначити вплив різних чинників, зокрема складу пороутворювачів, на механічні властивості. Особливий інтерес становить дослідження мікротвердості пористих ПТФЕ, отриманих з використанням різних пороутворювачів або їх комбінування, що впливає на форму пор, товщину й якість міжпорових перегородок і тим самим формує поровий простір.

Досліджена мікротвердість пористих ПТФЕ з φ = 80%, сформованих різними пороутворювачами. Для кожного пористого ПТФЕ виконано 50 вимірювань мікротвердості, на основі яких проведено статистичний аналіз отриманих даних, який дозволив визначити середні значення мікротвердості $HSa_{ср}$, стандартне відхилення σ (параметр, що характеризує ступінь розкиду вимірювань HSa), а також розмах R (різницю між максимальним HSa_{max} та мінімальним HSa_{min} значеннями мікротвердості). Отримані данні наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Статистичні дані мікротвердості пористих ПТФЕ, сформованих різними пороутворювачами

Статистичні параметри	Код пороутворювача				
	100C	75C25N	50C50N	25C75N	100N
$HSa_{ср}$	44,4	36,3	39,5	35,3	30,3
σ	0,772	0,843	0,984	0,904	0,849
HSa_{max}	46,0	38,0	42,0	37,5	32,0
HSa_{min}	42,5	34,0	37,0	33,0	28,0
R	3,5	4,0	5,0	4,5	4,0

Дані вимірювання мікротвердості пористих ПТФЕ, сформованих з використанням різних типів пороутворювачів, наведено на рис. 3, де точки представляють середнє арифметичне значення мікротвердості $HSa_{ср}$, а «вуса»

відображають граничні відхилення значень HSa, а крива є сплайн-інтерполяція отриманих результатів.

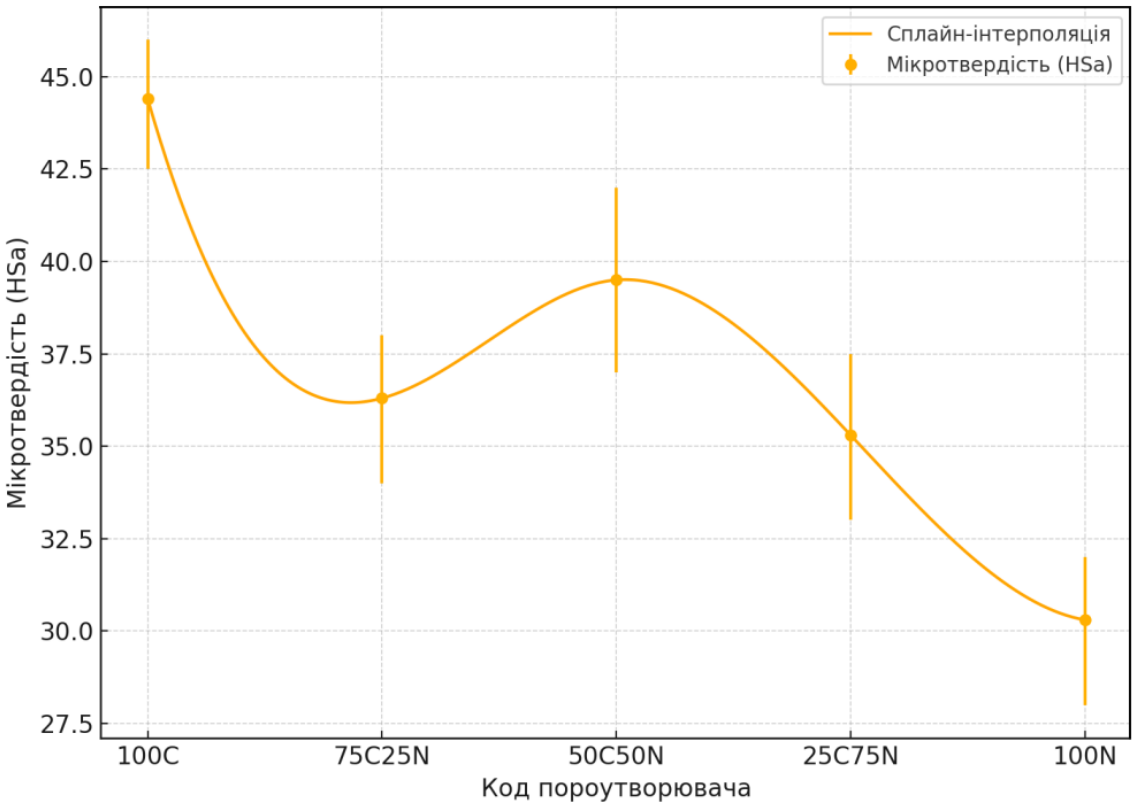


Рис. 3. Мікротвердість пористих ПТФЕ, створених різними пороутворювачами

Пористий ПТФЕ, створений пороутворювачем NaCl, має максимальну твердість 44,4 HSa. Це обумовлено тим, що пороутворювач NaCl формує регулярні та міцні міжпорові перегородки без значних дефектів.

Найменша мікротвердість 30,3 HSa спостерігається на пористому ПТФЕ, сформованому пороутворювачем $NaHCO_3$. Значне зниження мікротвердості обумовлено частковою газифікацією $NaHCO_3$, яка викликає розриви міжпорових перегородок, що в свою чергу призводить до зниження міцності матеріалу. Незважаючи на однакову пористість 80%, руйнування міжпорових перегородок робить пористий ПТФЕ більш м'яким.

Комбінування пороутворювачів неоднозначно впливає на морфологію пор, міжпорові перегородки і поровий простір, що змінює мікротвердість пористих ПТФЕ. Додавання 25% $NaHCO_3$ до NaCl знижує мікротвердість до 36,3 HSa внаслідок утворення дефектів у міжпорових перегородках. Пороутворювач, який складається з 50% $NaHCO_3$ і 50% NaCl, не зважаючи на часткову газифікацію $NaHCO_3$, формує порову структуру, при якій спостерігається аномальне збільшення мікротвердості до 39,5 HSa. Подальше збільшення вмісту $NaHCO_3$ до 75% внаслідок активної газифікації призводить до зростання дефектності порової структури, що призводить до зниження мікротвердості до 35,3 HSa.

Таким чином варіювання складу та співвідношення компонентів пороутворювачів, дозволяє цілеспрямовано створювати контрольовану морфологію пористого простору, і тим самим формувати механічні та експлуатаційні властивості пористих ПТФЕ.

Висновки

Досліджено вплив пороутворювачів NaCl і $NaHCO_3$ та їх комбінування на морфологію пористої структури ПТФЕ з φ=80%. Показано, що пороутворювач NaCl формує пори, розмір яких залежить від розміру частинок пороутворювача, з незруйнованими міжпоровими перегородками, але поровий простір недостатньо зв'язаний. Комбінування пороутворювачів NaCl і $NaHCO_3$ змінює не тільки форму пор, але дозволяє регулювати ступінь їх зв'язаності. Пороутворювач $NaHCO_3$ формує розгалужену, безперервну порову структуру з високою взаємозв'язаністю пор.

Варіювання порової структури обумовлює зміну фізико-механічних властивостей пористих ПТФЕ, зокрема їх мікротвердість. Максимальна мікротвердість пористого ПТФЕ (44,4 HSa) досягається при використанні пороутворювача NaCl, а найменша мікротвердість (30,3 HSa) спостерігається при застосуванні пороутворювача $NaHCO_3$. Комбінування пороутворювачів змінює мікротвердість: додавання 25% $NaHCO_3$ до NaCl знижує її до 36,3 HSa, співвідношення пороутворювачів 50% $NaHCO_3$ і 50% NaCl підвищує до 39,5 HSa, а збільшення вмісту $NaHCO_3$ до 75% зменшує мікротвердість до 35,3 HSa.

Це дозволяє створювати пористі ПТФЕ з необхідними характеристиками для широкого спектра інженерних і медичних застосувань. Пористий ПТФЕ, створений пороутворювачем NaCl, може використовуватись в конструкціях, що потребують високої механічної міцності, зокрема, у фільтруючих системах, сепараторах, а також у вузлах із високими вимогами до зносостійкості. Пористий ПТФЕ, створений пороутворювачем $NaHCO_3$, можна рекомендувати для біомедичних застосувань, таких як тканинна інженерія, імпланти, системи доставки ліків, де важлива висока проникність, а механічна міцність не є критичним параметром. Пористі ПТФЕ, створені комбінуваням пороутворювачів NaCl і $NaHCO_3$, можуть використовуватись у теплообмінниках, каталізаторах, пористих мембранах і системах з регульованими характеристиками теплопровідності та проникності.

Список використаних джерел

1. Drobny, J.G. Technology of Fluoropolymers. CRC Press Taylor & Francis Group, 2009, 250 p.
2. Wu, J., Xu, F., Li, S., Ma, P., Zhang, X., Liu, Q., Fu, R., Wu, D. Porous Polymers as Multifunctional Material Platforms toward Task-Specific Applications. Adv. Mater. 2019, 31, 1802922–1802967. https://doi.org/10.1002/adma.20180292.
3. Mane, S. Effect of Porogens (Type and Amount) on Polymer Porosity: A Review. Can. Chem. Trans. 2016, 4, 210. https://doi.org/10.13179/canchemtrans.2016.04.02.0304.
4. Suhaimin, I.S., Zubir, S.A., Abdullah, T.K. Effect of Leaching Agent Composition on Morphology, Thermal and Mechanical Properties of Bioglass® Reinforced Polyurethane Scaffold. Int. J. Cur. Res. Eng. Sci. Tech. A 2018, 1, 19–27. https://doi.org/10.30967/ijcrset.1.S1.2018.19-27.
5. Kaliuzhnyi, O.B., Platkov, V.Y. The Structure and Properties of Porous Poly(tetrafluoroethylene). J. Polym. Res. 2022, 29, 32. https://doi.org/10.1007/s10965-022-02887-w.
6. Kaliuzhnyi, O.B., Platkov, V.Ya. Formation of Porous Poly(tetrafluoroethylene) Using a Partially Gasified Porogen. Iran J. Mater. Sci. Eng. 2020, 17(2), 13. https://doi.org/10.22068/ijmse.17.2.13.
7. ISO 868:2003. Plastics and Ebonite — Determination of Indentation Hardness by Means of a Durometer.

References

1. Drobny, J.G. (2009). Technology of Fluoropolymers. CRC Press Taylor & Francis Group, 250 p.
2. Wu, J., Xu, F., Li, S., Ma, P., Zhang, X., Liu, Q., Fu, R., Wu, D. (2019). Porous Polymers as Multifunctional Material Platforms toward Task-Specific Applications. Adv. Mater. 31, 1802922–1802967. https://doi.org/10.1002/adma.20180292.
3. Mane, S. (2016). Effect of Porogens (Type and Amount) on Polymer Porosity: A Review. Can. Chem. Trans. 4, 210. https://doi.org/10.13179/canchemtrans.2016.04.02.0304.
4. Suhaimin, I.S., Zubir, S.A., Abdullah, T.K. (2018). Effect of Leaching Agent Composition on Morphology, Thermal and Mechanical Properties of Bioglass® Reinforced Polyurethane Scaffold. Int. J. Cur. Res. Eng. Sci. Tech. A, 1, 19–27. https://doi.org/10.30967/ijcrset.1.S1.2018.19-27.
5. Kaliuzhnyi, O.B., Platkov, V.Y. (2022). The Structure and Properties of Porous Poly(tetrafluoroethylene). J. Polym. Res. 29, 32. https://doi.org/10.1007/s10965-022-02887-w.
6. Kaliuzhnyi, O.B., Platkov, V.Ya. (2020). Formation of Porous Poly(tetrafluoroethylene) Using a Partially Gasified Porogen. Iran J. Mater. Sci. Eng. 17(2), 13. https://doi.org/10.22068/ijmse.17.2.13.
7. ISO 868:2003. (2004). Plastics and Ebonite — Determination of Indentation Hardness by Means of a Durometer.

Рибалко І.М.[1],
Тіхонов О.В.[1],
Марков О.В.[2],
Захаров А.В.[1],
Рижков Р.С.[1]
[1]Державний біотехнологічний університет,
м. Харків, Україна
[2]Національна академія Національної гвардії України,
м. Харків, Україна
E-mail:
kafedraTSRP@i.ua

ВПЛИВ МОДИФІКУЮЧИХ ДОМІШОК ПРИ НАНЕСЕННІ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ПОКРИТТІВ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ

https://doi.org/10.37700/ts.2024.25.58-67

УДК 621.791

Рибалко І.М., Тіхонов О.В., Марков О.В., Захаров А.В., Рижков Р.С. ***Вплив модифікуючих домішок при нанесенні відновлювальних покриттів на зносостійкість***

Анотація. *У статті розглядається проблема абразивного зношування, яке є основною причиною виходу з ладу деталей машин і механізмів, особливо сільськогосподарського обладнання. Дослідження акцентують увагу на механохімічних аспектах процесу зношування, включаючи роль фізико-хімічної взаємодії матеріалів із навколишнім середовищем. Встановлено, що контакт абразиву із металевими поверхнями створює неоднорідне напруження, що сприяє підвищеному активуванню поверхневих шарів і збільшує інтенсивність окислювальних процесів. Представлено результати дослідження зносостійкості відновлених поверхонь деталей, оцінених за 12 варіантами. Розглянуто ефективність використання різних матеріалів і технологій наплавлення. Встановлено, що відносна зносостійкість наплавлення дротом Св-08Г2С без модифікуючих домішок становить 1,0; із застосуванням наноалмазів – 0,17, дисперсних алмазів – 0,22, порошку шунгіту – 0,26. Найкращі показники зносостійкості досягнуті при використанні глини та немагнітної фракції детонаційної шихти з алмазними включеннями на електрод Т-620. Наплавлення по шлікерному покриттю не впливає суттєво на коефіцієнт тертя. Досліджено можливість використання глин із різних родовищ, зокрема глини Прилукського родовища, яка зменшує знос поверхонь на 27%. Глина Куп'янського родовища, навпаки, підвищує знос. Зроблено висновки щодо оптимізації конструкційних, технологічних і експлуатаційних заходів для забезпечення довговічності обладнання, працюючого в абразивному середовищі. Подано рекомендації з вибору матеріалів і способів зміцнення поверхонь для покращення міжремонтного періоду експлуатації машин.*

Ключові слова: *домішка; модифікатор; покриття; зносостійкість; випробування; вторинна сировина; бентонітова глина; наплавлення.*

Rybalko I.M., Tihonov O.V., Markov O.V., Zakharov A.V., Ryzhkov R.S. ***Influence of modifying additives when applying restoration coatings on wear resistance***

Abstract. *The article addresses the issue of abrasive wear, which is the primary cause of machine and mechanism failures, particularly in agricultural equipment. The study focuses on the mechanochemical aspects of wear processes, including the role of physico-chemical interactions between materials and the environment. It has been established that the contact of abrasive particles with metal surfaces creates non-uniform stress, which enhances surface layer activation and increases the intensity of oxidative processes. The article presents the results of a study on the wear resistance of restored component surfaces evaluated across 12 variants. The effectiveness of various materials and welding technologies is examined. It was found that the relative wear resistance of welding using Sv-08G2S wire without modifying additives is 1.0; with nanodiamonds – 0.17, dispersed diamonds – 0.22, and shungite powder – 0.26. The best wear resistance results were achieved using clay and the non-magnetic fraction of detonation mixtures with diamond inclusions on the T-620 electrode. Welding with slip coating did not significantly affect the coefficient of friction. The feasibility of using clays from various deposits was studied, particularly clay from the Pryluky deposit, which reduces surface wear by 27%. In contrast, clay from the Kupyansk deposit increased wear. Conclusions were drawn regarding the optimization of design, technological, and operational measures to ensure the durability of equipment operating in abrasive environments. Recommendations are provided for the selection of materials and surface strengthening methods to improve the maintenance intervals of machinery.*

Keywords: *admixture; modifier; coating; wear resistance; testing; secondary raw materials; bentonite clay; surfacing.*

Постановка проблеми

Основною причиною виходу з ладу машин та механізмів є знос. 80-90% рухомих з'єднань та робочих органів сільськогосподарських машин, які контактують з абразивним матеріалом, піддаються інтенсивному зносу, втрачають свої експлуатаційні властивості, а це спричиняє за собою збільшення капіталовкладень на ремонт, відновлення, а в деяких випадках, заміну обладнання.

Абразивне зношування є одним із найбільш поширених та згубних видів поверхневого руйнування [1-8]. Незважаючи на надмірну поширеність та руйнівну дію, процес абразивного зношування досліджений однобічно. Абразивне зношування досі розглядається як переважно механічний процес. Останнім десятиліттям було чітко встановлено великий вплив на процеси руйнування робочих середовищ і особливо їх активних компонентів. Механічно активізовані поверхні тертя термодинамічно неминуче і активно взаємодіють з окислювачами. Наявність абразиву призводить до додаткового пружнопластичного деформування поверхневих шарів, їх активування та подальшої взаємодії із зовнішнім середовищем. В результаті об'єктом руйнування стають вторинні структури, які неминуче і постійно утворюються на поверхнях тертя.

З аналізу цих робіт випливає, що найбільш поширеним та швидкоплинним є абразивне зношування [1-8]. Розрахункові залежності абразивного зношування побудовані переважно на емпіричній основі. Існує низка теорій, що пояснюють процеси поверхневого руйнування матеріалів, проте існуючі думки про сутність процесу абразивного зношування суперечливі, переважають механічні концепції. В окремих роботах вказується, що на формування структури поверхневих шарів за наявності абразивного середовища впливає і фізико-хімічна дія довкілля.

Контакт абразивної частинки із металевою поверхнею носить дискретний характер. Дискретний розподіл навантаження призводить до неоднорідності поля

напруги в поверхневому шарі. При цьому напруга може збільшуватися в 6-7 разів при тих же тисках на номінальну площу. У загальному випадку тиск окатаної абразивної частинки по поверхні металу можна розглядати як ковзання твердої напівсфери по об'єму, що пластично деформується.

Знаючи основні механізми механохімічної форми абразивного зношування - посилене активування за рахунок додаткової концентрації напруг та більш інтенсивне окислення – пасивацію і як на них впливають умови тертя, матеріали та середовище, можна керувати поверхневою міцністю та руйнуванням. При управлінні необхідно забезпечувати динамічну рівновагу процесів активування та пасивації та оптимальний захист робочих поверхонь від додаткового впливу активних компонентів зовнішнього середовища, зокрема кисню.

Вибір оптимального варіанта керування шляхом застосування конструкторських, технологічних та експлуатаційних засобів забезпечення зносостійкості. Конструкторські та технологічні засоби мають бути в основному спрямовані на стримування процесів активізації, експлуатаційні на керування пасивацією.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Протягом багатьох десятиліть провідні науковці займаються питанням підвищення зносостійкості робочих органів машин від абразивного зношування. Це питання залишається дуже актуальним і досі.

Загальними питаннями теорій та практики виготовлення й ремонту деталей сільськогосподарських машин працюючих в абразивному середовищі, присвячена велика кількість робіт як зарубіжних, так і вітчизняних науковців. Зокрема, був вивчений механізм абразивного зношування, розроблені методики дослідження та класифікація абразивного зношування, досліджувались нові матеріали та прогресивні технології для відновлення деталей обладнання; визначили фактори, що впливають на довговічність обладнання при абразивному зносі, а також вимоги до конструкційних матеріалів, які дозволяють збільшити міжремонтний період роботи обладнання.

Визнаючи значущість попередніх досліджень слід відмітити, що переважна більшість розробок є вузькоспрямовоною, тоді як існує потреба в універсальному підході до визначення зносу та зносостійкості різних видів обладнання, що працює при варіабельності експлуатаційних умов.

Формулювання мети досліджень

Обґрунтований вибір легуючих елементів та модифікуючих домішок у сплавах для трібосистем тертя машин, механізмів і приладів впливає на закономірності явища структурної пристосовуваності і є одним з головних шляхів досягнення оптимальних показників тертя і поверхневої міцності [1-8].

Дотепер питанням легування металевих матеріалів з метою підвищення їхньої зносостійкості приділялося мало уваги. Вибір легуючих елементів і розробка спряжень антифрикційних матеріалів для підшипників ковзання здійснювалися емпіричним шляхом з урахуванням уявлень, сформульованих у правилах Шарпі, Боудена. Фрикційні матеріали для деталей гальмових систем розроблялися також емпіричним шляхом відповідно до переліків технічних вимог, пропонованих до експлуатації таких спряжень. Вплив тих чи інших комплексів легуючих елементів оцінювався за результатами не стандартизованих лабораторних і промислових випробувань.

Виявлення фізичних механізмів структурної пристосовуваності створює основу

для розвитку теорії легування і розкриває принципово нові можливості практичних рішень для забезпечення максимальної поверхневої міцності, антифрикційності і фрикційності матеріалів шляхом обґрунтованого вибору легуючих елементів та їхніх комплексів.

Одержання вторинних структур заданого типу, що мають оптимальні властивості, істотно залежить від хімічного складу вихідного матеріалу. Легуючі добавки обумовлюють кінетику утворення і весь комплекс властивостей вторинних структур, які визначають їхню міцність і зв'язок з основним металом.

У теоретичному плані питання легування сталі з метою підвищення зносостійкості раніше взагалі не розглядалися. Сполуки сталей, для тертьових деталей вибиралися в основному емпіричним шляхом без виявлення механізмів зносостійкості. Основною умовою досягнення зносостійкості було забезпечення високої твердості.

Основним завданням керування поверхневою міцністю деталей машин, що працюють в абразивному середовищі, є усунення можливостей виникнення механічної форми та мінімізація рівня механохімічного зношування. Ці завдання можуть бути вирішені при застосуванні методів зміцнюючої технології за рахунок збільшення властивостей міцності і активізації, структури і хімічного складу матеріалу. Метод наплавлення у зв'язку з великими можливостями зміни механічних властивостей, структури та хімічного складу дає великі перспективи ефективного використання для локалізації абразивного зношування.

Результати досліджень

Для оцінки впливу модифікуючих домішок при нанесенні відновлювальних покриттів провели їх випробування на зносостійкість.

Відносну зносостійкість різних способів відновлення поверхонь деталей проводили і оцінювали за дванадцятьма варіантами [9-15]:

1 – наплавлення дротом Св-08Г2С з використанням наноалмазів;

2 – наплавлення дротом Св-08Г2С з використанням дисперсних алмазів;

3 – наплавлення дротом Св-08Г2С без введення модифікуючих домішок;

4 – наплавлення дротом Св-08Г2С з використанням порошку шунгиту;

5 – вихідний матеріал культиваторної лапи – сталь 65Г;

6 – нанесенням покриття електродом Т-620 з додатковим модифікуванням немагнітною фракцією детонаційної шихти шляхом обмазки електрода;

7 – наплавлення електродом Т-620 з використанням розплавлення шлікерного покриття немагнітної фракції детонаційної шихти;

8 – нанесення покриття електродом Т-620;

9 – наплавлення електродом Т-620 з його обмазкою бентонітовою глиною.

10 – наплавлення електродом Е46 – Моноліт

11 – наплавлення електродом з додатковим введенням глини Прилукського родовища;

12 – наплавлення електродом з додатковим введенням глини Куп'янського родовища.

Випробування на знос проводили на машині тертя СМТ-1. Випробування проводили за схемою «диск-колодка». Схема випробувань і розмір зразків наведені на рис. 1.

При цьому, використовували різні середовища випробувань: моторне мастило марки М14В2 з домішкою 3% кварцового пилу; з кварцовим піском фракцією 0,25-0,40мм, як абразив, а також без використання мастила.

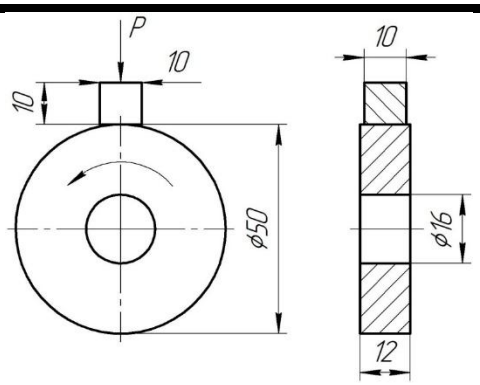


Рис. 1. Схема випробувань і розміри зразків при випробуваннях на зношення

Тривалість кожного ступеню навантаження становила 2,5 хв. При цьому, частота обертів на всіх рівнях була постійною– 500хв$^{-1}$.

При даних випробуваннях також використовували сполучення деталь – «диск» з фторопласту Ø50мм. Швидкість ковзання при цьому становила 0,78 м/с. Як контртіло для деяких зразків були використані ролики, виготовлені з легованого сірого чавуну.

Таблиця 1

Коефіцієнт тертя досліджуваних варіантів відновлення і зміцнення модифікуванням

№ варіанту	Значення $f_{тер}$ при навантаженні P=200Н
1. Вихідний матеріал культиваторної лапи сталь 65Г	0,38-0,42
2. Наплавлення електродом Т-620 з додатковим введенням немагнітної фракції детонаційної шихти	0,38-0,42
3. Наплавлення електродом Т-620 по шлікерному покриттю немагнітної фракції детонаційної шихти	0,34-0,38
4. Наплавлення електродом Т-620	0,32-0,34
5. Наплавлення електродом Т-620 з додатковим модифікуванням бентонітовою глиною	0,34-0,36
6. Наплавлення з наноалмазами дротом Св-08Г2С	0,080-0,093
7. Наплавлення без введення домішки дротомСв-08Г2С	0,090-0,101
8. Наплавлення з дисперсними домішками алмазів дротом Св-08Г2С	0,100-0,101
9. Наплавлення з шунгітом дротом Св-08Г2С	0,090-0,095
10. Наплавлення електродом Е46 – Моноліт	0,0928-0,217
11. Наплавлення електродом Е46 з додатковим введенням глини Прилукського родовища	0,0678-0,130
12. Наплавлення електродом Е46 з додатковим введенням глини Куп'янського родовища	0,1242-0,213

Перед випробуванням підготовлені зразки (колодки, диски) промивали, маркували, зважували на вагах WA-200 і визначали початковий рівень мікротвердості. Під час випробувань фіксували момент тертя.

По завершенню етапу випробувань і повного охолодження зразка і ролика, їх ретельно промивали, зважували для визначення величини зносу. Потім вимірювали ширину доріжки тертя. Оцінювали коефіцієнт тертя по залежності:

$$f = \frac{M_{тер}}{P \cdot r_p}, \quad (1)$$

де $M_{тер}$ – момент тертя, Н·м;

P – сила нормального тиску, яка притискає зразок до ролика, Н;

r_p – радіус ролика, м;

Значення коефіцієнтів тертя та зносів зразків наведені в табл. 1-2 та на рис. 2-3.

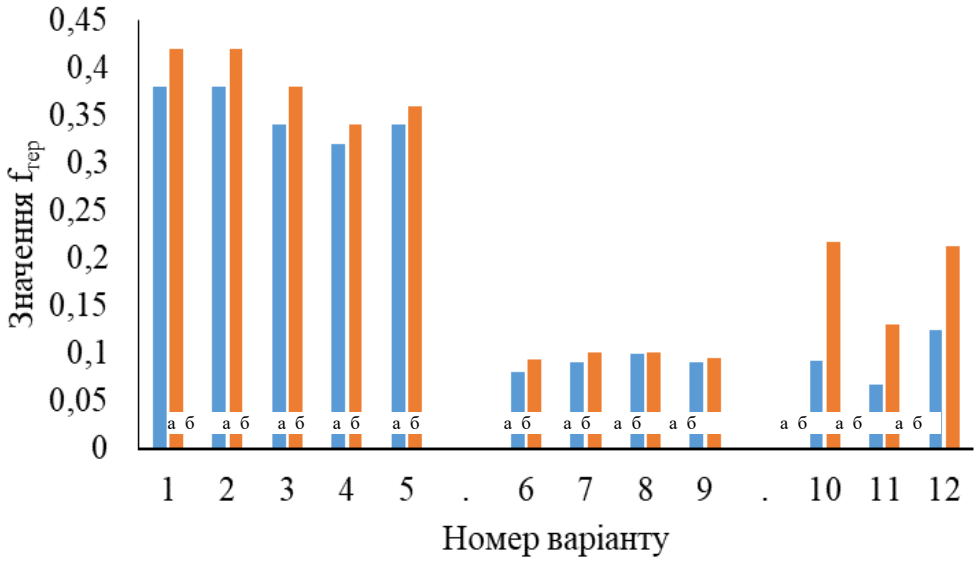


Рис. 2. Значення коефіцієнтів тертя після випробувань: а – мінімальне значення коефіцієнту тертя; б – максимальне

Таблиця 2

Значення зносу зразків після випробувань в середовищі кварцового піску

№ з/п	Варіант зміцнення	Знос, г
1	Вихідний матеріал культиваторної лапи – сталь 65Г	0,0145
2	Наплавлення обмазкою електродом Т-620 з введенням немагнітної фракції детонаційної шихти	0,0044
3	Наплавлення електродом Т-620 по шлікерному покриттю з немагнітної фракції детонаційної шихти	0,0092
4	Наплавлення електродом Т-620	0,0090
5	Наплавлення електродом Т-620 з додатковим введенням бентонітової глини	0,0066
6	Наплавлення з наноалмазами дротом Св-08Г2С	0,17
7	Наплавлення без домішок дротом Св-08Г2	1,0
8	Наплавлення з дисперсними алмазами дротом Св-08Г2С	0,22
9	Наплавлення з шунгітом дротом Св-08Г2С	0,26
10	Наплавлення електродом Е46 - Моноліт	0,0928
11	Наплавлення електродом з додатковим введенням глини Прилукського родовища	0,0678
12	Наплавлення електродом з додатковим введенням глини Куп'янського родовища	0,1242

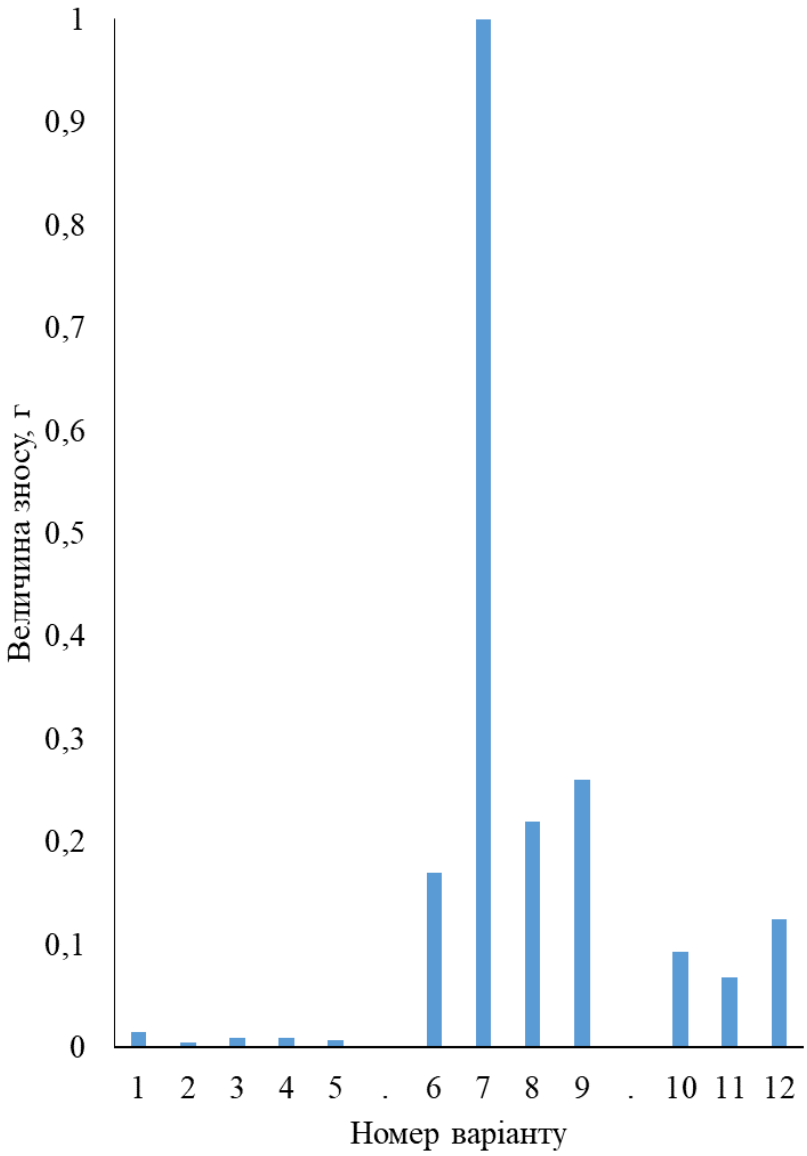


Рис. 3. Випробування на зношування в умовах абразивного середовища

Аналізуючи результати досліджень встановлено, що у варіанті модифікування зміцнюючого покриття для сталі 65 найменший коефіцієнт тертя має наплавлення електродом Т-620 без модифікування. В той же час найменший знос мають зразки наплавлені електродом Т-620 з введенням немагнітної фракції детонаційної шихти. Для варіанта наплавлення на сталь 45 дріт Св-08Г2С з модифікуванням наноалмазами має найменший коефіцієнт тертя та знос одночасно. При наплавленні деталей зі сталі 45 електродом Е-46 Моноліт з додатковим введенням глини Прилуцького родовища також виявлено найменший коефіцієнт тертя та знос [9-15]. Відносна зносостійкість – це величина, яка характеризує здатність матеріалу або поверхні протистояти зносу під час експлуатації. Вона визначається співвідношенням між зносом даного матеріалу і зносом еталонного матеріалу в однакових умовах експлуатації. Цей показник зазвичай виражається у відсотках або у вигляді безрозмірного коефіцієнта. Відносна зносостійкість використовується для оцінки властивостей матеріалів у машинобудуванні, будівництві та інших галузях, де важливий термін служби виробів.

Висновки

1. Визначення відносної зносостійкості способів відновлення поверхонь деталей досліджували і оцінювали за дванадцятьма варіантами.
2. Встановлено, що відносна зносостійкість наплавлення дротом Св-08Г2С без введення модифікуючих домішок – 1,0, з використанням наноалмазів – 0,17, з використанням дисперсних алмазів – 0,22, з використанням порошку шунгіту – 0,26.
3. З результатів випробувань слідує, що найкращі показники при оцінці зносостійкості показали зразки з додатковим введенням глини і немагнітної фракції детонаційної шихти з алмазними включеннями на електрод Т-620. Наплавлення по шлікерному покриттю істотних змін не вносить і за коефіцієнтом тертя вона знаходиться на рівні звичайного наплавлення електродом.
4. Не завжди в умовах ремонтного підприємства сільськогосподарської техніки є можливість застосувати бентонітову глину. Вивчено можливість використання глин інших родовищ. Найкращий результат досягається в варіанті з використанням глини Прилукського родовища в якості додаткового ліхтерного покриття модифікуючої домішки. Знос такого варіанту зміцнення зменшується на ~ 27%. При введенні глини Куп'янського родовища знос збільшився.
5. Випробування показали, що коефіцієнт зносу для колодки змінюється в залежності від використовуваного електроду (дроту) та модифікуючої домішки.

Список використаних джерел

1. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах. Київ. Техніка, 1970. 396 с.
2. Черновол М.И. Восстановление и упрочнение деталей сельскохозяйственной техники: учебное пособие. Київ. УМК ВО. 1989. 256 с.
3. Закалов О.В. Триботехніка і підвищення надійності машин. Тернопіль. ТДТУ. 2000. 354 с.
4. Антипенко А.М., Бєлас О.М., Войтов В.А. Основи трибології: підручник. За ред. В.А. Войтова. Харків. ХНТУСГ. 2008. 342 с.
5. Сидашенко А.И., Науменко А.А., Скобло Т.С. Теоретические основы технологии ремонта машин: учебник в 3-х т. Том 1. Теория и технология производственных процессов ремонта машин. Под ред. А.И. Сидашенко, А.А. Науменко. Харьков. ХНТУСХ. 2005. 590 с.
6. Скобло Т.С., Рыбалко И.Н., Сидашенко А.И., Тихонов А.В., Сайчук А.В. Технология локального легирования при восстановлении деталей: монография. Харків. ТОВ «Щедра садиба плюс». 2014. 208 с.
7. Кондрачук М.В., Хабутель В.Ф., Пашечко М.І., Корбут Є.В.. Трибологія. Київ. Вид-во Національного авіаційного університету «НАУ-друк». 2009. 232 с.
8. Закалов О.В., Закалов І.О. Основи тертя і зношування в машинах. Тернопіль. Видавництво ТНТУ імені Івана Пулюя. 2011. 322 с.
9. Рижков Р.С., Рибалко І.М. Управління абразивним зношуванням деталей машин. Молодь і індустрія 4.0 в XXI столітті: збірка матеріалів форуму XX Міжнародного форуму молоді. Харків. ДБТУ. 2024. С. 142.
10. Рибалко І.М., Тіхонов О.В., Рижков Р.С. Тепловиділення на поверхні тертя в абразивному середовищі. Інтелектуальні транспортні технології: тези доповідей 5 Міжнародної науково-технічної конференції. Харків. 25–27 листопада 2024 року. Харків. УкрДУЗТ. 2024. С. 316–319.
11. Skoblo T.S., Rybalko I.N., Tihonov A.V., Maltsev T.V. Improving the wear resistance of hoeblades bymodify ingofrestoration coatings. *Problems of Tribology*. 2019.

Vol. 94 (4). P. 27–31. https://doi.org/10.31891/2079-1372-2019-94-4-27-32.

12. Скобло Т.С., Нанка О.В., Сайчук О.В., Рибалко І.М., Марков О.В. Модифікування при відновленні виробів наплавленням із застосуванням детонаційної шихти. Промисловість в фокусі. Харків, 2021. №3 (99). С. 53–56.

13. Рибалко І.М., Тіхонов О.В., Гобиш В.С. Підвищення зносостійкості деталей введенням модифікаторів глин українських родовищ в наплавлення. Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв: матеріали міжнародної науково-практичної конференції. 24-25 листопада 2022 року. Харків. С. 355–357.

14. Скобло Т.С., Тіхонов О.В., Рибалко І.М. Використання дисперсних домішок вторинної сировини при відновленні деталей машин. Промышленность в фокусе. Харків. 2019. №12 (84). С. 55–57.

15. Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Рыбалко И.Н., Марков А.В. Применение модифицирующих присадок для восстановления деталей машин. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Кропивницький: ЦНТУ, 2017. Вип. 47, Ч. І. С. 229–240.

References

1. Kostetsky B.I. (1970). Friction, lubrication and wear in machines. Kyiv. Technics. 396 p.

2. Chornovol M.I. (1989). Restoration and strengthening of details of agricultural technology: Textbook. Kiev. UMC VO. 256 p.

3. Zakalov O.V. (2000). Tribotechnics and improving the reliability of machines. Ternopil. TDTU. 354 p.

4. Antipenko A.M., Belas O.M., Voitov V.A. (2008). Fundamentals of Tribology: Textbook. For a row. V.A. Voitova. Kharkiv. KhNTUSG. 342 p.

5. Sidashenko A.I., Naumenko A.A., Skoblo T.S. (2005). Theoretical Foundations of Machine Repair Technology: Textbook in 3 vols. Volume 1. Theory and technology of production processes of machine repair. Ed. A.I. Sidashenko, A.A. Naumenko. Kharkiv. KhNTUSH. 590 p.

6. Skoblo T.S., Rybalko I.N., Sidashenko A.I., Tikhonov A.V., Saichuk A.V. (2014). Technology of local doping in the restoration of parts: monograph. Kharkiv. LLC "Generous Estate Plus". 208 p.

7. Kondrachuk M.V., Khabutel V.F., Pashechko M.I., Korbut E.V. (2009). Tribology. Kiev. Publishing House of the National Aviation University "NAU-Druk". 232 p.

8. Zakalov O.V., Zakalov I.O. (2011). Fundamentals of friction and wear in machines. Ternopil. Ivan Puluy TNTU Publishing House. 322 p.

9. Ryzhkov R.S., Rybalko I.M. (2024). Control of abrasive wear of machine parts. Youth and Industry 4.0 in the XXI Century: A Collection of Materials of the XX International Youth Forum. Kharkiv. DBTU. P. 142.

10. Rybalko I.M., Tikhonov O.V., Ryzhkov R.S. (2024). Heat Generation on the Friction Surface in an Abrasive Medium. Intelligent Transport Technologies: Abstracts of the 5th International Scientific and Technical Conference. Kharkiv. November 25–27, Kharkiv. UkrDUZT. P. 316–319.

11. Skoblo T.S., Rybalko I.N., Tihonov A.V., Maltsev T.V. (2019). Improving the wear resistance of hoeblades bymodify ingofrestoration coatings. Problems of Tribology. Vol. 94 (4). P. 27–31. https://doi.org/10.31891/2079-1372-2019-94-4-27-32.

12. Skoblo T.S., Nanka O.V., Saichuk O.V., Rybalko I.M., Markov O.V. (2021). Modification in the restoration of products by surfacing using detonation charge. Industry in focus. Kharkiv, №3 (99). P. 53–56.

13. Rybalko I.M., Tikhonov O.V., Gobysh V.S. (2022). Increasing the wear resistance of parts by introducing modifiers of clays of Ukrainian deposits into surfacing operations. Modern engineering of agro-industrial and food production: materials of the international scientific and practical conference. November 24-25, Kharkiv. P. 355–357.

14. Skoblo T.S., Tikhonov O.V., Rybalko I.M. (2019). Use of dispersed impurities of secondary raw materials in the restoration of machine parts. Industry in focus. Kharkiv. №12 (84). P. 55–57.

15. Skoblo T.S., Sidashenko A.I., Rybalko I.N., Markov A.V. (2017). Application of modifying additives for the restoration of machine parts. Design, production and operation of agricultural machinery. Kropyvnytskyi: CSTU. Vol. 47, part I. P. 229–240.

Дерябкіна Є.С.,
Клочко О.Ю.
Державний біотехнологічний університет,
м. Харків, Україна
E-mail:
216464g@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОМБІНОВАНОГО АРГОНОДУГОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ НА ЯКІСТЬ АНТИФРИКЦІЙНОГО ШАРУ

https://doi.org/10.37700/ts.2024.25.68-79

УДК 621.791.052

Клочко О.Ю., Дерябкіна Є.С. ***Дослідження впливу комбінованого аргонодугового наплавлення на якість антифрикційного шару***

Анотація. *Дана робота присвячена питанням отримання високоякісного покриття з алюмінієвої бронзи Бр АМц 9-2 на низьковуглецевій сталі дводуговим (комбінованим) аргонодуговим наплавленням вольфрамовим електродом, що не плавиться, а також вивченню властивостей цих покриттів, що визначають можливість їх застосування у якості матеріалів, що мають антифрикційні властивості, при виготовленні і відновленні деталей і вузлів тертя. Проведений аналіз показав, що більшість методів наплавлення не забезпечують можливість отримання високих антифрикційних властивостей бронзового покриття за один прохід. Доведено, що застосування комбінованого дводугового способу наплавлення, який дозволяє гнучко регулювати величину тепловкладання як в основний, так і в матеріал присадки, усуває основні проблеми отримання високоякісного бронзового покриття такі, як насамперед, тріщин на межі сплавлення «сталь-бронза», наявність яких знижує надійність антифрикційного шару. Зварювальні напруження і деформації в наплавленому шарі є одним з вирішальних факторів, що визначають якість і працездатність антифрикційного шару. Для обґрунтування вибору способу визначення залишкових напружень і деформацій у наплавленому шарі проаналізовані сучасні методи дослідження. Встановлено, всі існуючі методи визначення зварювальних напружень та деформацій використовують різні гіпотези, що спрощують реальні процеси пружнопластичного деформування під час наплавлення (зварювання). Для вимірювання залишкових напружень використований метод вимірювання деформацій напруженого стану збуреного отвором. Переміщення визначалися при вимірі лазерно-комп'ютерною інтерферометричною системою, яка реєструє інтерферометричні лінії рівня переміщень значних областей поверхні тіла в зоні збурювального впливу (місця застосування сили або зондуючої лунки). Це дозволяє візуально визначити головні напрямки тензорів деформацій та напружень, зробити якісні висновки про розподіл напружень. Проведені дослідження показали, що середній рівень залишкових напружень після повторної електродугової обробки знизився незначно, швидше відбувся їх перерозподіл. Дослідження антифрикційних властивостей і зносостійкості зміцнених деталей показали, що застосування даної технології виготовлення дозволяє зробити заміну литих поршнів на біметалічні.*

Ключові слова: *антифрикційний шар; тріщини; залишкові напруження; деформації; дводугове наплавлення; тепловкладання.*

Klochko O.Yu., Deryabkina E.S. ***Study of influence of combined argon-arc surfacing on quality of antifriction layer***

Abstract. *This work is devoted to the issues of obtaining a high-quality coating of aluminum bronze Br AMts 9-2 on low-carbon steel by double-arc (combined) argon-arc surfacing with a non-consumable tungsten electrode, as well as the study of the properties of these coatings, which determine the possibility of their use as materials with antifriction properties in the manufacture and restoration of friction parts and assemblies. The analysis showed that most surfacing methods do not provide the possibility of obtaining high antifriction properties of the bronze coating in one pass. It is proven that the use of a combined double-arc method of surfacing, which allows for flexible regulation of the amount of heat input into both the base and the additive material, eliminates the main problems of obtaining a high-quality bronze coating, such as, first of all, cracks at the "steel-bronze" fusion boundary, the presence of which reduces the reliability of the antifriction layer. Welding stresses and deformations in the surfacing layer are one of the decisive factors determining the quality and performance of the antifriction layer. To justify the choice of the method for determining residual stresses and deformations in the surfacing layer, modern research methods have been analyzed. It has been established that all existing methods for determining welding stresses and deformations use different hypotheses that simplify the real processes of elastoplastic deformation during surfacing (welding). To measure residual stresses, the method of measuring deformations of the stressed state disturbed by a hole was used. Displacements were determined by measuring with a laser-computer interferometric system that records interferometric lines of the displacement level of significant areas of the body surface in the zone of disturbing influence (the place of application of force or the probing hole). This allows us to visually determine the main directions of the strain and stress tensors, and to draw qualitative conclusions about the distribution of stresses. The conducted studies showed that the average level of residual stresses after repeated electric arc treatment decreased slightly, their redistribution occurred more quickly. Studies of the antifriction properties and wear resistance of hardened parts showed that the use of this manufacturing technology allows replacing cast pistons with bimetallic ones.*

Keywords: *antifriction layer, cracks, residual stresses, deformations, double-arc surfacing, heat input.*

Постановка проблеми

Підвищення якості та збільшення експлуатаційної надійності машинотракторного парку АПК поставило ряд завдань зі збільшення антифрикційних властивостей пар і вузлів тертя. Однією з основних задач, що стоять перед сучасним виробництвом є впровадження високоефективних методів зміцнення металів як при виготовленні нових машин так і при відновленні їх вузлів і деталей, що набули зношування в процесі експлуатації.

Основні проблеми отримання високоякісного бронзового покриття на низьковуглецевій сталі пов'язані з утворенням у процесі нанесення антифрикційного шару характерних дефектів, насамперед, тріщин на межі сплавлення, які суттєво знижують працездатність антифрикційного шару. Відомі способи нанесення антифрикційних покриттів не у всіх випадках забезпечують необхідну якість шару, що наплавляється і зони сплавлення, що обмежує термін їх експлуатації. Альтернативою традиційним є комбіноване аргонодугове наплавлення, яке дозволяє виготовляти біметалеві деталі з покриттям, яке наплавлене з одного або декількох металів, що характеризуються високими антифрикційними властивостями.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

В основі теорії тріщиноутворення лежить вивчення механізму міжкристалітного проникнення (МКП) бронзи у сталь. Сучасне уявлення з цього питання ґрунтується на працях Ілюшенка В.М., Подгаєцького В.В., Шоршорова М.Х., Ваінермана А.Є., Бондаренка А.М. та ін. Незважаючи на численні дослідження досі немає єдиного погляду на механізм МКП бронзи у сталь [1,2]. В даний час найбільш обґрунтовано механізм МКП пояснюється проявом ефекту Рейбіндера, який передбачає адсорбційне зниження міцності та пластичності за наявності значних деформацій (напружень, які розтягують) [3]. Таким чином, першорядну роль при утворенні мікротріщин відіграють температурні умови формування наплавленого шару, які визначаються тепло вкладенням. Тому при розробці технологічного процесу необхідно прагнути до мінімального тепло вкладення в основний метал [4, 5].

На підставі проведеного аналізу літературних джерел визначені можливі способи нанесення антифрикційного покриття. З аналізу переваг та недоліків аналізованих способів, а також результатів попередніх досліджень встановлено, що найбільш раціональним способом нанесення антифрикційного покриття є комбіноване аргонодугове наплавлення неплавким вольфрамовим електродом [6].

Основними труднощами розробки технології наплавлення алюмінієвої бронзи на сталь є вузький діапазон оптимальних значень ефективної теплової потужності джерела нагрівання та структурна неоднорідність металу перехідної зони З однієї сторони збільшення ефективної потужності призводить до збільшення глибини проплавлення в процесі наплавлення бронзи на сталь, що несприятливо впливає на властивості біметалічного з'єднання. З іншого боку підвищується розтікання бронзи по сталі, що сприяє одержанню якісного з'єднання. Отже, необхідний компроміс при виборі інтервалу зміни ефективної потужності дуги. Аналіз можливих схем нанесення алюмінієвої бронзи на сталь показав, що застосування дводугової схеми підключення на постійному струмі прямої полярності дозволяє гнучкіше підійти щодо визначення зміни інтервалу ефективною теплової потужності. Основна дуга збуджується між неплавким вольфрамовим електродом і присадним дротом, а допоміжна (низько амперна) - між тим же електродом і основним металом. У цьому випадку з'являється можливість регулювати процеси підігріву основного металу та плавлення присадного дроту за допомогою співвідношення ефективних потужностей двох дуг.

На основі аналізу виконаних досліджень по обґрунтуванню вибору способу отримання біметалевих виробів можна зробити висновок, що підвищення якості наплавлення антифрикційного шару визначається можливістю регулювання тепло вкладення в основний метал та присадний дріт. На підставі проведених досліджень пропонується як основне застосовувати комбінований аргонодуговий спосіб наплавлення на прямій полярності [6].

Формулювання мети досліджень

Підвищення якості наплавленого шару шляхом використання комбінованого аргонодугового способу наплавлення.

Результати досліджень

Виникнення деформацій і напружень обумовлено неперервним нагріванням зварюваних металів та його пластичним деформуванням при наплавленні, тому завдання визначення напружено-деформованого стану наплавлених шарів є завданням

термопластичності. Процес формування деформацій та напружень характеризується рядом особливостей:високою концентрацією нагріву; широким інтервалом зміни температури; зміною фізико-хімічних властивостей металу, що наплавляється; виникненням пластичних деформацій.

Характер напружень значною мірою визначається геометричними розмірами конструкції, що зварюється. Звідси випливає, що побудувати математичну модель, яка належним чином відображала б перелічені особливості напружень і деформацій, що виникають при наплавленні, і водночас дозволяла б довести розв'язання завдання у загальному випадку до конкретного кількісного результату можливо лише із залученням потужних обчислювальних засобів. Тому у ряді випадків досить скористатися наближеними методами розрахунку, так як точні рішення вимагають великих витрат часу та засобів для визначення таких напружень та деформацій, використовуються розрахункові схеми, в основі яких тією чи іншою мірою знаходиться ряд припущень.

У ряді наближених методів розрахункового визначення напружень і деформацій використано допущення про одновісність напружень [7]. До уваги беруть лише напруження σ_x, які діють у напрямку, паралельному вісі шару, що наплавляється. Інші напруження σ_y і σ_z вважаються досить малими.

Гіпотеза плоских перерізів передбачає відсутність зсуву, тобто $\gamma_{xy} = 0$. При укладанні шару перерізи можуть переміщатися, повертатися на деякий кут, але не можуть скривлятися.

Гіпотеза про одночасності укладання шару, що наплавляється, дозволяє не розглядати рух температурного поля вздовж осі Ох. Вважається, що теплоту при наплавленні вводять відразу по всій довжині шару, і надалі теплота поширюється тільки в напрямку Оу, а якщо йдеться про круговий шов, то тільки в осі Or.

Найбільш ранніми дослідженнями зварювальних напруг і деформацій були роботи Г. А. Миколаєва [8], в яких чітко представлений механізм утворення поздовжніх деформацій та напружень при наплавленні валика на край смуги та при зварюванні пластин у стик. У цьому методі прийняті такі припущення: є лише одновісні поздовжні напруження; поперечні перерізи плоскі; залежність межі плинності від температури схематизовано; матеріал ідеально пружно пластичний; модуль пружності Е та коефіцієнт α по всьому діапазоні температур прийняті постійними.

Рішення задачі зводиться до розгляду напружень і деформацій тільки у двох перерізах пластини: у перерізі, що відповідає найбільшій ширині ізотерми 1150^0С при квазістаціонарному температурному полі, та у перерізі після повного остигання пластини.

Власні деформації ($\varepsilon_{упр} + \varepsilon_{пл}$) визначаються як різниця спостережуваних $\varepsilon_н$, так і температурних ε_a деформацій:

$$\varepsilon_{упр} + \varepsilon_{пл} = \varepsilon_н - \varepsilon_a = \varepsilon_н - \alpha \Delta T \quad (1)$$

Розподіл пружних та пластичних деформацій розглядається не в двох, а в багатьох поперечних перерізах пластини на стадіях нагрівання та охолодження. У першому перерізі початкові р деформації дорівнюють нулю. Оскільки вважають, що до цього моменту пластичні деформації не відбувалися. У всіх наступних перерізах як так звана початкова деформація в рівнянні (1) враховують пластичні деформації, які були в попередній розрахунковій течії, тоді для перерізу з номером n :

$$\Delta\varepsilon_{пл}^{n} + \varepsilon_{упр}^{n} = \varepsilon_{н}^{n} - \varepsilon_{a}^{n} - \varepsilon_{пл}^{n-1}, \quad (2)$$

де $\Delta\varepsilon_{пл}^{n}$ – збільшення пластичних деформацій при переході від перерізу n-1 до n; $\varepsilon_{упр}^{n}$ – пружні деформації протягом n; $\varepsilon_{н}^{n}$ – спостерігаються деформації в перерізі n; ε_{a}^{n} – температурні деформації в перерізі n; $\varepsilon_{пл}^{n-1}$ – пластичні деформації у перерізі n -1.

Існує різновид даного методу, призначений для розрахунку деформацій і напружень у дуже широких пластинах, для яких при 2B $\to\infty$ можна прийняти $\varepsilon_n = 0$. Якщо потрібно визначити лише залишкові пластичні деформації, то для пластин немає необхідності послідовно розглядати n-у кількість перерізів для визначення часових деформацій. Досить визначити пружні та пластичні деформації для моменту часу $\Delta T=\Delta T_{max}$, коли пластичні деформації максимальні, а потім вирішити задачу для повного остигання, використовуючи пластичні деформації при $\Delta T=\Delta T_{max}$ як початкові пластичні.

Метод [9] відрізняється від попереднього тим, що в ньому замість діаграми ідеально пластичного тіла використовують діаграму залежності зі зміцненням, отримані за різних температур. Гіпотези про одновісність напружень і плоских перерізів зберігаються. Так само розглядають ряд поперечних перерізів на стадії нагрівання та остигання пластини. Для визначення пружних та пластичних деформацій у кожному випадку використовується рівняння (2) та метод послідовних наближень для визначення правильного значення. Розподіл власних деформацій на пружні та пластичні проводять з використанням дійсних діаграм та з урахуванням залежності модуля пружності E від температури. Невизначеним у цьому методі є визначення напружень на стадії високотемпературної деформації. Передбачається, що виникає таке ж зміцнення металу, як і зміцнення від деформацій за більш низьких температур. При такому допущенні метал повинен послідовно проходити через стан, що характеризується точками 1-4 рис.1, хоча фактична поведінка металу буде іншою. Воно може бути визначене шляхом одержання термодеформограми.

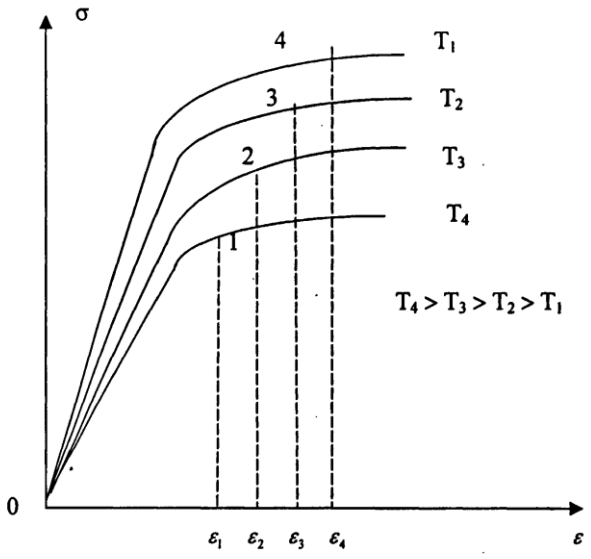


Рис. 1. Визначення напружень в стрижні, метал якого зміцнюється при пластичній деформації при зміні температури.

Порівняння результатів розрахунку за різними графо розрахунковими методами між собою, а так само з результатами, отриманими експериментально або точними методами, показують наступне: графоаналітичні методи призначені переважно для визначення поздовжніх залишкових деформацій напружень в протяжних елементах

типу довгих пластин чи балок. Ці методи не призначені для визначення поперечних деформацій.

Значне місце у дослідженні напружень та деформацій при наплавленні у тонкостінних оболонках належить пружним рішенням. Вони є першим наближенням точного пружно пластичного рішення. В основі методу «пружних рішень» лежать дослідження академіка А.А. Іллюшина. Пружне рішення в деформаціях і переміщеннях нерідко виявляється достатнім для визначення переміщень при наплавленні. Пружне рішення, знайдене у випадку остигання нерівномірно нагрітого тіла, коли початковий стан тіла перед остиганням можна розглядати як не напружений, дає якісну картину розподілу залишкових напружень, у деяких випадках достатню для правильних суджень про характер поля напружень. Пружні рішення, звичайно, не дають абсолютно повного і правильного відображення картини розподілу напружень і деформацій при наплавленні, якщо насправді протікають пластичні деформації. Ступінь неточності у кожному даному випадку різна. Але вона допустима на вирішення низки практичних завдань [9].

У основі методу Г.Б. Таліпова [10] лежить припущення, що «кожен метал різко втрачає свою здатність спрямовуватися пластичним деформаціям у визначеному для нього досить вузькому інтервалі температур». Вважається, що це відбувається при певній середній температурі в цьому інтервалі $T_к$. Тобто. $\sigma_1=0$, при температурах $T \geq T_к$. Межі зони, де метал нагрівся до T=Тк, визначається по розрахунку температурного поля від джерела теплоти, що рухається, при обраному способі зварювання.

Друге припущення полягає в тому, що розрахунок проводиться для стадії остигання, а процеси утворення деформацій та напруг на стадії нагріву не розглядається. Процеси перерозподілу теплоти та зміни температур у цей період не враховуються; вважається, що області, в яких температура нижче $T_к$ мають постійно початкову нормальну температуру T_0 і перед початком остигання вільні від будь-яких напружень. Таким чином, причиною утворення залишкових напружень і деформацій є температурне скорочення зони, де температура вища за $T_к$. Температурне скорочення цієї зони приймається рівною $\alpha(T_к - T_o)$.

Автором даного методу [11] пропонується також інший підхід, який полягає в наступному. Вважається, що зазначена зона придбала початкові пластичні деформації укорочення $\alpha(T_к - T_o)$ у тих напрямках, де при нагріванні було стиснено температурне розширення. Отже, по межах цієї зони і до інших частин тіла потрібно докласти сили q протилежного знака, щоб ліквідувати наявні зазори між розглянутими зонами. Деформації і напруження, що утворюються при цьому вважаються залишковими.

Відмінність двох аналізованих підходів, по суті, полягає лише в тому, що в першому випадку відбувається рівномірне скорочення металу зони у всіх напрямках, у той час як у другому випадку скорочення може бути лише у напрямках, якими було стискання при нагріванні. Для отримання більш точної збіжності експериментальних та теоретично розрахованих результатів автор пропонує наступне: ввести зміцнення металу, а не приймати його ідеальним пружно пластичним; збільшити розміри аналізованої температурної зони, де протікали пластичні деформації, межі ізотерми $T = T_к$.

На підставі вищевикладеного, всі існуючі методи визначення зварювальних напружень та деформацій використовують різні гіпотези, що спрощують реальні процеси пружно пластичного деформування під час зварювання. В даний час не існує єдиної методики визначення зварювальних напружень, а є наявні приватні методики, призначені для вирішення певного кола інженерних завдань.

Існуючі нині методи визначення залишкових напружень поділяються на фізичні та механічні. Фізичні методи (магнітопружний, ультразвуковий, рентгенівський), на

відміну від механічних, не пов'язані з обов'язковим руйнуванням металу для визначення залишкової напруги. Однак відносно слабка вивченість фізичних методів стосовно особливостей вимірювання залишкових напружень у наплавлених шарах обмежує можливості їх застосування. Це пов'язано тим, що зварювання металів супроводжується як пружно пластичними деформаціями, а й різними фізико-хімічними процесами у шві і біляшовній зоні, що зумовлюють залишкову неоднорідність властивостей зварних сполук.

Фізичні методи засновані на вивченні та визначенні властивостей металу, що залежать від залишків напружень. Якщо ж зміна властивостей металу у шві та навколошовній зоні викликана сукупним впливом фізико-хімічних процесів при наплавленні (зварюванні) та залишкових напружень, то результати вимірювань фізичними методами не завжди однозначно характеризують залишкові напруження.

Механічні методи засновані на принципі пружного розвантаження об'єму металу при його звільненні від залишкових напружень шляхом розвантаження. Вимірювання деформацій, що характеризують залишкові напруження, проводять електричними тензометрами або механічними деформометрами. У деяких випадках використовуються фото пружні датчики оптично активного матеріалу.

На відміну фізичних методів визначення залишкових напружень механічні методи дозволяють проводити експерименти на металі незалежно від неоднорідності їх фізико-хімічних властивостей, тобто є універсальним способом. Однак, у зв'язку з необхідністю розвантаження обсягу металу від дії залишкового напруження, метод вимагає або повного, або часткового руйнування об'єкта дослідження.

Для вимірювання залишкових напружень в даний час широко використовується метод вимірювання деформацій напруженого стану збурених отвором[9]. Найбільш поширений спосіб виміру деформацій - тензометрія. Для перерахунку виміряних деформацій в залишкові напруження, що існували в точці до висвердлювання, потрібно знати спеціальні тарірувальні коефіцієнти або знати рішення задачі про збурені напружено-деформаційні стани для відповідних деформацій в зоні отворів при одиничних залишкових напруженнях. Такі рішення одержані методом кінцевих елементів [11]. Ці рішення використовувалися для визначення переміщення збуреного стану при вимірі системами Limon.

Лазерно-комп'ютерна інтерферометрична система Limon TV призначена для дослідження напружено-деформованого стану пружних тіл та конструкцій. У ній реалізовані ідеї та методи, що базуються на голографічній інтерференції, розроблені раніше для аналізу залишкових напружень. За допомогою цього приладу забезпечується візуальна реєстрація полів малих пружних переміщень поверхні пружного тіла, а також розвитку процесу деформації по системі інтерференційних смуг та її змін.

На відміну від тензометрирування, де виміри виконуються для окремих точок, дана система реєструє інтерферометричні лінії рівня переміщень значних областей поверхні тіла в околиці збурювального впливу (місця докладання сили або лунки, що зондує). Це дозволяє візуально визначити головні напрямки тензорів деформацій та напружень і зробити якісні висновки про розподіл напружень ще до підрахунку числових значень відповідних величин.

До складу вимірювального комплексу входять: блок інтерферометра, разом з опорно-юстувальним пристроєм, комп'ютерний блок, блоки живлення відеокамери та лазери. Блок інтерферометра складається з опорно-юстирувальної конструкції та корпусу, в якому монтується напівпроводниковий лазер з довжиною хвилі 640 нм і потужністю випромінювання 10 мВт, технічна відеокамера з чутливістю (0,1 люкс) та роздільною здатністю 570 на 400 телевізійних ліній та інші елементи направляючі

дзеркала, коліматор, напівпрозоре дзеркало, що ділить і дифузна - пластина, що розсіює, які формують опорний і предметний світлові пучки. Оптична схема блоку інтерферометра наведена на рис. 2.

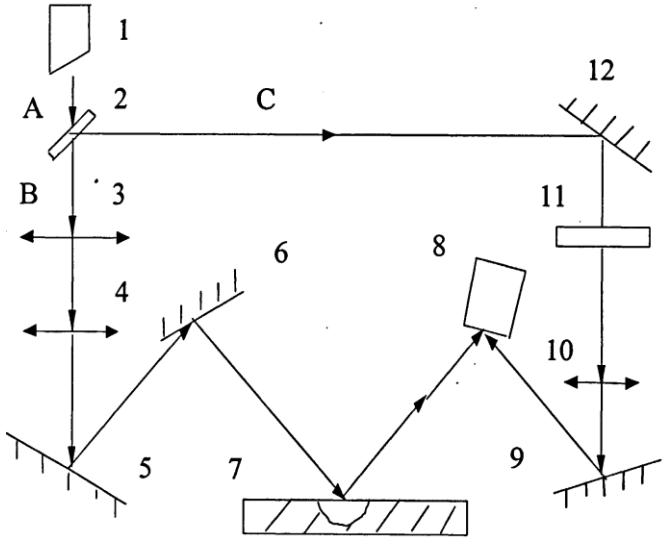


Рис. 2. Оптична схема: 1 – генератор; 2 – розділювач; 3, 10 – лінзи; 4 – коліматор; 5, 6, 9, 12 – дзеркала; 7 – досліджуваний об'єкт; 8 – відеокамера; 11 – фільтр.

Промінь світла розщеплюється на об'єктовий (В) та опорний (С) промені. Відбивши від поверхні зразка, промінь (В) потрапляє на відеокамеру (8), на яку потрапляє і промінь (С). Таким чином, здійснюється перша експозиція. Після висвердлювання отвору в заданій точці виконується друга експозиція. Далі одночасно відновлюються обидва написані зображення поверхні, які інтерферують, дають ізолінії переміщень, що свідчать про величину і характер напруженого стану.

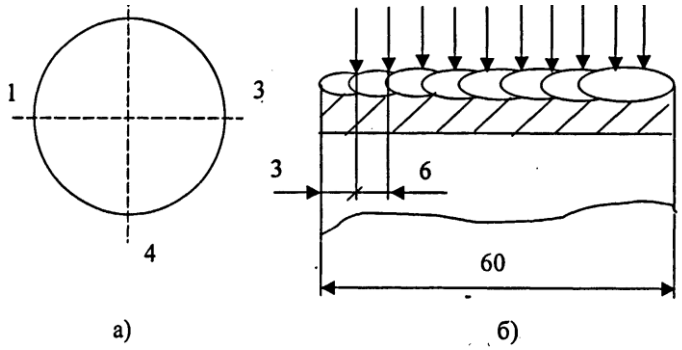
Для обробки записаних відео зображень з метою отримання первинної різниці інтерферограми та поліпшення її контрастності використовується спеціально розроблена програма LIMON-EXPRESS, яка застосовується також для розрахунку залишкових напружень.

При отриманні голографічних інтерферограм, що характеризують переміщення поверхні зразка від висвердлювання отвору, свердління не повинно вносити спотворень, пов'язаних із переміщенням всього зразка як цілого. У цьому важливо визначити раціональне закріплення зразка на стенді голографічної установки. Глибина отвору впливає на результати вимірювань. При визначенні залишкових напружень у поверхневому шарі просторових конструкцій глибина отвору не повинна перевищувати 1,5...2 його діаметра.

Важливе значення має якість висвердлювання отвору: він повинен мати гладкі кромки, які утворюють, має бути перпендикулярна до досліджуваному ділянці поверхні. Отвори виконуються електроіскровим способом або свердлінням спеціально заточеними свердлами. Електроіскровий спосіб мало придатний для об'єктів складної форми та великих розмірів. Діаметр отвору вимірюється мікроскопом. Інформація про залишкові напруження видається у вигляді голографічної інтерферограми.

Дослідження, викладеним вище методом, проводилися на зразках з низьковуглецевої сталі Ст3, діаметром 110 мм і товщиною стінки 4мм, наплавлених на базовому режимі і після повторної електродугової обробки. Для визначення окружних залишкових напружень у наплавленому шарі та після електродугової обробки.

вимірювання проводилися згідно зі схемою проведення вимірів, представленою на рис. 3.



а) - розташування досліджуваних перерізів на зразку; б) - точки виміру в поперечному перерізі наплавленого шару.

Рис. 3. Схема виміру залишкових напружень у наплавленому шарі.

Результати експериментальних даних подано на рис. 4.

Для оцінки антифрикційних властивостей та зносостійкості наплавленого шару алюмінієвої бронзи Бр Амц 9-2 діаметром 2 мм на низьковуглецеву сталь комбінованим аргонодуговим способом було зроблено наплавлення робочої поверхні на наступних параметрах режиму: $I_{зв}$=130А; $I_{пр.\ п.}$= 60А; U=18В; $V_н$ = 0,34 м/хв; $V_{пр.п.}$=0,36 м/хв; $Q_{з.г.}$= 6 л/хв. Відомо, що при використанні алюмінієвої бронзи зносостійкість наплавленого металу і сталевого контртіла, що сполучається, залежить від вмісту заліза, марганцю і алюмінію в бронзі. При цьому з підвищенням вмісту заліза зростає знос пари тертя.

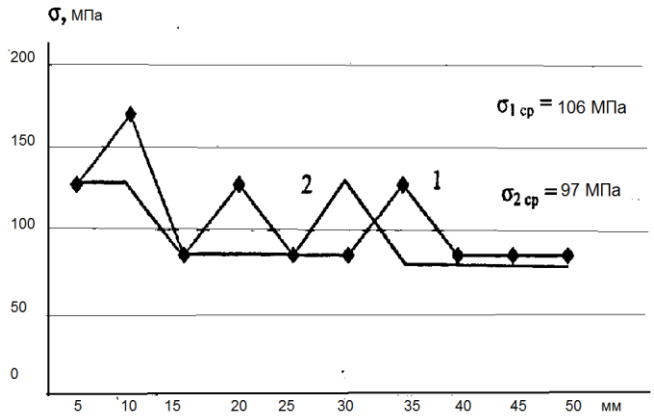


Рис. 4. Результати експериментального визначення окружних залишкових напружень у наплавленому шарі (1) та після електродугової обробки (2).

При комбінованому аргонодуговому наплавленні вміст заліза не перевищує 3%, що сприятливо позначається на стабільності результатів зносу пар тертя.

Випробування на тертя і знос проводилися на машині із замкнутим кінематичним контуром Фірми «Амслер» під схемою тертя ковзання часткового вкладиша про ролик, що обертається. Контртіло виготовлялося зі сталі 08Х10Н20Т2 (ДСТ 5632). Перед кожним випробуванням робочу поверхню вкладиша притирали до ролика до повного прилягання поверхонь, що труться, яке фіксували по моменту тертя, що встановився, або візуально. Притирання вкладиша здійснювалося з використанням пасти гої або мастило АМС-3 поперечним обертанням ролика та горизонтальним його переміщенням. При остаточному притиранні використовували мастило АМС-3. Потім зразки промивали та зважували на аналітичних вагах.

Випробування проводилися при швидкості обертання ролика 200 об/хв, та питомих тисках прикладених до вкладиша Р=1,34;1,96 та 2,94 МПа. Антифрикційні властивості оцінювали величинами коефіцієнта тертя та зносу, який визначався щодо зміни маси зразків шляхом зважування їх на аналітичних терезах з точністю до ± 0,1 мг. Коефіцієнт тертя обчислювався за формулою:

$$f = \frac{T}{p\pi DN}, \tag{3}$$

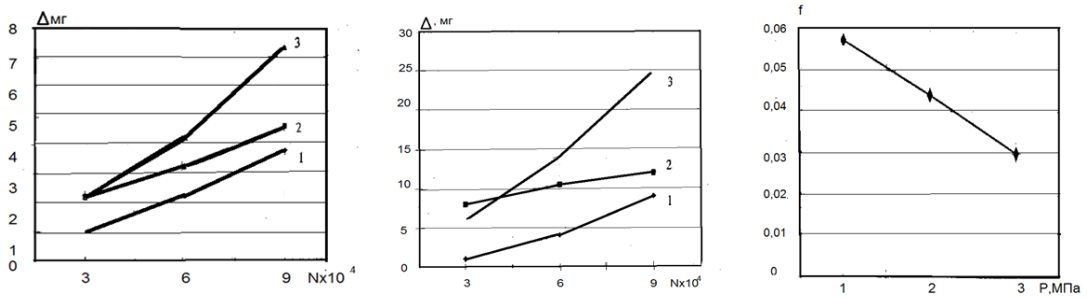
де Т – робота тертя під час випробувань; р – навантаження, що відповідає питомому тиску на вкладиш; N – число обертів ролика; D – діаметр ролика.

Робота тертя дорівнює

$$T = n_1 F_{пр} \tag{4}$$

де n_1 – різниця показань числа обертів по інтегратору між закінченням кожного циклу випробувань пари тертя і початком відліку; $F_{пр}$ – граничний момент тертя, рівний для даної машини 15000 Нм.

Коефіцієнт тертя при випробуванні трьох зразків та середні величини зносу представлені на рис.5. За результатами випробувань встановлено відсутність відхилень від заданих (вихідних) розмірів поверхонь, що труться. Характер підробітку наплавленої поверхні (задирки, подряпини) відповідає характеру приробітку литого поршня.



а) б) в)

Рис. 5. Залежність зносу ролика (а) та вкладиша (б) від числа циклів та питомого тиску: 1-Р=1,34 МПа; 2-Р=1,98 МПа; 3-Р=2,94 МПа; в - залежність коефіцієнта тертя наплавленої алюмінієвої бронзи Бр Амц 9-2 від питомого тиску.

Металографічні дослідження натурних вкладишів після випробувань не виявили зміни у структурі бронзи у зоні контакту.

Для підвищення якості антифрикційних наплавлених шарів рекомендується:

1. Для зниження ймовірності тріщино утворення на межі сплаву «бронза – сталь» слід застосовувати комбінований аргонодуговий спосіб наплавлення, що дозволяє регулювати тепло вкладання в основний метал і присадний дріт.

2. Для перерозподілу залишкових напружень у наплавленому шарі проводити повторну електродугову обробку без присадного дроту на наступних параметрах режиму: I = 60 А; U = 18; V = 0,34 м/хв. Для мінімального тепло вкладання в основний метал слід розташовувати дугу під кутом від 15 до 40°.

3. Для вирішення конкретних практичних завдань застосовувати наближені методи визначення зварювальних напружень та деформацій: графоаналітичні і методи, які використовують апарат теорії пружності і пластичності (ф.1 і 2). Зробити якісні висновки про розподіл напружень до підрахунку числових значень застосуванням інтерференційних вимірів.

Висновки

1. Застосування комбінованого аргонодугового способу наплавлення алюмінієвої бронзи на низьковуглецеву сталь дозволяє гнучко регулювати тепло вкладання в основний метал та присадний дріт, що підвищує якість антифрикційного шару.

2. Результати проведених досліджень показали, що середній рівень залишкових напружень після повторної електродугової обробки знизився незначно, швидше відбувся їх перерозподіл, тобто повторна обробка наплавленого шару не вносить значних змін в напружено-деформаційний стан.

3. Дослідження антифрикційних властивостей і зносостійкості біметалічного поршня, проведені на машині з замкнутим кінематичним контуром за схемою тертя ковзання часткового вкладиша про обертовий ролик показали, що застосування даної технології виготовлення дозволяє зробити заміну литих поршнів на біметалічні, таким чином знизити собівартість їх виготовлення.

Список використаних джерел

1. Рябцев И.А., Сенченков И.К. Теория и практика наплавочных работ. Киев. Екотехнологія. 2013. 197 с.

2. Илюшенко В.М., Лукьянченко Е.П. Сварка и наплавка меди и сплавов на ее основе. Киев. Международная ассоциация Сварка. 2013. 396 с.

3. Лобанов Л.М., Пащин М.О., Миходуй О.Л., Гринюк А.А., Ілляшенко Є.В., Гончаров П.В., Савицький В.В., Сидоренко Ю.М., Устименко П.Р. Розрахункова оцінка напружено-деформованих станів зварних з'єднань із алюмінієвого сплаву АМг61 під дією електродинамічної обробки металу шва в процесі зварювання плавленням. Автоматичне зварювання. 2022. №7. С. 3–8.

4. Касаткин Б.С., Прохоренко В.М., Чертов И.М. Напряжения и деформации при сварке. Киев. Вища школа. 1997. 236 с.

5. Вайнерман А.Е., Чумакова И.В., Беляев Н.В, Минчина А.Н. Некоторые критерии оценки склонности медных сплавов к трещинообразованию при сварке. Сварочное производство. 2003. № 11. С. 6-7.

6. Шаламов В.О., Колісниченко Д.С., Дерябкіна Є.С. Підвищення якості антифрикційного покриття комбінованим аргонодуговим наплавленням. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції. Молодь і технічний прогрес в АПВ. 2024. С. 401–403.

7. Hui Huang, Ninshu Ma.Welding deformation and residual stresses in arc welded lap joints by modified iterative analysis. Science and Technology of Welding & Joining. 2015. No 20 (7). P. 571–577.

8. Weill-Couly P. Welding aluminium bronze castings. Welding casting. 2007. No 6. P. 253–266.

9. Вайнерман А.Е., Костров Е.Н., Прилуков В.Н. Усталостная прочность плоских стальных образцов, наплавленных сплавами на медной основе. Сварочное производство. 1998. №4. С. 6–9.

10. Аснис Е.А., Прохоренко В.М., Швиндлерман Л.С. О механизме образования трещин при сварке и наплавке меди на сталь. Сварочное производство. 1985. №11. С. 8–9.

11. Гопкало А.П., Клипачевский В.В. Влияние наплавки на напряженно-деформированное состояние роликов машин непрерывного литья заготовок. Автоматическая сварка. 2015. № 5-6. С. 148–152.

References

1. Ryabtsev I.A., Senchenkov I.K. (2013). Theory and practice of floating works. Kyiv. Ecotechnology. 197 p.

2. Ilyushenko V.M., Lukyanchenko E.P. (2013). Welding and surfacing of copper and alloys on its basis. Kyiv. International Welding Association. 396 p.

3. Lobanov L.M., Pashchin M.O., Mikhoduy O.L., Hryniuk A.A., Ilyashenko E.V., Goncharov P.V., Savitsky V.V., Sydorenko Yu.M., Ustymenko P.R. (2022). Computational assessment of stress-strain states of welded joints made of aluminum alloy AMg61 under the action of electrodynamic treatment of weld metal in the process of fusion welding. Automatic welding. №7. P. 3–8.

4. Kasatkin B.S., Prokhorenko V.M., Chertov I.M. (1997). Tensions and deformations in welding. Kyiv. Higher school. 236 p.

5. Vaynerman A.E., Chumakova I.V., Belyaev N.V., Minchina A.N. (2003). Some criteria for assessing the inclination of copper alloys to cracking in welding. Welding Production. № 11. P. 6–7.

6. Shalamov V.O., Kolisnichenko D.S., Deryabkina E.S. (2024). Improving the quality of antifriction coating by combined argon arc surfacing Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Youth and technical progress in APV. P. 401–403.

7. Hui Huang, Ninshu Ma. (2015). Welding deformation and residual stresses in arc welded lap joints by modified iterative analysis. Science and Technology of Welding & Joining. No 20 (7). P. 571–577.

8. Weill-Couly P. (2007). Welding aluminium bronze castings. Welding Casting. No 6. P. 253–266.

9. Vaynerman A.E., Kostrov E.N., Prilukov V.N. (1998). Fatigue strength of flat steel samples welded by alloys on a copper base. Welding Production. №4. P. 6–9.

10. Asnis E.A., Prokhorenko V.M., Shvindlerman L.S. (1985). On the mechanism of crack formation in welding and surfacing copper on steel. Welding Production. №11. P. 8–9.

11. Gopkalo A.P., Klipachevsky V.V. (2015). Effect of surfacing on the stress-deformed state of rollers of continuous casting of billets. Automatic welding. № 5-6. P. 148–152.

Тришевский О.І.,
Атухов А.К.,
Абдула А.Г.
Державний
біотехнологічний
університет,
м. Харків, Україна
E-mail:
3shev@ukr.net

ВИЗНАЧННЯ РАДІУСІВ ЗГИНАННЯ НА ОСНОВІ ДОСЛДЖЕННЯ ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ В МІСЦЯХ ФОРМУВАННЯ РАДІУСІВ ГНУТИХ ПРОФІЛІВ

https://doi.org/10.37700/ts.2024.25.80-90

УДК 621.891

Тришевський О.І., Автухов А.К., Абдула А.Г. ***Визначення радіусів згинання на основі дослідження деформованого стану в місцях формування радіусів згинання гнутих профілів***

Анотація. *В роботі на основі загального виразу для визначення полярного радіуса r довільної матеріальної точки за чистого вигину у полярній системі координат, та користуючись основними положеннями механіки твердого деформованого середовища визначали залежності, що описують компоненти тензора деформацій в її осередку. Обчислені компоненти тензора деформацій металу під час профілювання швелера 150 × 100 × 2 мм для точок, що перебувають на перетині осі симетрії місця вигину і граничних поверхонь полоси. Встановлено, що у першому наближенні можна вважати, що деформований стан місця вигину під час профілювання визначається тангенціальною і радіальною деформаціями, а інші компоненти дорівнюють нулю.*

Ключові слова: *вигнутий профіль, рівнополочний канал, деформований стан, полярна система координат, механіка суцільного деформівного середовища, мінімальний радіус згину.*

Trishevskiy O.I., Avtuhov A.K., Abdula A.G. ***Determination of bending radii based on study of deformed state in places of formation of bending radii of bent proofiles***

Abstract. *In this work, on the basis of the general expression for determining the polar radius r of an arbitrary material point under pure bending in the polar coordinate system, and using the basic provisions of the mechanics of a solid deformable medium, we determined the dependencies describing the components of the strain tensor in its cell. The components of the metal deformation tensor during profiling of a channel 150 × 100 × 2 mm were calculated for points located at the intersection of the axis of symmetry of the bending point and the boundary surfaces of the strip. It is established that, as a first approximation, it can be assumed that the deformed state of the bend during profiling is determined by the tangential and radial deformations, and the other components are equal to zero.*

Keywords: *curved profile, equal-shelf channel, deformed state, polar coordinate system, mechanics of a continuous deformable medium, minimum bending radius.*

Постановка проблеми

Незважаючи на значну кількість виконуваних теоретичних, експериментальних і виробничих досліджень процесів профілювання гнутих профілів, багато питань потребують нових, додаткових досліджень, спрямованих на вдосконалення технології, підвищення якості продукції, зниження її собівартості і, як наслідок, підвищення її конкурентоспроможності на світових ринках [1]. Одним з найважливіших питань удосконалення технології виробництва та підвищення якості гнутих профілів є правильне визначення мінімально можливих радіусів згинання, що забезпечить виготовлення профілів без тріщин в містах найбільшої деформації, тобто зі зниженою кількістю бракованої продукції, що зменшує її собівартість. Для ефективного розв'язування цих питань потрібно виконати детальний теоретичний аналіз деформованого стану місць згинання профілів, чому і призначена дана робота.

Зараз найпоширенішим методом розв'язування теоретичних задач під час дослідження процесів оброблення металів тиском є чисельний метод розв'язування диференціальних рівнянь із частинними похідними, а також інтегральних рівнянь, які виникають під час рішення задач прикладної фізики, що дістав назву методу скінченних елементів (МСЕ) [2] Однак для застосування цього методу потрібні спеціальні комп'ютерні програми, а також певні витрати машинного часу і часу користувача, що не завжди зручно в промислових умовах, коли потрібно швидко і точно визначити за скінченними формулами, або побудованими за ними номограмами значення шуканих технологічних параметрів.

Тому для виконання передбачених у роботі теоретичних досліджень було прийнято основні положення теорії пластичності [3].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Як показують численні теоретичні та експериментальні дослідження процесів пластичного згину металу у валках [1, 4], максимальні напруження та деформації виникають в містах згинання гнутих профілів, тобто на ділянках радіусів міст згину, де відбувається активний перерозподіл напружень та деформацій по товщині перерізу металу.

Огляд літературних джерел [3, 4] дозволяє зробити висновок, що формозміна місць вигину під час безперервного профілювання являє собою процес поступового пластичного вигину полоси, що супроводжується побічними явищами. Основне з них - потоншення, яке суттєво впливає на параметри напружено-деформованого стану металу. У літературі це явище досліджено недостатньо.

Виконаний аналіз стану питань, що стосуються вдосконалення технологій профілювання та підвищення якості гнутих профілів показав, що :

– одним із найпоширеніших видів непереборного браку, що виникає у процесі формоутворення гнутих профілів у валках профілезгинальних станів є утворення тріщин у місцях формування (на радіусах заокруглень профілів) [5];

– у процесі створення конструкцій нових гнутих профілів і розроблення технологій їхнього профілювання стикаються дві тенденції, які суперечать одна одній: з одного боку, прагнення одержати профіль із мінімальними радіусами заокруглень у місцях вигину (бо це сприяє отриманню профілю з найкращими геометричними характеристиками перерізу, а отже, і максимальною жорсткістю й опорною здатністю), і при цьому технологічно забезпечити одержання профілю за мінімальну кількість переходів (бо при цьому забезпечується мінімальна собівартість продукції). З іншого

боку, зазначені вище конструкторські та технологічні вимоги сприяють значній інтенсифікації процесів профілювання, що найчастіше суперечить технологічним можливостям процесів профілювання та механічним властивостям матеріалу, що профілюється (передусім показникам пластичності – межі плинності $\sigma_т$, відносного подовження $\delta_{5\text{-}10}$%, відносного поперечного звуження ψ, %) [5];

– визначення граничних (мінімально допустимих) радіусів формоутворення ділянок місць вигину можливе тільки на основі теоретичного дослідження деформованого стану металу на ділянках його вигину з урахуванням його реальних механічних властивостей [6];

– виконаний аналіз літературних джерел з цих питань показав, що за наявності значної кількості публікацій з теоретичних досліджень деформованого стану місць вигину гнутих профілів вони спрямовані на вивчення питань, не пов'язаних із визначенням гранично малих радіусів вигину під час профілювання.

Формулювання мети досліджень

На підставі викладеного сформульовано мету проведення досліджень роботи. Це підвищення якості та зниження браку сортових гнутих профілів на основі дослідження деформованого стану металу в місцях радіусів заокруглень і підготовка рекомендацій щодо визначення мінімально допустимих радіусів вигину.

Результати досліджень

Сучасна теорія пластичності (ТП) являє собою одну з безлічі теорій механіки деформованого твердого тіла (МДТТ) і механіки суцільних середовищ (МСС) [3]. Вона має велике самостійне значення, особливо – для моделювання технологічних процесів переробки матеріалів.

Відносно фізики твердого тіла пластичну деформацію визначають як процес руху дефектів кристалічної решітки, що здійснюється зі швидкостями, які перевищують швидкості зміни зовнішніх умов. Інакше кажучи, якщо після виведення з положення рівноваги дефектів (завдяки зовнішнім впливам) час переходу в нове рівноважне положення (час релаксації) істотно менший за характерний час зміни зовнішніх впливів, то непружну макродеформацію, яка реалізується при цьому, можна розглядати як пластичну. Це цілком відповідає умовам формування гнутих профілів у валках профілезгинальних станів.

Для правильного врахування під час теоретичного аналізу деформованого стану місць вигину гнутих профілів, що формуються у валках, було зроблено такі вихідні положення та припущення, які досить добре узгоджуються з результатами експериментальних досліджень: 1) при формоутворенні гнутих профілів справедливою є гіпотеза плоских перерізів, нормальних до осі профілювання; 2) довжина нейтрального шару деформацій місця вигину bi постійна; 3) зміна потоншення на радіусах вигину описується емпіричною залежністю, описаною в роботі [4]; 4) переміщення матеріальних частинок полоси в радіальному напрямку підпорядковується тим самим закономірностям, що й у разі чистого вигину.

Оскільки під час розгляду деформованого стану місць вигину гнутих профілів відношення між точками простіше зобразити у вигляді радіусів і кутів, для теоретичного аналізу було обрано полярну систему координат, у якій кожна точка на площині визначається двома числами - полярним кутом і полярним радіусом (рис. 1).

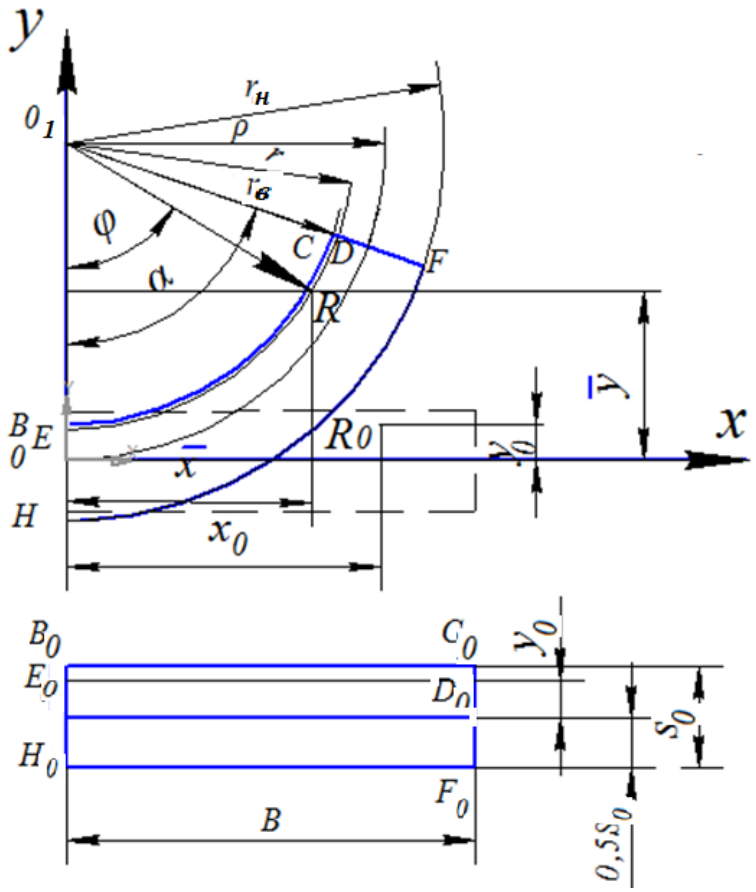


Рис. 1. Схема для визначення координат довільної матеріальної точки полоси в деформованому стані у полярній системі координат

Згідно з прийнятими гіпотезами, на ділянці плавного переходу в n-й формувальній клітині полярний радіус r_n довільної матеріальної точки залежить від трьох початкових координат, а товщина s_n – від двох.

З очевидних геометричних співвідношень маємо:

$$\begin{aligned} r_н(x_0,z_{0c}) &= r_c(x_0,z_{0c}) + 0{,}5s_n(x_0,z_{0c}); \\ r_в(x_0,z_{0c}) &= r_c(x_0,z_{0c}) - 0{,}5s_n(x_0,z_{0c}), \end{aligned} \tag{1}$$

де r_c – полярний радіус серединної поверхні.

Відомо визначення полярного радіуса r довільної матеріальної точки за чистого вигину [4]:

$$r^2 = 0{,}5(r_в^2 + r_н^2) - \frac{y_0}{s_0}(r_н^2 - r_в^2), \tag{2}$$

де r – поточний полярний радіус довільної матеріальної точки;

$r_н$, $r_в$ – полярні радіуси зовнішньої та внутрішньої поверхонь полоси;

y_0 – початкова ордината точки, що розглядається;

s_0 – початкова товщина полоси.

Підставляючи (1) у (2), отримаємо:

$$\begin{aligned} &[r_n(x_0,y_0,z_{0c})]^2 = [r_c(x_0,z_{0c})]^2 + \\ &+\frac{1}{4}[s_n(x_0,z_{0c})]^2 - 2y_0, r_c(x_0,z_{0c})\frac{s_n(x_0,z_{0c})}{s_0}. \end{aligned} \tag{3}$$

З геометричних міркувань (рис. 1), отримаємо:

$$\begin{aligned} \bar{x} &= r_n(x_0,y_0,z_{0c})\sin\varphi_n(x_0,z_{0c}); \\ \bar{y} &= \rho_n(z_{0c}) - r_n(x_0,y_0,z_{0c})\cos\varphi_n(x_0,z_{0c}) \\ \bar{z} &= z_{0c} \end{aligned} \tag{4}$$

$$\rho_n(z_{0c}) = \frac{b_н}{\alpha_n(z_{oc})} \quad (5)$$

$$\varphi_n(x_0, z_{0c}) = \frac{x_o}{\rho_n(z_{oc})} = \frac{x_o}{b_н}\alpha_n(z_{0c}). \quad (6)$$

Як відомо з механіки твердого деформованого середовища [3], компоненти тензора деформацій визначаються наступними залежностями:

$$e_{k,l} = \frac{1}{2}\ln\sum_{m=1}^{m=3}\frac{\partial\overline{x_m}}{\partial x_{ok}} \times \frac{\partial\overline{x_m}}{\partial x_{ol}}; \quad k, l = r, \varphi, z. \quad (7)$$

Вносячи (4) у (7) і враховуючи при цьому (3), (5), (6), отримаємо:

$$e_{\varphi\varphi} = \frac{1}{2}\ln\left\{\left[\frac{r_n(x_o,\ y_0,\ z_{oc})(x_o,\ y_0,\ z_{oc})}{\rho_n(z_{oc})}\right]^2 + \left(\frac{\partial r_n}{\partial x_0}\right)^2\right\};$$

$$e_{rr} = \ln\frac{r_c(x_o,z_{oc})}{r_n(x_o,\ y_o,\ z_{oc})} \times \frac{S_n(x_o,z_{oc})}{S_o} e_{zz} = \frac{1}{2}\{[P_1(x_o,\ y_0,\ z_{oc})]^2 + [P_2(x_o,\ y_0,\ z_{oc})]^2\}; \quad (8)$$

$$e_{\varphi z} = \frac{1}{2}\left[\frac{r_n(x_o,\ y_o,\ z_{oc})}{\rho_n(z_{oc})}P_1(x_o,\ y_0,\ z_{oc}) + \right.$$

$$\left. + \frac{\partial r_n}{\partial x_0}P_2(x_o,\ y_0,\ z_{oc})\right];$$

$$e_{zr} = -\frac{1}{2}\frac{r_c(x_o,z_{oc})}{r_n(x_o,\ y_o,z_{oc})} \times \frac{s_n(x_o,z_{oc})}{s_o}P_2(x_o,\ y_0,z_{oc});$$

$$e_{r\varphi} = -\frac{1}{2}\frac{r_c(x_o,z_{oc})}{r_n\ (x_o,\ y_o,\ z_{oc})} \times \frac{s_n\ (x_o,z_{oc})}{s_o}\frac{\partial r_n}{\partial x_o}. \quad (8a)$$

$$P_1(x_o,y_0,z_{oc}) = \frac{\alpha_n'(z_{oc})}{\alpha_n(z_{oc})}[r_n(x_o,y_0,z_{oc}) \times$$

$$\times \varphi_n(x_o,z_{oc}) - \sin\varphi_n\ (x_o,z_{oc})]; \quad (9)$$

$$P_2(x_o,y_0,z_{oc}) = \frac{\partial r_n}{\partial z_{oc}} + \rho_n(z_{oc})\frac{\alpha_n'(z_{oc})}{\alpha_n(z_{oc})} \times \cos\varphi_n(x_o,z_{oc}). \quad (10)$$

При чистому пластичному згині згідно [3]:

$$\rho_n(\ z_{oc})s_0 = \frac{r_н^2 - r_в^2}{2} = s_n\ (z_{oc})r_s\ (z_{oc}),$$

$$\frac{\partial r_n}{\partial x_0} = \alpha_n'(z_{oc}) = 0.$$

Тоді з виразів (8) отримуємо відомі формули теорії чистого пластичного згину:

$$e_{\varphi\varphi} = -e_{rr} = \ln\frac{r_n(x_o,y_0,z_{oc})}{\rho_n(z_{oc})};$$

$$e_{zz} = e_{\varphi z} = e_{zr} = e_{r\varphi} = 0. \quad (11)$$

З урахуванням закону сталості об'єму залежності (8) набудуть вигляду:

$$e_{\varphi\varphi} = \ln\frac{r_n(x_o,y_0,z_{oc})}{r_c(x_o,z_{oc})} \times \frac{s_o}{s_n\ (x_o,z_{oc})} - 0{,}5e_{zz};$$

$$e_{rr} = -\ln\frac{r_n(x_o,y_0,z_{oc})}{r_c(x_{0,}z_{oc})} \times$$

$$\times \frac{s_o}{s_n\ (x_o,z_{oc})} - 0{,}5e_{zz}; \quad (12)$$

$$e_{zz} = \frac{1}{2}\{[P_1(x_o,y_0,z_{oc})]^2 + [P_2(x_o,y_0,z_{oc})]^2\}$$

$$e_{\varphi z} = \frac{1}{2}\left[\frac{r_n(x_o,y_0,z_{oc})}{\rho_n(z_{oc})}P_1\ (x_o,y_0,z_{oc}) + \right.$$

$$\left. + \frac{\partial r_n}{\partial x_0}P_2(x_o,y_0,z_{oc})\right];$$

$$e_{zr} = -\frac{1}{2}\frac{r_c(x_o,z_{oc})}{r_n(x_o,y_0,z_{oc})} \times \frac{s_n(x_o,z_{oc})}{s_o}P_2(x_o,y_0,z_{oc});$$

$$e_{r\varphi} = -\frac{1}{2}\frac{r_c(x_{0,}z_{oc})}{r_n(x_o,y_0,z_{oc})} \times \frac{s_n(x_{0,}z_{oc})}{s_0}\frac{\partial r_n}{\partial x_0}$$

Згідно з [5] потоншення під час профілювання визначається формулою

$$\Delta s = 0{,}006 s_0^{0,5} b^{0,5} \frac{[\alpha_n(z_{0c})]^{2/3}}{\sqrt{r_в}} \times \times \cos^4 \frac{\pi}{2}\left(1 - \frac{2x_0}{b_н}\right).$$

Отже,

$$\frac{s_n(x_o, z_{oc})}{s_0} = 1 - 0{,}006 \sqrt{s_0 b} \times \times \frac{[\alpha_n(z_{oc})]^{2/3}}{\sqrt{r_в(x_o, z_{oc})}} \cos^4 \frac{\pi}{2}\left(1 - \frac{2x_0}{b_н}\right). \quad (13)$$

Використовуючи залежності (12) у поєднанні з (3), (5), (6), (10), (13), можна обчислити компоненти тензора деформацій металу місця вигину під час профілювання. Як приклад на рис. 2 представлені графіки їхньої зміни вздовж ділянки плавного переходу в третій формувальній кліті, побудовані на підставі розрахунку за цими формулами для випадку профілювання швелера 150 × 100 × 2 мм за режимом 0 - 10 - 30 - 50 - 70 - 90° для точок, що перебувають на перетині осі симетрії місця вигину і граничних поверхонь полоси. Кути підгинання визначали за допомогою профілографа за гіпсовими зліпками загальмованої в стані полоси, значення першої похідної функції кута підгинання знаходили графічним диференціюванням.

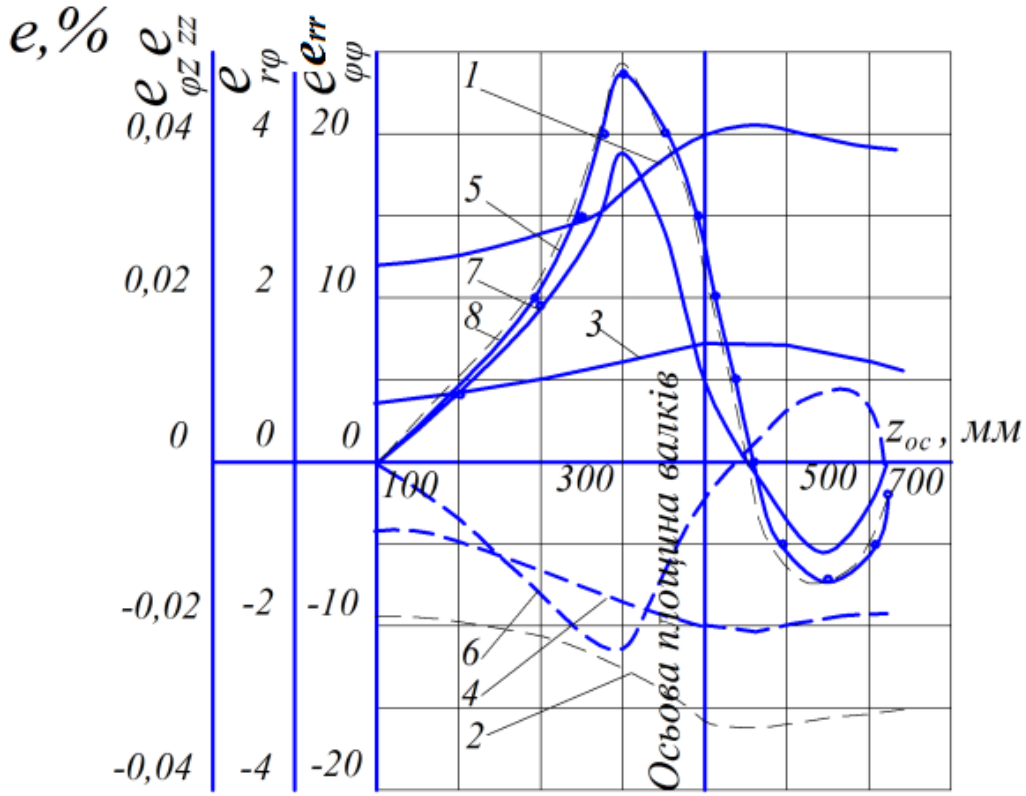


Рис. 2. Графіки зміни компонентів тензора деформацій $e_{\varphi\varphi}$ (1, 2), $e_{r\varphi}$ (3, 4), $e_{\varphi z}$ (5, 6) і e_{zr} (7, 8) металу місця вигину швелера 150 × 100 × 2 мм уздовж ділянки плавного переходу в третій формувальній кліті (30 - 50°) на зовнішній (1, 2, 5, 7) і внутрішній (2, 4, 6, 8) поверхнях

Як видно з формул (12) і рис. 2, радіальна деформація e_{rr} і тангенціальна $e_{\varphi\varphi}$ значно більші за решту компонентів тензора деформацій: вони на порядок більші за кутовий зсув $e_{r\varphi}$, на два – три порядки – за кутові зсуви $e_{\varphi z}$ і e_{zr} і на п'ять – шість

порядків – за поздовжнє відносне подовження e_{zz}. Таким чином, у першому наближенні можна вважати, що деформований стан місця вигину під час профілювання визначається тангенціальною і радіальною деформаціями, а інші компоненти дорівнюють нулю.

Дані дослідження деформованого стану у місцях згинання сортових гнутих профілів можуть стати основою для подальшого визначення уточнених мінімальних радіусів місць згинання на гнутих профілях та підвищення їх якості.

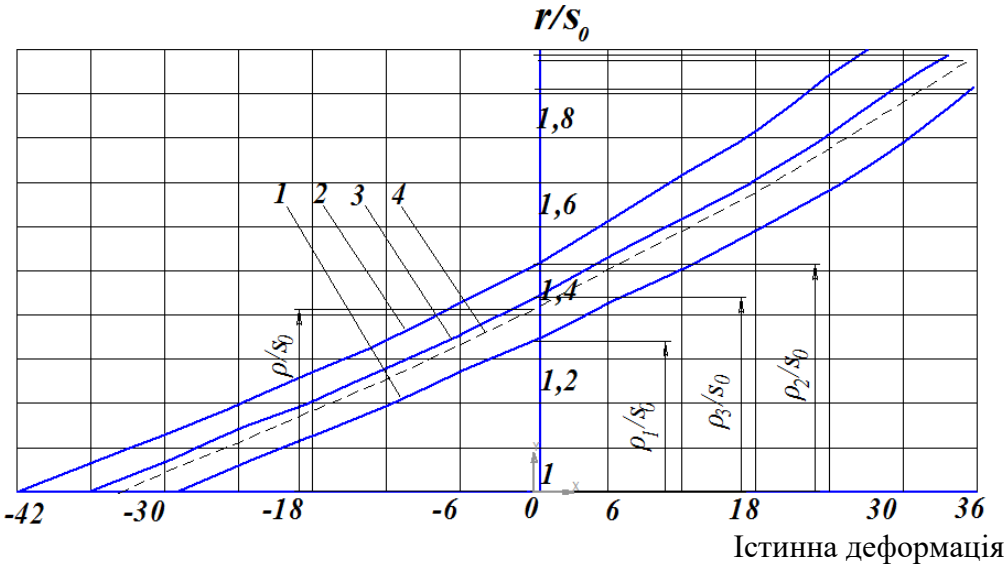


Рис. 3. Розподіл тангенціальних деформацій $e_{\varphi\varphi}$ за товщиною полоси при профілюванні (1, 2, 3) і чистому круговому вигині (4) за умови $\frac{r_в}{s_0} = 1$ та α =π/2; 1 – на осі симетрії місця вигину (x_0 =0,5$b_{виг}$); 2 – на межах місця вигину та плоских елементів (x_0 =0,5$b_{виг}$ ±0,5$b_{виг}$); 3 - в перерізах з потоншенням Δs=0,5Δs_max (x_0=0,5$b_{виг}$±0,182$b_{виг}$)

Графіки, наведені на рис.3 свідчать, що положення нейтрального шару деформацій при профілюванні залежить від кута підгинання, радіуса вигину, ширини елемента, що підгинається, і початкової абсциси точки.

З епюр тангенціальних деформацій $e_{\varphi\varphi}$ (рис. 2), побудованих згідно з (5), (1) і (8), видно, що в поздовжньому перерізі, який співпадає з віссю симетрії місця вигину, радіус нейтрального шару деформації менший, ніж у разі чистого вигину, а на межі місця вигину і плоских елементів – більший. Внаслідок цього в першому випадку тангенціальна деформація на зовнішній поверхні більша, ніж на внутрішній. А в другому - навпаки. Для поздовжніх перерізів із середнім значенням потоншення (крива 3) значення тангенціальних деформацій практично такі самі, як за чистого кругового вигину (крива 4).

Таким чином, деформований стан металу місць вигину з достатнім ступенем точності визначається формулами (5) з підстановкою усередненого радіуса нейтрального шару деформацій.

Як відомо [3], за сталості об'єму інтенсивність деформацій визначається виразом:

$$e_i = \frac{\sqrt{2}}{3}\left[(e_{rr} - e_{\varphi\varphi})^2 + (e_{\varphi\varphi} - e_{zz})^2 + (e_{zz} - e_{rr})^2 + 6(e_{\varphi z}^2 + e_{zr}^2 + e_{r\varphi}^2)\right]^{1/2}. \quad (9)$$

Підставляючи (1) у (9), отримаємо:

$$e_i = \begin{cases} \frac{2}{\sqrt{3}} e_{\varphi\varphi} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{r_n(x_0,y_0,z_{oc})}{r_c(x_0,z_{oc})} \times \frac{s_0}{s_n(x_0,z_{oc})}; & r_n \geq r \geq \rho_{np}; \\ -\frac{2}{\sqrt{3}} e_{\varphi\varphi} = -\frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{r_n(x_0,y_0,z_{oc})}{r_c(x_0,z_{oc})} \times \frac{s_0}{s_n(x_0,z_{oc})}; & \rho_{np} \geq r \geq r_в \end{cases} \quad (10)$$

Як показано в роботі [5], руйнування волокон внутрішньої поверхні місця вигину може статися тільки в тому разі, якщо інтенсивність деформацій на цій поверхні принаймні у 8 разів більша, ніж на зовнішній. Оскільки такий випадок під час профілювання виключений, то найнебезпечніші з точки зору руйнування є розтягнуті волокна зовнішньої поверхні. Потоншення під час профілювання досягає максимального значення на осі симетрії місця вигину, на перетині якої із зовнішньою поверхнею полоси і знаходиться небезпечна точка.

Інтенсивність деформацій у небезпечній точці визначимо згідно з (10):

$$e_{iн} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{r_н}{r_c} \frac{s_0}{s}. \quad (11)$$

Згідно з [5], допустима тангенціальна деформація під час вигину:

$$e_{iн} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[e_{\varphi\varphi}\right]_н = -0{,}55 \ln(1-\psi). \quad (12)$$

Прирівнюючи праві частини (11) і (12) та враховуючи (3) [1], після деяких перетворень отримаємо:

$$F_{(\alpha,\ b,r_в)} = (1-\psi)^{-0{,}55\frac{\sqrt{3}}{2}} = (1-\psi)^{-0{,}476}, \quad (13)$$

де $F_{(\alpha,\ b,r_в)} = \frac{1}{1-0{,}006\alpha^{\frac{2}{3}} b^{0{,}5}\left(\frac{r_в}{s_0}\right)^{-0{,}5} + \frac{2r_в}{s_0}} + \frac{1}{1-0{,}006\alpha^{\frac{2}{3}} b^{0{,}5}\left(\frac{r_в}{s_0}\right)^{-0{,}5}}$.

$$F_{(\alpha,\ b,r_в)} = (1-\psi)^{-\frac{\sqrt{3}}{2}} = (1-\psi)^{-0{,}866}. \quad (14)$$

На основі первинних теоретичних досліджень з використанням основних положень механіки суцільного деформованого середовища визначено залежності, що описують компоненти тензора деформацій у згинальних перерізах довгомірних гнутих профілів. Проаналізовано залежність розтягувальної складової дотичної деформації від кута згину. Отримано залежності, з яких при заданому відносному поперечному звуженні металу заготовки можна знайти граничний відносний радіус згину.

$$F_{(\alpha,\ b,r_в)} = (1-\psi)^{-\frac{\sqrt{3}}{2}} = (1-\psi)^{-0{,}866}. \quad (15)$$

Діючи аналогічно до попереднього, знайдемо:

$$F_{(\alpha,\ b,r_в)} = (1-\psi)^{-\frac{\sqrt{3}}{2}} = (1-\psi)^{-0{,}866}. \quad (16)$$

За заданого відносного поперечного звуження з (16) можна знайти граничний відносний радіус вигину. Для визначення технологічного радіуса вигину, за якого гарантується отримання продукції необхідної якості, необхідно помножити граничний радіус вигину на коефіцієнт запасу міцності. Останній на підставі численних практичних даних можна прийняти рівним 2 [5]. Таким чином, граничні (мінімально допустимі) радіуси вигину, можуть бути обчислені згідно із знайденими залежностями (14) та (16).

Для використання під час проектування технологічних процесів виробництва рівнополочних профілів широкого сортаменту, з матеріалів із різним відносним звуженням ψ, різною шириною елементів, що підгинаються b, за результатами розв'язання рівняння (14) побудовано номограму для визначення мінімального відносного технологічного радіусу згину запри куті підгинання $\pi/2$ (рис. 4). Найменше значення цього радіуса відповідає малій ширині за великого відносного поперечного звуження. Зі збільшенням ширини елемента, що підгинається, і зменшенням відносного поперечного звуження мінімальний радіус вигину монотонно зростає, причому його

залежність від ширини елемента, що підгинається, близька до лінійної.

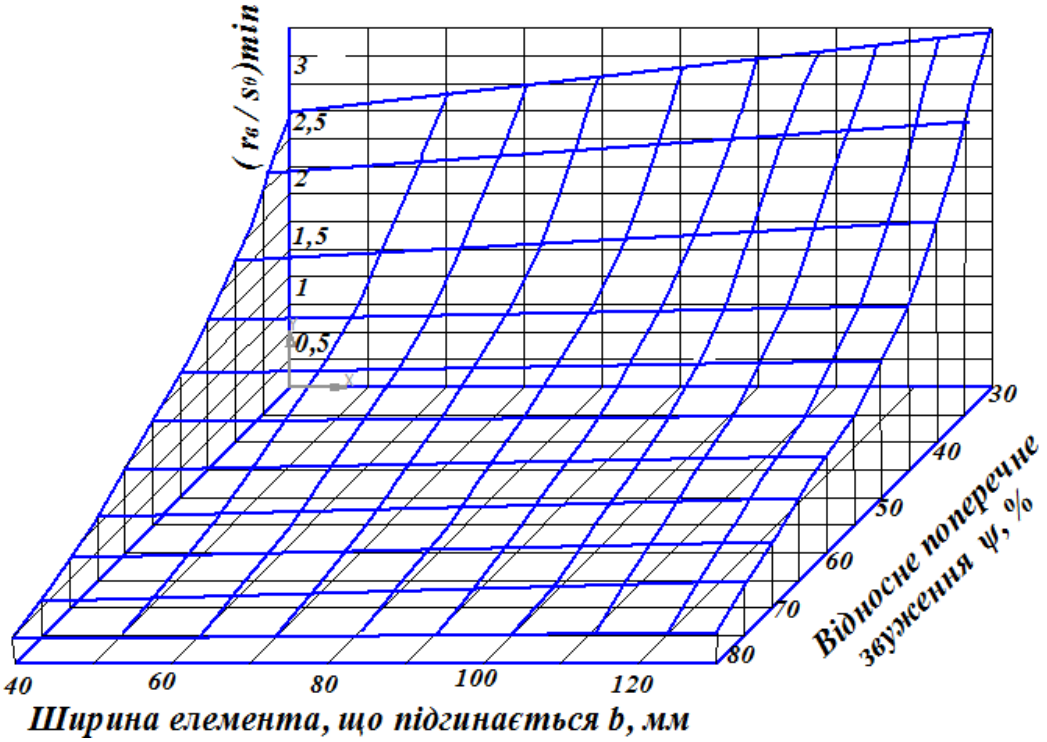


Рис. 4. Номограма для визначення мінімального відносного технологічного радіуса вигину за кута підгинання π/2

З залежності (13) можна знайти граничну допустиму (максимальну за шириною) тангенціальну деформацію зовнішніх волокон місць вигину під час профілювання.

$$[e_{\varphi\varphi}]_{\text{и}} = -0{,}275\ln(1-\psi) = -0{,}476\ln(1-\psi)\,. \qquad (17)$$

Графік залежності допустимої тангенціальної деформації зовнішніх волокон під час профілювання від відносного поперечного звуження матеріалу полоси (17) наведено на рис. 5.

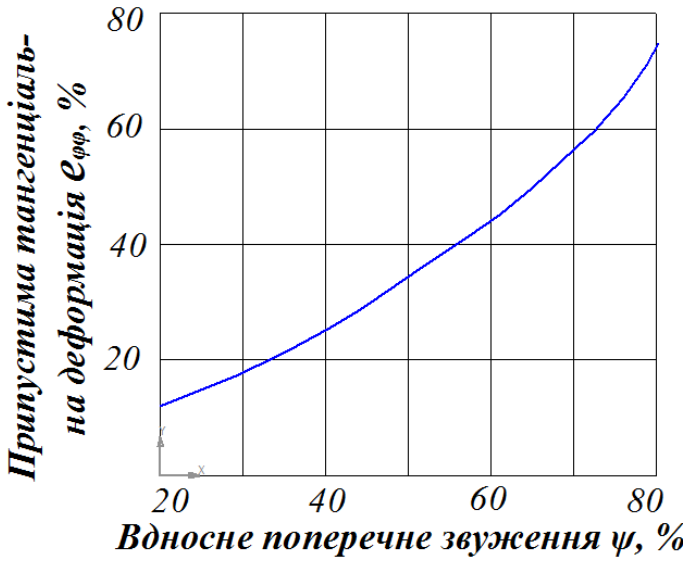


Рис. 5. Залежність допустимої тангенціальної деформації зовнішніх волокон під час профілювання від відносного поперечного звуження матеріалу полоси

Висновки

1. Для визначення найважливішого параметру процесу профілювання – мінімального радіусу сполучення елементів, від якого залежить якість гнутих профілів, був виконаний аналіз деформованого стану металу в місцях вигину, параметри якого визначались по результатам попередніх досліджень, виконаних авторами. Під час визначення мінімально допустимого радіуса вигину як критерій руйнування була прийнята питома робота деформації.

2. Виконані дослідження дозволили отримати залежності на основі яких з урахуванням відносного поперечного звуження профільованого матеріалу можна знайти граничний відносний радіус вигину, використання якого при розробці технології та розрахунках калібрувань валків дає можливість мінімізувати, або зовсім уникнути виникнення тріщин в місцях згинання.

3. Для практичного використання результатів виконаних досліджень при проектуванні технологій виготовлення широкого сортаменту нових рівнополочних швелерів різних профілерозмірів з найбільш поширених на виробництві матеріалів, була розроблена номограма для визначення мінімального відносного технологічного радіусу згину запри куті підгинання

4. За заданого відносного поперечного звуження з (15) можна знайти граничний відносний радіус вигину. Для визначення технологічного радіуса вигину, за якого гарантується отримання продукції необхідної якості, необхідно помножити граничний радіус вигину на коефіцієнт запасу міцності. Останній на підставі численних практичних даних можна прийняти рівним 2 [6]. Таким чином, граничні (мінімально допустимі) радіуси вигину, можуть бути обчислені згідно із знайденими залежностями (13) та (5).

Список використаних джерел

1. Trishevskiy O.I. Determination of the deformed state of the metal in the places of bending of long bent profiles. Proceedings of the 10th International scientific and practical conference "European scientific congress" (October 29-31, 2023) Barca Academy Publishing, Madrid, Spain. 2023. 533 p. IV International Scientific and Practical Conference.

2. Zienkiewicz R.L. Taylor and David Fox the finite element method for solid and structural mechanics. https://doi.org/10.1016/C2009-0-26332-X 2014. Elsevier Ltd

3. Trishevskiy O., Kaliuzhnyi O., Avtukhov A., Ashkelianets A., Ruzmetov A. Analysis of the influence of the main technological parameters of forming periodic corrugations in rolls on the accuracy of their periods. International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics. 2023. 2023(14). P. 149–155.

4. Skoblo T., Klochko O., Trishevskij O., Belkin E., Deryabkina E. Modeling of degradation processes of cast iron carbide phase of mill rolls at operation. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2023. P. 128–136.

5. Trishevskij O., Kaliuzhnyi O., Yurchenko O., Levchenko V., Akhlestin O. Establishing patterns in the temperature distribution within a deformation zone during thin strip rolling. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Vol. 2(5-104). P. 21–28.

References

1. Trishevskiy O.I. (2023). Determination of the deformed state of the metal in the places of bending of long bent profiles. Proceedings of the 10th International scientific and

practical conference "European scientific congress" (October 29-31, 2023) Barca Academy Publishing, Madrid, Spain. 533 p. IV International Scientific and Practical Conference.

2. Zienkiewicz R.L. (2014). Taylor and David Fox the finite element method for solid and structural mechanics. https://doi.org/10.1016/C2009-0-26332-X 2014. Elsevier Ltd

3. Trishevskiy O., Kaliuzhnyi O., Avtukhov A., Ashkelianets A., Ruzmetov A. (2023). Analysis of the influence of the main technological parameters of forming periodic corrugations in rolls on the accuracy of their periods. International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics. 2023(14). P. 149–155.

4. Skoblo T., Klochko O., Trishevskij O., Belkin E., Deryabkina E. (2023). Modeling of degradation processes of cast iron carbide phase of mill rolls at operation. Lecture Notes in Mechanical Engineering. P. 128–136.

5. Trishevskij O., Kaliuzhnyi O., Yurchenko O., Levchenko V., Akhlestin O. (2020). Establishing patterns in the temperature distribution within a deformation zone during thin strip rolling. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 2(5-104). P. 21–28.

Сакунов Д.І.
Національний університет біоресурсів і природокористування України,
м. Київ, Україна
E-mail:
sakunov@nubip.edu.ua

ВИМОГИ ДО РОБОЧИХ ОРГАНІВ АГРЕГАТІВ СМУГОВОЇ ОБРОБКИ ҐРУНТУ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ЇХ ЗАБИВАННЯ ПОЖНИВНИМИ РЕШТКАМИ

https://doi.org/10.37700/ts.2024.25.91-99

УДК 621.891

Сакунов Д.І. ***Вимоги до робочих органів агрегатів смугової обробки ґрунту для зменшення їх забивання пожнивними рештками***

Анотація. *В роботі на основі виробничих випробувань узагальнено вимоги до робочих органів агрегатів смугової обробки грунту для зменшення їх забивання пожнивними рештками. Метою даного дослідження було узагальнення причин забивання секцій Strip-till культиваторів пожнивними залишками, формування вимог до його робочих органів та їх взаємного розміщення для зменшення забивання. Встановлено, що загальною вимогою до робочих органів та їх розміщення для зменшення забивання Strip-Till агрегатів є забезпечення логічної послідовності обробки рослинних решток і грунту, що забезпечує ефективне розрізання решток та поступове і безперешкодне їх переміщення між робочими органами.*

Ключові слова: *грунт, обробіток, Strip-Till, методика, агротехніка, вимога.*

Sakunov D.I. ***Requirements for working bodies of strip tillage units to reduce their clogging with crop residues***

Abstract. *In the work on the basis of production tests, the requirements for the working bodies of strip tillage units are generalized to reduce their clogging with crop residues. The purpose of this study was to generalize the reasons for clogging Strip-Till sections of cultivators with crop residues, the formation of requirements for its working bodies and their mutual placement to reduce clogging. It has been established that the general requirement for the working bodies and their placement to reduce clogging of Strip-Till units is to ensure a logical sequence of processing plant residues and soil, which ensures effective cutting of residues and their gradual and unhindered movement between the working bodies.*

Key words: *soil, tillage, Strip-Till, method, agricultural technology, requirement.*

Постановка проблеми

Як показує практика [1], знаряддя для смугової обробки грунту (Strip-Till) добре функціонують на легких [2] і середніх [3] грунтах з помірною кількістю пожнивних решток [4]. Однак Strip-till-культиватори багатьма аграріями використовуються як основний агрегат для обробки важких ущільнених [5], ґрунтів які, в залежності від погодних умов [6], можуть бути сильно зволожені або пересушені [7]. Такі поля

складно обробляти та формувати смуги з оптимальними властивостями для розвитку рослин [8]. Також завдання ускладнює наявність великої кількості пожнивних решток, які можуть спричинити забивання Strip-Till агрегату [9], що значно зменшує продуктивність, або взагалі унеможливлює його роботу, особливо в сиру погоду, коли рослинні залишки та грунт стають вологими [10]. У зв'язку з цим у сільгоспвиробників залишається досить вузьке погодне вікно для ефективного застосування Strip-Till культиваторів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Виходячи з агротехнічних вимог [1], культиватори для смугової обробки грунту повинні забезпечувати високу якість обробки грунту в межах оброблюваної смуги з одночасним внесенням добрив [12]. При цьому смуга має бути очищена від пожнивних решток незалежно від їх кількості та стану [13]. Відповідно робочі органи агрегатів для Strip-till повинні рівномірно працювати на заданій глибині і не забиватися грунтом та рослинними рештками [14].

Послідовність робочого процесу смугової обробки грунту виглядає наступним чином:

А. Култери (рорізні диски) розрізають пожнивні рештки і розкривають грунт.

Б. Очищувач смуги прибирає пожнивні рештки в сторони.

В. Лапи виконують глибоку обробку грунту і внесення добрив.

Г. Закриваючі диски формують профіль смуги.

Д. Коток розбиває грудки і вирівнює поверхню смуги.

Для забезпечення ефективного робочого процесу Strip-Till агрегату його робочі органи повинні відповідати певним вимогам щодо взаємодії з ґрунтом [15], рослинними рештками та один з одним [16]. Процес взаємодії робочих органів з грунтом і рослинними залишками досить складний [17], і труднощі моделювання даного процесу пов'язані з тим, що модель повинна враховувати багато факторів, в тому числі і таких, що динамічно змінюються [18]. Наприклад властивості ґрунту і рослинних решток, їх кількість та швидкість руху агрегату [19]. Від швидкості руху агрегату залежить швидкість потоку рослинних решток, що проходять крізь елементи робочих секцій Strip-Till агрегату [20]. При підвищенні швидкості руху рівномірність та плавність потоку через робочі органи знижується, а очисники ряду накидують рештки на робочі органи сусідніх секцій, що перешкоджає їх функціонуванню і підвищує ризик забивання [21]. А при зменшенні робочої швидкості може знизитись якість обробки грунту (збільшення розміру грудки) та знижується продуктивність Strip-Till агрегату [22]. Теоретичні моделі потоку пожнивних решток можуть базуватись на принципах механіки, гідродинаміки (для поведінки потоку), методу дискретних елементів та емпіричних польових спостережень [23].

Формулювання мети досліджень

Метою даного дослідження було узагальнення причин забивання секцій Strip-till культиваторів пожнивними залишками, формування вимог до його робочих органів та їх взаємного розміщення для зменшення забивання.

Результати досліджень

Розглянемо можливі причини та локалізацію забивання елементів робочої секції Strip-till культиваторів.

Забивання між культером та очисником ряду (рис. 1 і рис. 2). Причини:

• Недостатнє перерізання пожнивних решток і штовхання їх вперед.

• Рослинна маса накопичується перед культером і потім сходить в сторону утворюючи купу яку очисник ряду не взмозі відгорнути.

• Затримка рослинної маси на розгортачах. Якщо швидкість обертання диску очисника ряду зменшується, або диск блокується він починає накопичувати і горнути рослинну масу перед собою.

• Недостатній простір, для безперешкодного потоку решток, між культером та іншими елементами конструкції.



Рис. 1. Забивання між опорними колесами та рамою секції на якій закріплено культер. Агрегат: SLY StripCat та Yetter Maveric



Рис. 2. Забивання між культером та очисником ряду агрегату Orthman 1TRPR

Забивання перед лапою (рис. 3 і рис. 4). Причини:

• Занадто велика кількість пожнивних решток перед лапою. Недостатнє відведення в сторони рослинної маси очисником ряду.

• Неповне перерізання решток культером і вдавлювання їх у грунт на глибину роботи культера, відповідно диски очисника ряду не можуть їх прибрати в сторону і рештки охватють лапу.



Рис. 3. Забивання перед лапою агрегату Kuhn Krause Gladiator



Рис. 4. Намотування рослинних решток кукурудзи на очиснику ряду агрегату SLY StripCat



Рис. 5. Забивання між лапою та закриваючим диском агрегату Kuhn Krause Gladiator

Забивання між лапою та закриваючими дисками (рис. 5). Причини:

• Простір між лапою та закриваючим диском недостатній для безперешкодного потоку решток.

• Зменшення швидкості обертання чи повна зупинка закриваючих дисків призводить до того, що диск починає горнути грунт перед собою тим самим зменшуючи вікно проходу решток.

• Лапа вивертає назовні занадто велику кількість грунту що утримується між лапою та закриваючим диском, що зменшує простір для проходження решток

Забивання між секціями (рис. 6). Причини:

• Простір між робочими секціями Strip-Till культиватора недостатній для безперешкодного потоку решток

• Занадто великий потік решток і грунту між секціями, наприклад в разі некоректної роботи розгортача, коли окрім решток переміщується значна маса грунту.



Рис. 6. Забивання між секціями

Отже, виходячи з агротехнічних вимог та можливих причин забивання було сформовано основні вимоги до робочих органів Strip-Till культиватора, що наведено нижче.

Култер. Култер має забезпечити ефективне перерізання пожнивних решток, без волочіння чи складання з подальшим защемленням в борозді у формі букви V. Защемлення решток ускладнює їх видалення очисником ряду і може призвести до зачіпання залишків лапою. Також култер має створювати якомога вужчий вертикальний надріз, зводячи до мінімуму порушення поверхні ґрунту, для того щоб очисник ряду йшов по не зрушеному грунту і розгортав у сторони лише рослинні рештки. Конструкція култера та його кріплення має зменшувати вірогідність блокування обертання култера через намотування пожнивних решток чи інших причин.

Розгортач. Розгортач має забезпечувати очищення майбутньої смуги від пожнивних решток. При цьому ширина відгортання решток має бути достатньою для забезпечення належної роботи закриваючих дисків, і в той же час потік решток від розгортача не має закидати рештки на сусідні секції Strip-Till культиватра чи перекидати їх через розгортач, повертаючи на початкове місце. Конструкція розгортача

та його кріплення має зменшувати вірогідність блокування обертання дисків через намотування пожнивних решток.

Лапа. Лапа має забезпечувати рівномірне рихлення грунту (з одночасним внесенням добрив) без утворення пустот в межах заданої глибини та ширини смуги, при цьому вивертання грунту назовні має бути мінімальним, щоб основна маса грунту залишалась в межах смуги і не вивалювалась за її межі. Обмеження потоку піднятого грунту лапою важливе для зменшення вірогідності блокування закриваючих дисків, щоб не спричинити забивання агрегату.

Закриваючі диски. Для формування смуги заданої ширини і висоти закриваючі диски мають направляти потік грунту, піднятий лапою, до центру смуги і при цьому запобігати попаданню рослинних решток в очищену смугу. Розміщення дисків відносно лапи має забезпечувати вільний потік пожнивної маси та грунту, для уникнення забивання і в той же час обмежити винесення грунту за межі оброблюваної смуги. Відстань між дисками не повинна перевищувати ширину, на якій очисники рядків видаляють залишки. Якщо зона обробки закриваючих дисків вийде за межі зони вільної від пожнивних решток, ризик забивання зросте. Також відстань між закриваючими дисками лімітується агрономічними вимогами до ширини оброблюваної смуги. Конструкція закриваючих дисків та їх кріплення має зменшувати вірогідність блокування обертання дисків.

Коток. Коток має забезпечувати подрібнення грудок і фінішне формування профілю смуги, при цьому грунт після прикочування не повинен виноситись за межі смуги. Також коток має бути стійким до забивання грунтом і намотування пожнивних решток.

Висновки

Отже, загальною вимогою до робочих органів та їх розміщення для зменшення забивання Strip-Till агрегатів є забезпечення логічної послідовності обробки рослинних решток і грунту, що забезпечує ефективне розрізання решток та поступове і безперешкодне їх переміщення між робочими органами.

Список використаних джерел

1. Сакунов Д.І. Виробниче узагальнення методичного підходу і агротехнічних вимог до Strip-Till. Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. 2024. Вип. 24. С. 185–197. https://doi.org/10.37700/ts.2024.24.185-197.

2. Kozachenko O.V., Syedykh K.V., Shkrehal O.M. Mathematical modeling of stability of mechanical system of discator. Machinery and Energetics. 2021. Vol. 12(4). P. 61–66.

3. Vlăduţ D.I., Biriş S., Vlăduţ V., Cujbescu D., Ungureanu N., Găgeanu I. Verification of stress by FEM analysis·M-1 echanical testing of agricultural mobile aggregates couplig device. Inmateh – Agricultural Engineering. 2018. Vol. 54, no. 1/2018, P. 37–46.

4. Войтік А.В., Вихватнюк Р.В., Худік Л.М. Технологія обробітку грунту стріп-тіл: історичний розвиток та поширення в Україні. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 2016. Вип. 46. С. 117–123.

5. Голуб Г.А., Дворник А.В. Обґрунтування показників якості та агрономічних вимог до смугового обробітку ґрунту. Наукові горизонти. 2018. № 12 (73). С. 37–44.

6. Gheorghe G., Lates D., Oprea C., Baltatu C. Structural and modal analysis in solidworks of agricultural plow to choose vibration system at moldboard. Engineering for Rural Development. 2023. Vol. 22. P. 872–878. DOI: 10.22616/ERDev.2023.22.TF168.

7. Голуб Г.А., Дворник А.В. Вплив конструкційно-технологічних параметрів на якість смугового обробітку ґрунту. Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України. Дослідницьке. 2019. Вип. 24 (38). С. 28–37.

8. Rogovskii I., Titova L., Trokhaniak V., Trokhaniak O., Stepanenko S. Experimental study on the process of grain cleaning in a pneumatic microbiocature separator with apparatus camera. Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering. 2019. Vol. 12 (61). No 1. P. 117−128. https://doi.org/10.31926/but.fwiafe.2019.12.61.1.10.

9. Rogovskii I.L., Titova L.L., Trokhaniak V.I., Rosamaha Yu.O., Blesnyuk O.V., Ohiienko A.V. Engineering management of two-phase coulter systems of seeding machines for implementing precision farming technologies. INMATEH. Agricultural Engineering. 2019. Bucharest. Vol. 58. No 2. P. 137−146. https://doi.org/10.35633/INMATEH-58-15.

10. Rogovskii I.L. Algorithmicly determine the frequency of recovery of agricultural machinery according to degree of resource's costs. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 2020. Vol. 11 (1). P. 155−162.

11. Rogovskii I., Titova L., Trokhaniak V., Trokhaniak O., Stepanenko S. Experimental study of the process of grain cleaning in a vibro-pneumatic resistant separator with passive weeders. Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering. 2020. Vol. 13 (62). No 1. P. 117−128.

12. Rogovskii I.L., Titova L.L., Trokhaniak V.I., Haponenko O.I., Ohiienko M.M., Kulik V.P. Engineering management of tillage equipment with concave disk spring shanks. INMATEH. Agricultural Engineering. 2020. Bucharest. Vol. 60. No 1. P. 45−52. https://doi.org/10.35633/INMATEH-60-05.

13. Rogovskii I.L. Consistency ensure the recovery of agricultural machinery according to degree of resource's costs. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 2019. Vol. 10(4). P. 145−150. https://doi.org/10.31548/machenergy.2019.04.145-150.

14. Yablonskyi P., Rogovskii I., Sobczuk H., Virchenko G., Volokha M., Vorobiov O. Computational approach to geometric modeling of plow bodies. Journal of Engineering Sciences (Ukraine). 2024. Vol. 11(1). P. E9–E18. https://doi.org/10.21272/jes.2024.11(1).e2.

15. Голуб Г.А., Дворник А.В. Вплив параметрів секції агрегату для смугового обробітку на поперечну нерівність ґрунту. Наукові горизонти. 2019. №5 (78). С. 40–50.

16. Golub G., Dvornyk A. Research of indicators of strip tillage. TEKA. Quarterly journal of agri-food industry. Lublin. 2020. Vol. 20. No 2. P. 83–90.

17. Сакунов Д.І. Структурність машиновикористання технології Strip-Till. Крамаровські читання: X Міжнародна науково-технічна конференція. м. Київ, 23-24 лютого 2023 року: тези конференції. Київ. 2023. С. 217-221.

18. Сакунов Д.І. Агротроніка енергетичної оцінки роботи робочого органу обробітку ґрунту Strip-Till. Раціональне використання енергії в техніці. TechEnergy 2023: XIX Міжнародна наукова конференція, м. Київ. 18-19 травня 2023 року: тези конференції. Київ. 2023. С. 213-216.

19. Nazarenko I., Mishchuk Y., Mishchuk D., Ruchynskyi M., Rogovskii I., Mikhailova L., Titova L., Berezovyi M., Shatrov R. Determiantion 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.

20. Zagurskiy O., Pokusa Z., Pokusa F., Titova L., Rogovskii I. Study of efficiency of transport processes of supply chains management under uncertainty. Monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole. 2020. ISBN 978-83-66567-13-9. 162 p.

21. Sheichenko, V., Rogovskii, I., Skoriak, Y., Petrachenko, D., Shevchuk, M., Sheichenko, D., Titova, L., Sivak, I. Defining patterns in the intensification of hemp stalk retting processes. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. Vol. 6 (1 (132)), P. 50–63. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.3150.

22. 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. DOI: 10.22616/ERDev.2024.23.TF195.

23. Rogovskii I., Titova L., Ohiienko M., Sivak I., Mstowska I., Nadtochiy O., Matuhno N. Methods of production management of agrotronics of grain production by agricultural enterprises. Monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole, 2024; ISBN 978-83-66567-66-5; pp. 305, illus., tabs., bibls.

References

1. Sakunov D.I. (2024). Production generalization of methodical approach and agrotechnical requirements for Strip-Till. Technical service of agriculture, forestry and transport. Vol. 24. P. 185-197. https://doi.org/10.37700/ts.2024.24.185-197

2. Kozachenko O.V., Syedykh K.V., Shkrehal O.M. (2021). Mathematical modeling of stability of mechanical system of discator. Machinery and Energetics. Vol. 12(4). P. 61–66.

3. Vlăduţ D.I., Biriş S., Vlăduţ V., Cujbescu D., Ungureanu N., Găgeanu I. (2018). Verification of stress by FEM analysis·M-1 echanical testing of agricultural mobile aggregates couplig device. Inmateh – Agricultural Engineering. Vol. 54, no. 1/2018, P. 37–46.

4. Voytik A.V., Vykhvatnyuk R.V., Hudik L.M. (2016). Strip-till soil cultivation technology: historical development and distribution in Ukraine. Design, production and operation of agricultural machines. Vol. 46. P. 117–123.

5. Golub G.A., Dvornyk A.V. (2018). Justification of quality indicators and agronomic requirements for strip tillage. Scientific horizons. No. 12 (73). P. 37–44.

6. Gheorghe G., Lates D., Oprea C., Baltatu C. (2023). Structural and modal analysis in solidworks of agricultural plow to choose vibration system at moldboard. Engineering for Rural Development. Vol. 22. P. 872–878. DOI: 10.22616/ERDev.2023.22.TF168.

7. Golub G.A., Dvornyk A.V. (2019). The influence of structural and technological parameters on the quality of strip tillage. Technical and technological aspects of development and testing of new equipment and technologies for agriculture in Ukraine. Research. Vol. 24 (38). P. 28–37.

8. Rogovskii I., Titova L., Trokhaniak V., Trokhaniak O., Stepanenko S. (2019). Experimental study on the process of grain cleaning in a pneumatic microbiocature separator with apparatus camera. Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering. Vol. 12 (61). No 1. P. 117−128. https://doi.org/10.31926/but.fwiafe.2019.12.61.1.10.

9. Rogovskii I.L., Titova L.L., Trokhaniak V.I., Rosamaha Yu.O., Blesnyuk O.V., Ohiienko A.V. (2019). Engineering management of two-phase coulter systems of seeding machines for implementing precision farming technologies. INMATEH. Agricultural Engineering. Vol. 58. No 2. P. 137−146. https://doi.org/10.35633/INMATEH-58-15.

10. Rogovskii I.L. (2020). Algorithmicly determine the frequency of recovery of agricultural machinery according to degree of resource's costs. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. Vol. 11 (1). P. 155−162.

11. Rogovskii I., Titova L., Trokhaniak V., Trokhaniak O., Stepanenko S. (2020). Experimental study of the process of grain cleaning in a vibro-pneumatic resistant separator with passive weeders. Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering. Vol. 13 (62). No 1. P. 117−128.

12. Rogovskii I.L., Titova L.L., Trokhaniak V.I., Haponenko O.I., Ohiienko M.M., Kulik V.P. (2020). Engineering management of tillage equipment with concave disk spring shanks. INMATEH. Agricultural Engineering. Bucharest. Vol. 60. No 1. P. 45−52. https://doi.org/10.35633/INMATEH-60-05.

13. Rogovskii I.L. (2019). Consistency ensure the recovery of agricultural machinery according to degree of resource's costs. Machinery & Energetics. Kyiv. Ukraine. Vol. 10(4). P. 145−150. https://doi.org/10.31548/machenergy.2019.04.145-150.

14. Yablonskyi P., Rogovskii I., Sobczuk H., Virchenko G., Volokha M., Vorobiov O. (2024). Computational approach to geometric modeling of plow bodies. Journal of Engineering Sciences (Ukraine). Vol. 11(1). P. E9–E18. https://doi.org/10.21272/jes.2024.11(1).e2.

15. Golub G.A., Dvornyk A.V. (2019). The influence of the parameters of the unit section for strip cultivation on the transverse unevenness of the soil. Scientific Horizons. Vol. 5 (78). P. 40–50.

16. Golub G., Dvornyk A. (2020). Research of indicators of strip tillage. TEKA. Quarterly journal of agri-food industry. Lublin. Vol. 20. No 2. P. 83–90.

17. Sakunov D.I. (2023). Structure of machine use of Strip-Till technology. Kramarov readings: 10th International Scientific and Technical Conference, Kyiv, February 23-24, 2023: conference abstracts. Kyiv. P. 217–221.

18. Sakunov D.I. (2023). Agrotronics energy evaluation of the working body of the Strip-Till tillage. Rational use of energy in technology. TechEnergy 2023: XI International Scientific Conference, Kyiv, May 18-19, 2023: abstracts of the conference. Kyiv. P. 213–216.

19. Nazarenko I., Mishchuk Y., Mishchuk D., Ruchynskyi M., Rogovskii I., Mikhailova L., Titova L., Berezovyi M., Shatrov R. (2021). Determiantion 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.

20. Zagurskiy O., Pokusa Z., Pokusa F., Titova L., Rogovskii I. (2020). Study of efficiency of transport processes of supply chains management under uncertainty. Monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole. ISBN 978-83-66567-13-9. 162 p.

21. Sheichenko, V., Rogovskii, I., Skoriak, Y., Petrachenko, D., Shevchuk, M., Sheichenko, D., Titova, L., Sivak, I. (2024). Defining patterns in the intensification of hemp stalk retting processes. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (1 (132)), 50–63. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.3150.

22. Rogovskii I., Sivak I., Shatrov R., Nadtochiy O. (2024). Agroengineering studies of tillage and harvesting parameters in soybean cultivation. Engineering of Rural Development. 2024. Vol. 23. P. 965-970. DOI: 10.22616/ERDev.2024.23.TF195.

23. Rogovskii I., Titova L., Ohiienko M., Sivak I., Mstowska I., Nadtochiy O., Matuhno N. (2024). Methods of production management of agrotronics of grain production by agricultural enterprises. Monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole, ISBN 978-83-66567-66-5; pp. 305, illus., tabs., bibls.

Osadchiy I.O.
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
E-mail:
osadchiy@nubip.edu.ua

INNOVATIVE SOLUTIONS OF SECTION PRESSURE AND INFLUENCE OF PRESSURE CAPACITY ON AGRICULTURAL CULTURE PLANTING

https://doi.org/10.37700/ts.2024.25.100-109

УДК 621.891

Osadchiy I.O. ***Innovative solutions for clamping section and effect of clamping capacity on sowing of agricultural crops***

Abstract. *The relevance of the study is related to the determination of the effective mechanism of clamping the sections of the row drill. The purpose of the study was to analyze the available solutions for clamping the section and the impact of clamping capacity on crop sowing and its further development. First of all, the importance of uniform sowing was described for different types of crops, namely, sunflower, corn and soybeans. Further, the work describes the components of the section of the row drill, where its main elements are indicated. Further, the work reveals the topic of different types of pressure mechanisms of the seeder, namely: mechanical, pneumatic, hydraulic. Researching the last type revealed a number of advantages over its predecessors. The main advantages of hydraulic clamping are a quick response to changes in soil type using strain gauges and, with their help, soil density mapping.*

Key words: *seeding depth, clamping force, section, automaticity, mapping.*

Осадчий І.О. ***Інноваційні рішення притискання секції та вплив притискної здатності на посів сільськогосподарської культури***

Анотація. *Актуальність дослідження пов'язана з визначенням ефективного механізму притискання секцій просапної сівалки. Метою дослідження було проаналізувати наявні рішення притискання секції та вплив притискної здатності на посів культури та подальший її розвиток. В першу черго було описано важливість рівномірного посіву для різних типів культур а саме, соняшника, кукурудзи та сої. Далі в роботі описані складові елементи секції просапної сівалки де вказані головні її елементи. Далі в роботі розкривається тема різних типів притискних механізмів сівалки а саме: механічний, пневматичний, гідравлічний. Досліджуючи останній типу було виявлено кількість переваг над попередниками. Основними перевагами гідравлічного притискання є швидка реакція на зміну типу грунту за допомогою тензодатчиків а, за їх допомогою, картування щільності грунту.*

Ключові слова: *глибина посіву, притискна сила, секція, автоматичність, картування.*

Introduction

Sowing is perhaps the most responsible stage in the entire complex of agricultural works [1]. It is at this time that you need to create the best conditions for the start of the plant with the most optimal ratio of moisture, access to oxygen and availability of heat [2]. After all, the law of the minimum states that the factor of the element that is in deficit determines

the quality indicator, and the element that is in excess will not be able to compensate for the insufficient amount of the previous one [3].

Uneven, too deep or shallow seed wrapping is the main reason for the decrease in field germination and the formation of low-yielding crops [4]. The optimal sowing depth of late spring crops (corn, sunflower, soybeans) is 4–5 cm, but depending on the zone of sufficient or insufficient moisture, it can vary within 1 cm [5]. Wrapping the seeds to the same depth makes it possible to get friendly and uniform seedlings, which ensures the constant development of plants during the growing season and contributes to more effective care of crops [6].

Analysis of recent researches

Homogeneity, in particular, reduces intraspecific competition between seedlings [7], reduces the germination of weeds [8], increases the area of nutrition and illumination of crops [9]. As a result, an increase in yield is ensured [10]. In addition, due to uniform ripening [11], there is no need for desiccation and post-harvest processing [12], which require additional costs [13].

If we are talking about the depth of sowing corn, then here the accuracy should be jewel-like [14]. After all, even minor fluctuations will provoke physiological deviations. A symptom of shallow seed wrapping (less than 3-4 cm) is an underdeveloped root system, which, for example, during a drought, will not be able to provide the plant with a sufficient amount of moisture [15]. Moreover, due to the lack of a reliable attachment to the soil, the so-called "no root syndrome" can develop, which will cause the plant to lie down, especially in dry soil in windy weather, and subsequently to its complete death [16].

And for soybeans, due to the epicotyl method of its germination, the sowing depth should not be more than 4 cm. After all, it is important for this culture to ensure uniform access to light: its lack provokes a decrease in nitrogen content, and this indicator is critical for growing soybeans [17]. On shaded plants, the number of incomplete beans increases, the height of their attachment to the stem becomes low, which complicates the process of harvesting with a combine harvester and, as a result, leads to a decrease in profit.

The aim and objectives of research

The purpose of the study was to analyze the available solutions for clamping the section and the influence of clamping capacity on crop sowing and its further development.

Research results

Only one that places the seeds not only at the same distance from each other, but also at the same depth of wrapping can be considered a high-quality precision seeding planter.

The planter is a whole structural organism in which all parts must work perfectly and perform their functions for the best possible sowing of grain in various conditions. The main mechanism in the planter is its section, which consists of certain elements (see Fig. 1).

Adequate seeding depth is one of the main factors of a successful seeding company. The correct setting of the pressure increase mechanism is crucial for the timing of sowing. Correctly selected pressure balance for adequate contact of the grain with the soil, without causing over-compaction, can dramatically affect the final result - the harvest.

The sowing depth is regulated by the depth wheels, which have different widths depending on the width of the row spacing. Three types of systems are used to maintain the seeding depth on precision seed drills: mechanical, pneumatic, and hydraulic.



Fig. 1. Section of the seeder of precision seeding: 1 – construction of the seeding device, 2 – vas deferens, 3 – unfolders, 4 – turbodisc, 5 – opener, 6 – sowing depth adjustment system, 7 – seed sealer, 8 – rolling wheels

The mechanical clamping system is represented by springs installed on the parallelograms of the section (Fig. 2). The range of setting the pressure on the soil in this case ranges from 50 to 250 kg (Fig. 3).

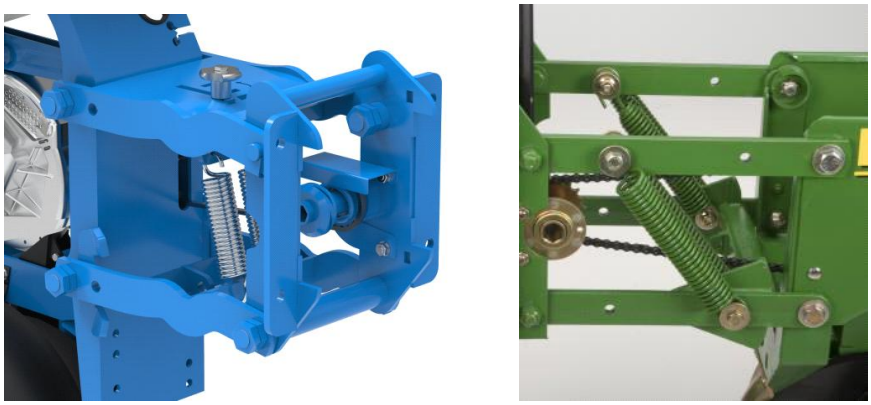


Fig. 2. Springs, with the help of which you can change the degree of pressure on the soil

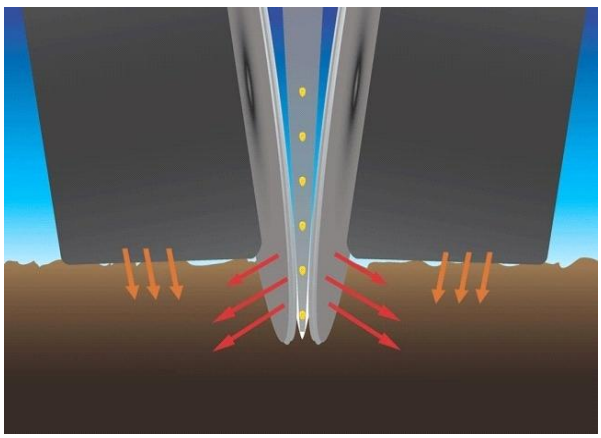


Fig. 3. Pressure on the soil

However, the mechanical system has one significant drawback - on a field with different types of soil (Fig. 4), there is no possibility to automatically adjust the pressure. So agronomists, to be 100% sure that the coulter will keep the depth evenly, adjust the springs to full force. Due to this, the parts work at their maximum and exhaust their resource faster.

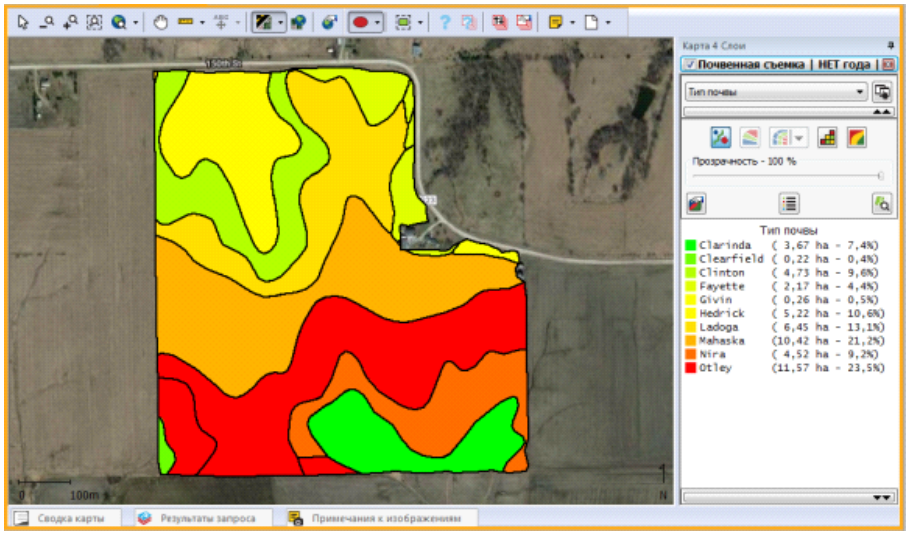
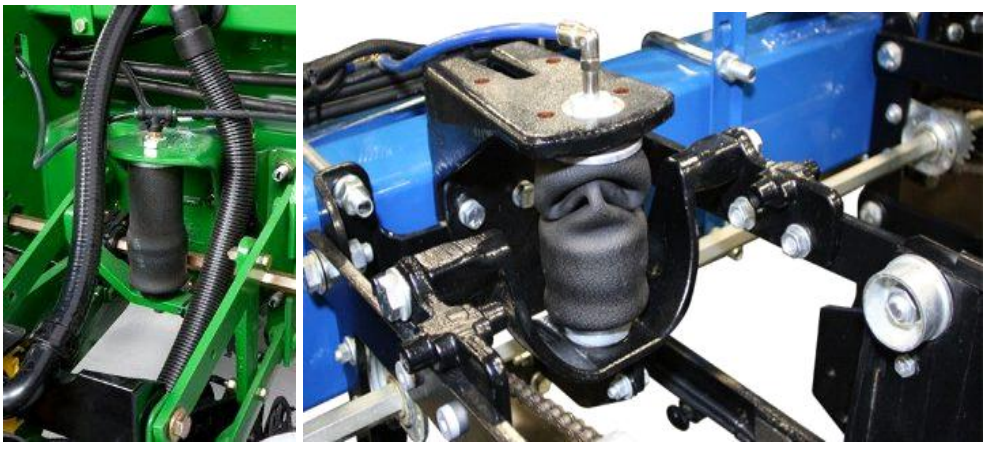


Fig. 4. Soil types in one field

If sowing is carried out on too soft soil, a large pressure of the springs is transmitted to the wheels of the depth and the coulter, which in turn leads to over-compaction of the seed bed and negatively affects the development of the root system in the first stages of plant development. Another disadvantage of springs is the loss of their elasticity, stretching, and because of this, failure to provide uniform pressure on all sections, which leads to uneven germination of seeds.

Meanwhile, air cushions evenly maintain the set pressure on all sections (Fig. 5). The pneumatic clamping system is used today in planters of many manufacturers (Kinze, John Deer, Gaspardo, etc.). It consists of the following elements: a control unit, a compressor, a receiver, pressure sensors, a pipeline, air cushions, and in some cases – a strain gauge.


Fig. 5. Air cushions evenly distribute pressure across all sections

Clamping accuracy is about 80%. However, a serious drawback of the system is the parallel connection of pillows, the lack of ability to adjust the pressure separately on each section.

The speed of response to pressure changes in the system is high due to pumping air from the receiver to the air cushions. During this period of time, the planter can move to harder soil, and it will be necessary to reduce the pressure (Fig. 6).

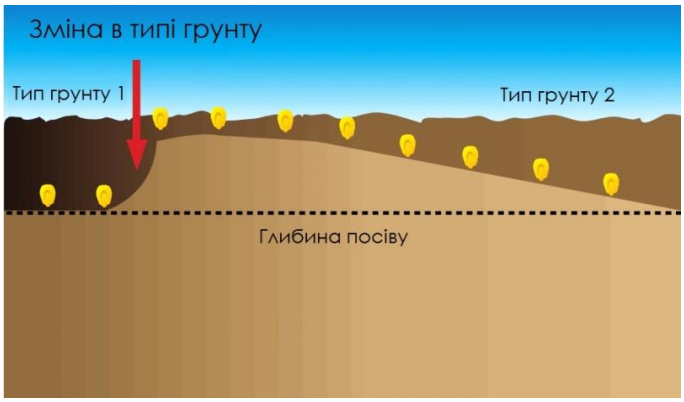


Fig. 6. Reaction to a change in soil type with pneumatic cushions

The hydraulic clamping mechanism with the help of double-action hydraulic cylinders can be safely called a precision farming system. Finding the optimal downforce is a challenge for manufacturers of precision farming equipment.



Fig. 7. Sure Force hydraulic clamping system from Ag leader

It should be emphasized that such types of mechanisms are complex and highly intelligent in design, but reliable and easy to operate. The system consists of such elements as a monitor, a set of cables, a main module, in-line modules, in-line valves, hydraulic cylinders, strain gauges

The hydraulic pressure system is an active pressure system that is installed on precision sowing machines. It works automatically, applying a clamping force when the load on the depth wheels is less than the specified one. When the pressure is more than enough to reach the set seeding depth, the hydraulic cylinder raises the section, preventing over-compaction of the seed bed. Strain gauges on each row sense changes in soil density and respond to them.

Some systems make it possible to see each planter row as a map on the display with the average load every second. The measurement frequency is 200 times per second (Fig. 8).



Fig. 8. InCommand 1200 AgLeader monitor.

Maps of fields after sowing or other operations, from field monitors, can be sent to a PC and processed in an agronomic GIS (geographic information system) program, or via a WI-FI network, transferred to an iPad and using applications provided by the equipment manufacturer, and viewed continuously in the field for analysis and making the necessary decisions.

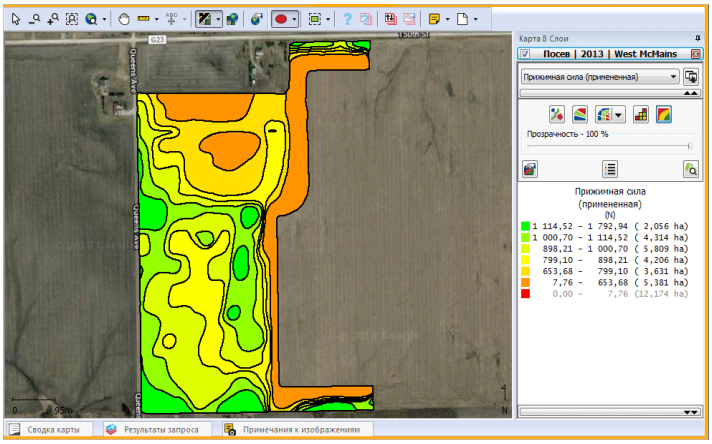


Fig. 8. Sure Force action during seeding in the SMS program.

Quickly and accurately adjust the pressing force, even in the areas of transition from soft sandy soil types to hard clay areas of the field – these are the possibilities provided by the system, giving the seed a chance to reveal its full potential (Fig. 9).

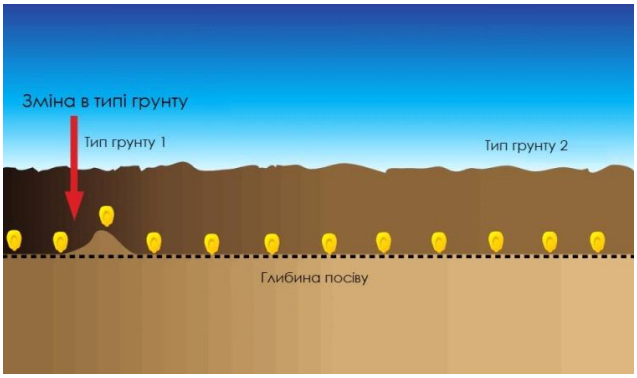


Fig. 9. Response to changes in soil type

Another Delta Force system from Precision Planting, which is installed on each section, also allows you to automatically change the planting depth (Fig. 10). As a result, each row can independently respond to changes in external factors, such as terrain or soil type.



Fig. 10. Precision Planting's Delta Force system

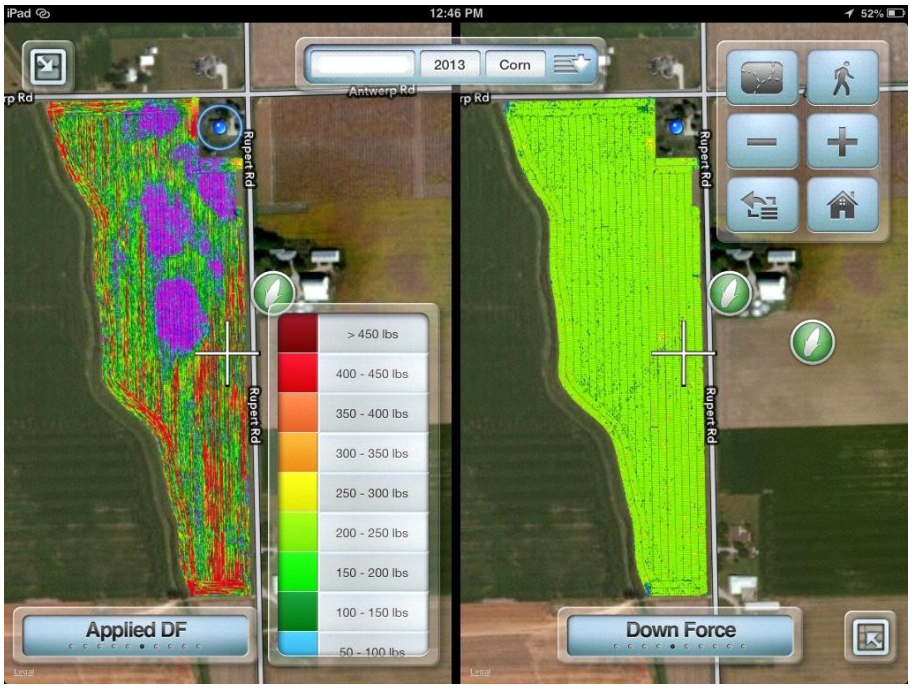


Fig. 11. Delta Force system with FieldView option

The Delta Force system consists of hydraulic cylinders and strain gauges to determine the applied force. Can be installed on most models of John Deere, Case IH and Kinze planters and some models of White and Monosem.

All data during seeding is transmitted to the 20/20 SeedSense monitor. But if you additionally use the FieldView option, you can view sowing maps with the downforce displayed on them. For example, on the left side of Figure 11, we can see how Delta Force "controls" the pressing force on each row for the optimal seeding depth (different colors

indicate changes in the applied force). At the same time, on the right, you can assess the quality of sowing: there are practically no blue areas where the contact of the planter with the ground was lost, and red areas with excess pressure.

Conclusions

In the complex of works on the cultivation of agricultural crops, high-quality sowing is the most important factor in laying a high harvest. It is the uniform depth of seed wrapping that ensures friendly sprouting of plants and the absence of variegation. It is the automated systems for changing the pressing force in planters that best take into account variations in the type of soil (in contrast to mechanical and pneumatic systems). By working with a dealer of reliable precision farming equipment, farmers can already set up equipment for sowing with the ideal depth and maximum consideration of the conditions in a particular field.

References

1. Osadchii I.O. General provisions for improving the machine use of chemical plant protection technology. Kramarov readings: 10th International Scientific and Technical Conference, Moscow. Kyiv, February 23-24, 2023: abstracts of the conference. Kyiv. 2023. S. 225-228.
2. Kozachenko O.V., Syedykh K.V., Shkrehal O.M. (2021). Mathematical modeling of stability of mechanical system of discator. Machinery and Energetics. Vol. 12(4). P. 61–66.
3. Vlăduţ D.I., Biriş S., Vlăduţ V., Cujbescu D., Ungureanu N., Găgeanu I. (2018). Verification of stress by FEM analysis·M-1 echanical testing of agricultural mobile aggregates couplig device. Inmateh – Agricultural Engineering. Vol. 54, no. 1/2018, P. 37–46.
4. Gheorghe G., Lates D., Oprea C., Baltatu C. (2023). Structural and modal analysis in solidworks of agricultural plow to choose vibration system at moldboard. Engineering for Rural Development. Vol. 22. P. 872–878. DOI: 10.22616/ERDev.2023.22.TF168.
5. Rogovskii I., Titova L., Trokhaniak V., Trokhaniak O., Stepanenko S. (2019). Experimental study on the process of grain cleaning in a pneumatic microbiocature separator with apparatus camera. Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering. Vol. 12 (61). No 1. P. 117−128. https://doi.org/10.31926/but.fwiafe.2019.12.61.1.10.
6. Rogovskii I.L., Titova L.L., Trokhaniak V.I., Rosamaha Yu.O., Blesnyuk O.V., Ohiienko A.V. (2019). Engineering management of two-phase coulter systems of seeding machines for implementing precision farming technologies. INMATEH. Agricultural Engineering. Vol. 58. No 2. P. 137−146. https://doi.org/10.35633/INMATEH-58-15.
7. Rogovskii I.L. (2020). Algorithmicly determine the frequency of recovery of agricultural machinery according to degree of resource's costs. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. Vol. 11 (1). P. 155−162.
8. Rogovskii I., Titova L., Trokhaniak V., Trokhaniak O., Stepanenko S. (2020). Experimental study of the process of grain cleaning in a vibro-pneumatic resistant separator with passive weeders. Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering. Vol. 13 (62). No 1. P. 117−128.
9. Rogovskii I.L., Titova L.L., Trokhaniak V.I., Haponenko O.I., Ohiienko M.M., Kulik V.P. (2020). Engineering management of tillage equipment with concave disk spring shanks. INMATEH. Agricultural Engineering. Bucharest. Vol. 60. No 1. P. 45−52. https://doi.org/10.35633/INMATEH-60-05.

10. Rogovskii I.L. (2019). Consistency ensure the recovery of agricultural machinery according to degree of resource's costs. Machinery & Energetics. Kyiv. Ukraine. Vol. 10(4). P. 145−150. https://doi.org/10.31548/machenergy.2019.04.145-150.

11. Yablonskyi P., Rogovskii I., Sobczuk H., Virchenko G., Volokha M., Vorobiov O. (2024). Computational approach to geometric modeling of plow bodies. Journal of Engineering Sciences (Ukraine). Vol. 11(1). P. E9–E18. https://doi.org/10.21272/jes.2024.11(1).e2.

12. Golub G., Dvornyk A. (2020). Research of indicators of strip tillage. TEKA. Quarterly journal of agri-food industry. Lublin. 2020. Vol. 20. No 2. P. 83–90.

13. Nazarenko I., Mishchuk Y., Mishchuk D., Ruchynskyi M., Rogovskii I., Mikhailova L., Titova L., Berezovyi M., Shatrov R. (2021). Determiantion 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.

14. Zagurskiy O., Pokusa Z., Pokusa F., Titova L., Rogovskii I. (2020). Study of efficiency of transport processes of supply chains management under uncertainty. Monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole. ISBN 978-83-66567-13-9. 162 p.

15. Sheichenko, V., Rogovskii, I., Skoriak, Y., Petrachenko, D., Shevchuk, M., Sheichenko, D., Titova, L., Sivak, I. (2024). Defining patterns in the intensification of hemp stalk retting processes. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (1 (132)), 50–63. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.3150.

16. Rogovskii I., Sivak I., Shatrov R., Nadtochiy O. (2024). Agroengineering studies of tillage and harvesting parameters in soybean cultivation. Engineering of Rural Development. 2024. Vol. 23. P. 965-970. DOI: 10.22616/ERDev.2024.23.TF195.

17. Rogovskii I., Titova L., Ohiienko M., Sivak I., Mstowska I., Nadtochiy O., Matuhno N. (2024). Methods of production management of agrotronics of grain production by agricultural enterprises. Monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole, ISBN 978-83-66567-66-5; pp. 305, illus., tabs., bibls.

Список використаних джерел

1. Осадчий І.О. Загальні положення удосконаленння машиновикористання технології хімічного захисту рослин. Крамаровські читання: X Міжнародна науково-технічна конференція, м. Київ, 23-24 лютого 2023 року: тези конференції. Київ. 2023. С. 225-228.

2. Kozachenko O.V., Syedykh K.V., Shkrehal O.M. Mathematical modeling of stability of mechanical system of discator. Machinery and Energetics. 2021. Vol. 12(4). P. 61–66.

3. Vlăduţ D.I., Biriş S., Vlăduţ V., Cujbescu D., Ungureanu N., Găgeanu I. Verification of stress by FEM analysis·M-1 echanical testing of agricultural mobile aggregates couplig device. Inmateh – Agricultural Engineering. 2018. Vol. 54, no. 1/2018, P. 37–46.

4. Gheorghe G., Lates D., Oprea C., Baltatu C. Structural and modal analysis in solidworks of agricultural plow to choose vibration system at moldboard. Engineering for Rural Development. 2023. Vol. 22. P. 872–878. DOI: 10.22616/ERDev.2023.22.TF168.

5. Rogovskii I., Titova L., Trokhaniak V., Trokhaniak O., Stepanenko S. Experimental study on the process of grain cleaning in a pneumatic microbiocature separator with apparatus camera. Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering. 2019. Vol. 12 (61). No 1. P. 117−128. https://doi.org/10.31926/but.fwiafe.2019.12.61.1.10.

6. Rogovskii I.L., Titova L.L., Trokhaniak V.I., Rosamaha Yu.O., Blesnyuk O.V., Ohiienko A.V. Engineering management of two-phase coulter systems of seeding machines for implementing precision farming technologies. INMATEH. Agricultural Engineering. 2019. Bucharest. Vol. 58. No 2. P. 137−146. https://doi.org/10.35633/INMATEH-58-15.

7. Rogovskii I.L. Algorithmicly determine the frequency of recovery of agricultural machinery according to degree of resource's costs. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 2020. Vol. 11 (1). P. 155−162.

8. Rogovskii I., Titova L., Trokhaniak V., Trokhaniak O., Stepanenko S. Experimental study of the process of grain cleaning in a vibro-pneumatic resistant separator with passive weeders. Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering. 2020. Vol. 13 (62). No 1. P. 117−128.

9. Rogovskii I.L., Titova L.L., Trokhaniak V.I., Haponenko O.I., Ohiienko M.M., Kulik V.P. Engineering management of tillage equipment with concave disk spring shanks. INMATEH. Agricultural Engineering. 2020. Bucharest. Vol. 60. No 1. P. 45−52. https://doi.org/10.35633/INMATEH-60-05.

10. Rogovskii I.L. Consistency ensure the recovery of agricultural machinery according to degree of resource's costs. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 2019. Vol. 10(4). P. 145−150. https://doi.org/10.31548/machenergy.2019.04.145-150.

11. Yablonskyi P., Rogovskii I., Sobczuk H., Virchenko G., Volokha M., Vorobiov O. Computational approach to geometric modeling of plow bodies. Journal of Engineering Sciences (Ukraine). 2024. Vol. 11(1). P. E9–E18. https://doi.org/10.21272/jes.2024.11(1).e2.

12. Golub G., Dvornyk A. Research of indicators of strip tillage. TEKA. Quarterly journal of agri-food industry. Lublin. 2020. Vol. 20. No 2. P. 83–90.

13. Nazarenko I., Mishchuk Y., Mishchuk D., Ruchynskyi M., Rogovskii I., Mikhailova L., Titova L., Berezovyi M., Shatrov R. Determiantion 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.

14. Zagurskiy O., Pokusa Z., Pokusa F., Titova L., Rogovskii I. Study of efficiency of transport processes of supply chains management under uncertainty. Monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole. 2020. ISBN 978-83-66567-13-9. 162 p.

15. Sheichenko, V., Rogovskii, I., Skoriak, Y., Petrachenko, D., Shevchuk, M., Sheichenko, D., Titova, L., Sivak, I. Defining patterns in the intensification of hemp stalk retting processes. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. Vol. 6 (1 (132)), P. 50–63. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.3150.

16. 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. DOI: 10.22616/ERDev.2024.23.TF195.

17. Rogovskii I., Titova L., Ohiienko M., Sivak I., Mstowska I., Nadtochiy O., Matuhno N. Methods of production management of agrotronics of grain production by agricultural enterprises. Monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole, 2024; ISBN 978-83-66567-66-5; pp. 305, illus., tabs., bibls.

Petrov G.A.,
Nadykto V.T.
Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University, Zaporizhzhia city, Ukraine
E-mail:
volodymyr.nadykto@tsatu.edu.ua

PLOUGHING DEPTH STABILITY WITH FRONT PLOUGH WITHOUT SUPPORT WHEEL

https://doi.org/10.37700/ts.2024.25.110-118

UDC 631.312

Petrov G.A., Nadykto V.T. ***Ploughing depth stability with front plough without support wheel***

Abstract. *Then aggregating a front plow, an important aspect is ensuring the stability of the plowing depth. This issue becomes especially relevant if this implement does not have a support wheel. In view of this, the purpose of this article is to find out the influence of the operation of a front plow without a support wheel on the stability of the depth of soil cultivation by a plowed machine-tractor unit according to the "push-pull" scheme. Plowing was carried out by two units. One of them (option 1) had a front plow with a support wheel, and the other (option 2) had one without it. Laboratory and field studies revealed that the null hypothesis about the equality of the average values of plowing depth in the compared units is not rejected. The proof of this is the* HIP_{05} *of this statistical indicator, which is equal to 0.81 cm, which is greater than the real difference between the compared values of the plowing depth, which is 0.50 cm. It follows that the removal of the support wheel from the front plow does not lead to a significant change in the average value of the plowing depth. On the other hand, the null hypothesis about the equality of the compared variances of the plowing depth fluctuations by plowing aggregates of both options is rejected at the statistical significance level of 0.05. According to the obtained data, the actual significant Fisher's F-test at 1.69 is greater than the tabulated one, which is 1.39. In view of this, it can be stated that the use of a front plow (option 2) leads to a decrease in the dispersion of plowing vibrations in comparison with a plow unit equipped with a front plow with a support wheel (option 1). The process of fluctuating the plowing depth in MTA with a front plow without a support wheel is more low-frequency than a similar process in a plow unit with a front plow tool equipped with a support wheel. This is evidenced by both the course of the normalized spectral densities of the fluctuations of the compared dispersions and the coefficients of variation of the fluctuations of the tillage depth.*

Key words: *arable unit, longitudinal field profile, fluctuations, dispersion, normalized correlation function, normalized spectral density.*

Петров Г.А., Надикто В.Т. ***Стабільність глибини оранки агрегатом із фронтальним плугом без опорного колеса***

Анотація. *При агрегатуванні фронтального плуга важливим аспектом є забезпечення стабільності глибини оранки. Особливо актуальним це питання стає за умови відсутності у даного орного знаряддя опорного колеса. З огляду на це метою даної статті є з'ясування впливу функціонування фронтального плуга без опорного*

колеса на стабільність глибини обробітку грунту ораним машинно-тракторним агрегатом за схемою «push-pull». Оранку здійснювали двома агрегатами. У одного із них (варіант 1) фронтальний плуг був з опорним колесом, а у іншого (варіант 2) – без нього. Лабораторно-польовими дослідженнями з'ясовано, що нуль-гіпотеза про рівність середніх значень глибини оранки у порівнюваних агрегатів не відхиляється. Доказом цього є $НІР_{05}$ даного статистичного показника, яка дорівнює 0,81 см, що більше за дійсну різницю між порівнюваними значеннями глибини оранки, яка становить 0,50 см. Із цього випливає, що видалення опорного колеса у фронтального плуга не приводить до значущої зміни ним середнього значення глибини оранки. Натомість, нуль-гіпотеза про рівність порівнюваних дисперсій коливань глибини оранки орними агрегатами обох варіантів на статистичному рівні значущості 0,05 відхиляється. Згідно з отриманими даними, дійсна значина F-критерію Фішера на рівні 1,69 є більшою за табличну, яка становить 1,39. З огляду на це можна стверджувати, що використання фронтального плуга (варіант 2) обумовлює зменшення дисперсії коливань оранки у порівнянні з орним агрегатом, обладнаним фронтальним плугом з опорним колесом (варіант 1). Процес коливання глибини оранки у МТА з фронтальним плугом без опорного колеса є більш низькочастотним, ніж аналогічний процес у орного агрегату з фронтальним орним знаряддям, обладнаним опорним колесом. Доказом цього є як перебіг нормованих спектральних щільностей коливань порівнюваних дисперсій, так і коефіцієнтів варіації коливань глибини обробітку грунту.

Ключові слова: *орний агрегат, поздовжній профіль поля, коливання, дисперсія, нормована кореляційна функція, нормована спектральна щільність*.

Introduction

One of the mostof the energy-intensive operations of soil cultivation is plowing, which accounts for more than 40% of energy costs (Kraut-Cohen, J. et al., 2023) [1]. Over the years of technical progress, the design of the plow and the scheme of the plow unit have not undergone significant changes. At the same time, plowing machine-tractor units (MTA) according to the "push-pull" scheme are becoming more and more widely used. Their design feature is the presence of frontal plows (Bulgakov, V. et al., 2023) [2], which are attached to the tractor's front attachment mechanism (PNM). At the same time, the method of selecting PNM parameters is standardized (ASAE Standards S513, 2003) [3].

Usuallythe front plow is equipped with a support wheel. Its main function is to regulate the plowing depth. In addition, the support wheel of the front plow affects the dynamics of the vertical load of the wheels of the front axle of the tractor (Zhang, Sh. Et al., 2022) [4]. In case of incorrect selection of PNM parameters of the power tool and an unreasonable place for installing the support wheel of the front plow, it may not be additional loading, but on the contrary, unloading of the front steered wheels of the tractor may occur. As a result, such a result is able to condition not only the deterioration of traction and energy indicators of the plow unit according to the "push-pull" scheme, but also lead to the loss of its controllability of movement on the field's working furrow.

The work of Singh, N. & Pandey, K. (2017) [5] presents the analysis of the dynamics of the plowing process with a unit with a front plow without a support wheel. At the same time, these studies are aimed at developing a specialized computer program for calculating the forces acting on the central and lower traction of the PNM of the tractor. In view of this, the design proposed by the researchers does not contain a mechanism that would limit the depth of immersion into the soil of the frontal plow without a support wheel. Moreover, the forces and reactions from the front plow tool considered by the authors do not reflect its influence on

the amount of vertical additional load on the front axle of the tractor. Taking this into account, the analysis presented by the authors has limited application for further research.

Analysis of recent researches

A version of the operation of a plow unit with a front plow without a support wheel, devoid of the above-mentioned disadvantages, is considered in the work (Nadykto, V. et al., 2024) [6]. The authors analyzed the nature of changes in the amplitude and frequency characteristics of the vertical oscillations of the front axle of a tractor with a front implement under the influence of external disturbance. At the same time, it was established that an increase in the vertical load on the front axle of the tractor by 600 kg leads to a desired decrease in its vertical oscillations. At the same time, the estimated amplitude-frequency characteristics are practically invariant in relation to the change in the damping coefficient of the tires of the front wheels of the tractor in the range from 1 to 3 kN·s/m. At the same time, the value of the coefficient of stiffness of the tires of the front wheels of the tractor should be as small as possible, which is ensured by adjusting the air pressure in the tires.

Then aggregating a front plow, an important aspect is ensuring the stability of the plowing depth. This issue becomes especially relevant if this implement does not have a support wheel.

The aim and objectives of research

In view of this, the purpose of this article is to find out the influence of the operation of a front plow without a support wheel on the stability of the depth of soil cultivation by a plowed machine-tractor unit according to the "push-pull" scheme.

Research results

Laboratory and field dthe research was carried out with two variants of plowing machine-tractor units as part of the KhTZ-16131 tractor, the rear-mounted four-body plow PLN-4-35 and the frontal plow under the conventional brand PLN-2-35 (Fig. 1). Option 1 is an MTA, which has a front plow equipped with a support wheel. Instead, option 2 is a plow unit with a front plow without a support wheel.



Fig. 1. Experimental plow machine-tractor unit

Before conducting field research, the longitudinal profile of the field was recorded. For this purpose, the profilograph developed at Dmytro Motornyi Tavria State

Agrotechnological University was used (Fig. 2).The body of this device is mounted on a 4 m long wooden rail and is located on supports parallel to the field surface. A rotating spring-loaded lever is hinged to the body. At one end, it contacts the profile of the agricultural background through a wheel with a radius of 5 cm. A variable resistor SP-3A (Ukraine) with a nominal value of 470 Ohm is attached to the axis of the hinge of the spring-loaded lever.

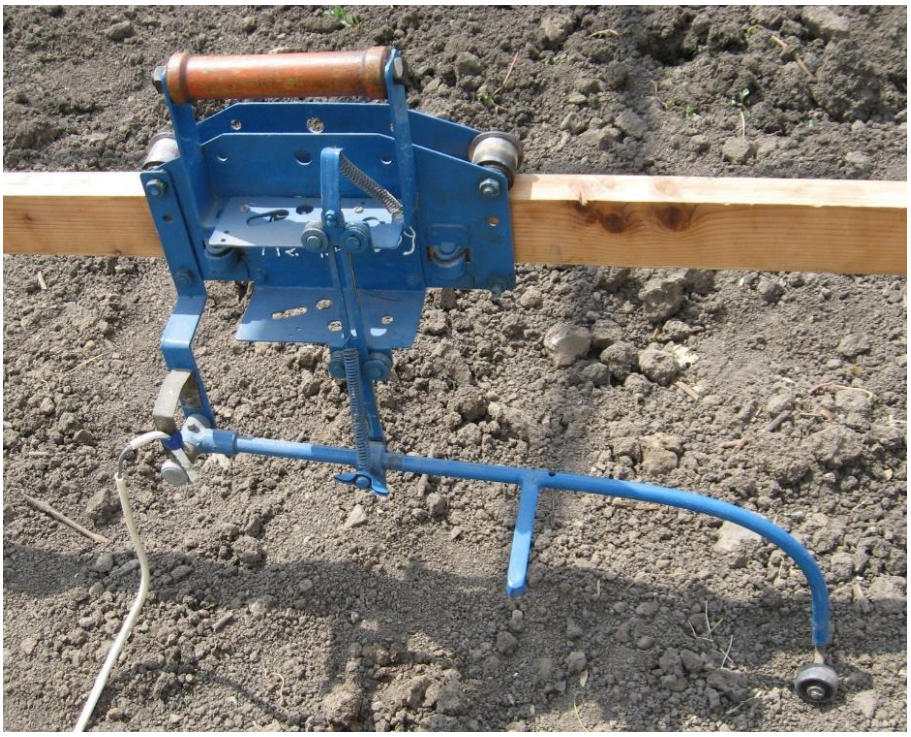


Fig. 2. Device for recording fluctuations of the profile of the field surface

During the movement of the device body along the rail, the wheel of the lever, copying the irregularities of the field profile, forces the lever to make angular oscillations (turns) relative to the axis of its suspension. When turning, the lever rotates the rotor of the SP-3A resistance, thereby changing its electrical resistance. The electrical signal from the SP-3A via the microcontroller Arduino Uno (Italy) is sent to a portable computer, where it is digitized in the form of ordinates of the field profile with the help of a specially developed program.

Fluctuations in the depth of plowing were registered by the device developed at Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University based on the Arduino Uno controller (Fig. 3). The measuring element of this device is the ultrasonic sensor HC-SR04 (China), installed in the registration and measurement unit 1 together with the Arduino and the electronic panel. Block 1 is connected to the moving rod 3.

In the process of measurements, the device was installed with support 2 on the ground, and then the rod 3 was immersed in the furrow to the depth of plowing l. Block 1 with the help of an ultrasonic sensor fixes the distance L (see Fig. 3). As $L = f(l)$, then the depth of tillage (plowing) of the soil in centimeters is displayed on the board of block 1.

Field profile fluctuations were recorded along a 30 m long field section. Measurement data were obtained at intervals of 1 s. At a speed of movement of the profilograph along the rail of approximately 0.05 m/s, this interval was 0.05 m (5 cm).

The plowing depth of each MTA was recorded on a 50 m long section every 0.2 m. The number of measurements of this parameter was at least 150. Measurements of vertical fluctuations of unevenness of the longitudinal profile of the field were carried out on stubble

of winter wheat in the conditions of southern Ukraine (Zaporizhia region, Melitopol district, Lazurne village). The obtained data made it possible to construct the normalized spectral densities of the specified oscillations (Fig. 4).

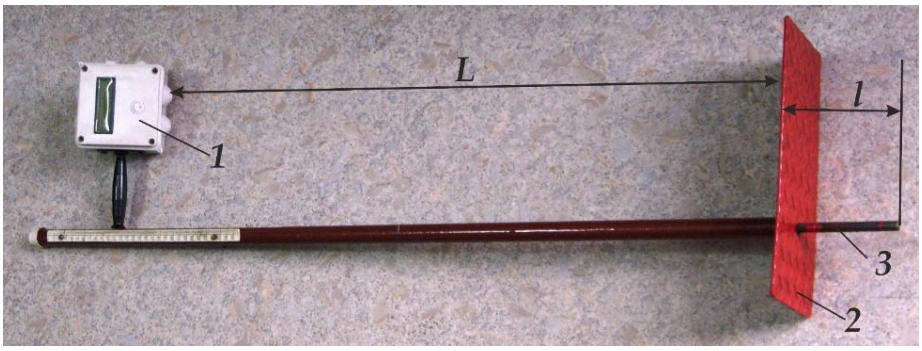


Fig. 3. Depth gauge: 1 – registration and information block; 2 - support; 3 - moving rod

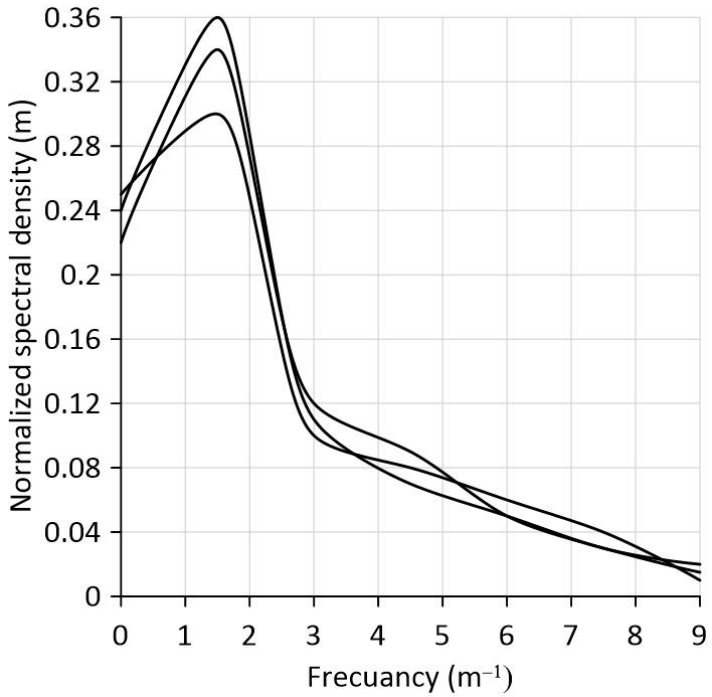


Fig. 4. Normalized spectral densities of fluctuations of the longitudinal profile of the experimental field

Analysis of these statistical characteristics shows that all of them have a cutoff frequency (ω_c) is equal to 9 m^{-1}. We will remind that the cut-off frequency is the frequency in which at least 95% of the variance or normalized spectral density of the fluctuations of the studied process is concentrated in the range of its change (Gumen M.B. et al., 2017) [7]. To translate the value of this parameter into the time dimension (s^{-1}), it (spectral density) should be multiplied by the rate of change of the process of fluctuations of the field profile irregularities. In practice, this speed will depend on the speed of movement of the plow unit (V_a).

The long-term practice of testing such MTA in the soil conditions of southern Ukraine proves that the parameter is significant Va varies within 7...9 $km \cdot h^{-1}$ or 1.94...2.50 $m \cdot s^{-1}$. In this case, at the average value of the parameter Va = 2.22 $m \cdot s^{-1}$, the cutoff frequency of the normalized spectral densities will be $=\omega_c 2.22 \cdot 9 = 19.98$ s^{-1}. In conclusion, for the implementation of theoretical and analysis of experimental data, we assume that the frequency of the disturbing influence in the form of vertical fluctuations of the irregularities of the

longitudinal profile of the treated field varies in the range of 0...9 m^{-1} in spatial dimensions, or 0...20 s^{-1} – in time dimensions.

The analysis of the obtained research results with a confidence probability of 95% proves that the null hypothesis about the equality of the average values of the plowing depth in the compared units is not rejected. The proof of this is the HIP_{05} of this statistical indicator, which is equal to 0.81 cm (Table 1). And this is more than the real difference between the compared values of plowing depth, which is 0.50 cm. It follows that the removal of the support wheel from the front plow does not lead to a significant change in the average value of the plowing depth.

Table 1

Statistical indicators of plowing depth by compared plowing machine-tractor units

Indicator	Variant of arable MTA	
	with support wheel (option 1)	without support wheel (option 2)
The average value of plowing depth, cm	25.4	25.9
Error of the average value, cm	0.28	0.30
Mean square deviation, ± cm	2.6	2.0
Dispersion, cm^2	6.76	4.00
Coefficient of variation, %	10.2	7.7
The smallest significant difference (HIP_{05}), cm	0.81	

At the same time, the null hypothesis about the equality of the compared variances of the plowing depth fluctuations with plow aggregates of both options (Table 1) is rejected. At least at the statistical significance level of 0.05. According to the obtained data, the actual significant Fisher's F-test at the level of 1.69 (6.76/4.00) is greater than the table one, which in this case is 1.39.

In view of this, it can be stated that the use of a front plow (option 2) leads to a decrease in the dispersion of plowing vibrations in comparison with a plow unit equipped with a front plow with a support wheel (option 1).

This result can be explained as follows. Provided that the front plow is equipped with a support wheel, the plow directly reacts to the fluctuations of the unevenness of the longitudinal profile of the cultivated field. On the other hand, in the absence of this wheel, fluctuations of the field profile affect the front-mounted plow implement not directly, but indirectly – that is, through the front axle of the tractor. As a result, a corresponding dynamic delay link is created, due to the manifestation of which the disturbing effect of lateral fluctuations of vertical irregularities of the path (field) profile on the front plow without a support wheel is carried out with a corresponding time delay and a certain decrease in amplitude.

It should be emphasized that dispersion is characterized both by its energy and frequency of distribution. It was established that the internal spectrum of dispersion of plowing depth fluctuations for the compared variants of plowing MTA is different. In the unit with a front plow, the length of the correlation bond(the length of the correlation bond is the abscissa of the first intersection with the normalized correlation function of the zero ordinate) of the normalized correlation function of this process is almost 0.4 m (option 1, Fig. 5).

In the aggregate of option 2, this indicator reaches the mark of 0.72 m, that is, 1.8 times larger (option 2, Fig. 5). Practically, this means that the process of fluctuating the plowing depth in a machine-tractor unit with a front plow without a support wheel is more

low-frequency than a similar process in a plowing unit with a front plow equipped with a support wheel.

Additional proof of this iscourse of the normalized spectral densities of the fluctuations of the compared dispersions (Fig. 6).

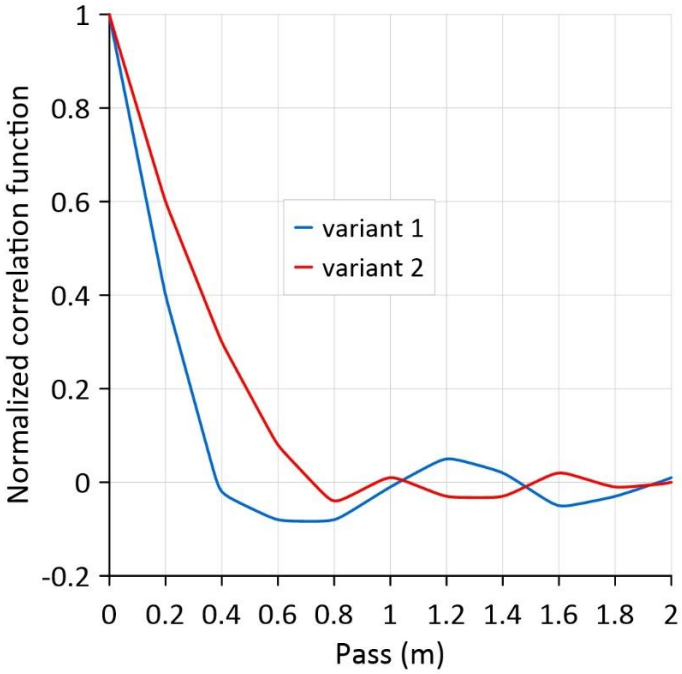


Fig. 5. Normalized correlation functions of plowing depth fluctuations by compared MTA

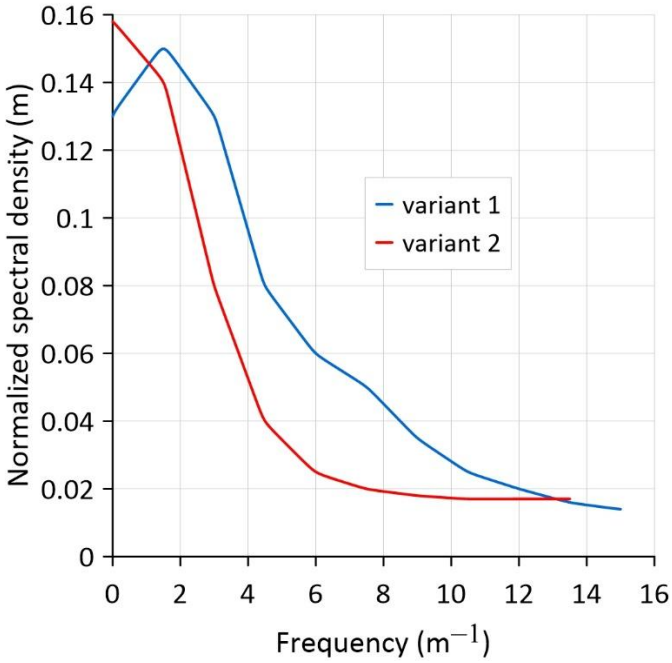


Fig. 6. Normalized spectral densities of plowing depth fluctuations by compared MTA

As evidenced by the analysis of these statistical characteristics, at least 95% of the variance of the variation of plowing depth by the unit according to option 1 is concentrated in the frequency range 0...15 m^{-1}. At the speed of movement of this MTA at the level of 2.20 $m \cdot s^{-1}$, it is 0...33 s^{-1} or 0...5.3 Hz.

In the plowing machine-tractor unit according to option 2, the main spectrum of dispersion of plowing depth fluctuations is concentrated in the range of 0...8 m^{-1} (red curve, Fig. 6). The operating speed of this MTA was at the level of 2.36 m·s-1. It follows from this that the concentration range of at least 95% of the variance of the plowing depth fluctuations with such a unit is 0...18.9 s^{-1} or 0...3.0 Hz. Compared to option 1, it is 43% less. In other words, the use of a plowing unit with a front plow without a support wheel forms a narrower (by 43%) range of plowing depth fluctuations.

Next, we note the following: the variation coefficient of plowing depth fluctuations by the unit according to option 2 is 7.7%, which is less than 10%. According to (Golub G.A., 2024) [8], this value of this statistical characteristic represents a low variable process. On the other hand, the value of the coefficient of variation at the level of 10.2% characterizes the process of fluctuations in the depth of plowing as moderately variable, which qualitatively correlates with the above correlation-spectral analysis.

Finally, we note once again that the spectrum of plowing depth fluctuations of the compared machine-tractor units is different. At the same time, for a plowing unit with a front plow with a support wheel (i.e. option 1), the spectrum of dispersion of fluctuations of the depth of plowing is approximately comparable to the spectrum of fluctuations of the unevenness of the longitudinal profile of the field (see Fig. 4). Both processes are characterized by approximately equal values of the cut-off frequencies of the corresponding normalized spectral densities, which are at the level of 9 m^{-1}.

At the same time, the range of fluctuations of plowing depth dispersions in MTA according to option 2 is somewhat narrower (0...8 m^{-1}) for the spectrum of fluctuations of field profile irregularities, which is a desirable fact.

Conclusions

1. The analysis of the obtained research results with a confidence probability of 95% proves that the null hypothesis about the equality of the average values of the plowing depth in the compared units is not rejected. The proof of this is the HIP_{05} of this statistical indicator, which is equal to 0.81 cm, which is greater than the real difference between the compared values of the plowing depth, which is 0.50 cm. It follows that the removal of the support wheel from the front plow does not lead to a significant change in the average value of the plowing depth.

2. The null hypothesis about the equality of the compared variances of the fluctuations of the depth of plowing by plowing aggregates of both options is rejected at the statistical significance level of 0.05. According to the obtained data, the actual significant Fisher's F-test at 1.69 is greater than the tabulated one, which is 1.39. In view of this, it can be stated that the use of a front plow (option 2) leads to a decrease in the dispersion of plowing vibrations in comparison with a plow unit equipped with a front plow with a support wheel (option 1).

3. The process of plowing depth fluctuations in MTA with a front plow without a support wheel is more low frequency than a similar process in a plowing unit with a front plow tool equipped with a support wheel. This is evidenced by both the course of the normalized spectral densities of the fluctuations of the compared dispersions and the coefficients of variation of the fluctuations of the tillage depth.

References

1. Kraut-Cohen, J., Zolti, A., Shaltiel-Harpaz, L., Argaman, El., Rabinovich, R., Green, SJ, Minz, D. (2023). Effects of tillage practices on soil microbiome and agricultural

parameters. Science of The Total Environment. Vol. 705. P. 135791. doi.org/10.1016/j. scitotenv.2019.135791.

2. Bulgakov, V., Ivanovs, S., Nadykto, V., Petrov, G. (2023). Investigation of front plow functioning stability conditions without support wheel: Engineering for Rural Development. Vol. 22. P. 562–570. doi.org/10.22616/ERDev.2023.22.TF116.

3. ASAE Standards S513. (2003). Agricultural wheeled tractors – Front-hitched three-point linkage. St. Joseph, Michigan: ASAE.

4. Zhang, Sh., Xie, B., Wen, Ch., Zhao, Y., Du, Yu., Zhu, Zh., Song, Zh., Li, L. (2022). Intelligent ballast control system with active load-transfer for electric tractors. Biosystems Engineering. Vol. 215. P. 143–155. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng. 2022.01.008.

5. Singh, N., Pandey, K. (2017). Development of visual basic program to design front mounted three-point linkage for higher power tractors. Adv. Res. Vol. 11. P. 1–10. doi.org/ 10.9734/air/2017/35767.

6. Nadykto, V., Golub, G., Kyurchev, V., Tsyvenkova, N., Petrov, G., Yarosh, Y. (2024). Determining vertical oscillations of front-plow tractor without support wheel. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 1 (7 (127)). P. 37–47. doi.org/10.15587/ 1729-4061.2024.296842.

7. Humen M.B., Spivak V.M., Meshchaninov S.K., Vlasyuk H.G., Humen T.F. (2017). Basics of the theory of processes in information systems. Book 1. Analysis of deterministic processes. Kyiv. Kafedra. 281 p.

8. Golub G.A. (2024). Basics of scientific research. Kyiv. NUBiP of Ukraine. 240 p.

Список використаних джерел

1. Kraut-Cohen, J., Zolti, A., Shaltiel-Harpaz, L., Argaman, El., Rabinovich, R., Green, SJ, Minz, D. Effects of tillage practices on soil microbiome and agricultural parameters. Science of The Total Environment. 2023. Vol. 705. P. 135791. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135791.

2. Bulgakov, V., Ivanovs, S., Nadykto, V., Petrov, G. Investigation of front plow functioning stability conditions without support wheel: Engineering for Rural Development. 2023. Vol. 22. P. 562–570. doi.org/10.22616/ERDev.2023.22.TF116.

3. ASAE Standards S513. Agricultural wheeled tractors – Front-hitched three-point linkage. 2003. St. Joseph, Michigan: ASAE.

4. Zhang, Sh., Xie, B., Wen, Ch., Zhao, Y., Du, Yu., Zhu, Zh., Song, Zh., Li, L. Intelligent ballast control system with active load-transfer for electric tractors. Biosystems Engineering. 2022. Vol. 215. P. 143–155. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.01. 008.

5. Singh, N., Pandey, K. Development of visual basic program to design front mounted three-point linkage for higher power tractors. Adv. Res. 2017. Vol. 11. P. 1–10. doi.org/10.9734/air/2017/35767.

6. Nadykto, V., Golub, G., Kyurchev, V., Tsyvenkova, N., Petrov, G., Yarosh, Y. Determining vertical oscillations of front-plow tractor without support wheel. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. (2024. Vol. 1 (7 (127)). P. 37–47. doi.org/10. 15587/1729-4061.2024.296842.

7. Гумен М.Б., Співак В.М., Мещанінов С.К., Власюк Г.Г., Гумен Т.Ф. Основи теорії процесів в інформаційних системах. Книга 1. Аналіз детермінованих процесів. Київ. Кафедра. 2017. 281 с.

8. Голуб Г.А. Основи наукових досліджень. Київ. НУБіП України. 2024. 240 с.

Syman I.V.
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
E-mail:
syman.ivan@gmail.com

ANALYSIS OF METHODS OF TESTING CABINS OF GRAIN HARVESTING COMBINERS

https://doi.org/10.37700/ts.2024.25.119-129

УДК 621.891

Syman I.V. ***Analysis of methods of testing cabins of grain harvesting combiners***

Abstract. *The article examines and analyzes the existing methods of testing cabins for durability and methods of evaluating the visibility of cabins. The national standard of Ukraine DSTU ISO 5700:2004 establishes the static load test method and the conditions for acceptance of protective structures (cabins or frames) of wheeled combines for agriculture and forestry. The national standard of Ukraine DSTU ISO 3463:2015 establishes the method of dynamic testing, the conditions of acceptance of protective structures for protection during overturning (cabin or frame) of agricultural and forestry wheeled combines. Practical testing using various stands, taking into account the requirements of regulatory documents for the characteristics of the impact of testing equipment on the protective structure, allows you to check theoretical patterns, assess the compliance of the cabin design, establish the actual value of absorbed energy from the applied load, work out the stages of applying loads in practice and check the accuracy of the measurement system. Visibility from the operator's workplace" establishes requirements, test methods and acceptance criteria for the operator's visibility. The design and equipment of the harvester must ensure the appropriate visibility of the operator when driving on public roads and when performing fieldwork. Visibility is considered appropriate if the operator is provided with at least partial visibility of each front wheel or wing when moving in a straight line and with a track width that corresponds to the total width of the combine with single wheels no more than 2.55 m.*

Key words: *protective structure, statistical load, dynamic load, visibility, testing.*

Симан І.В. ***Аналіз методів випробування кабін зернозбиральних комбайнів***

Анотація. *В статті розглянуто та проаналізувато наявні методи випробування кабін на міцність та методи оцінки оглядовості кабін. Національний стандарт України ДСТУ ISO 5700:2004 установлює метод випробування статичним навантаженням та умови приймання захисних конструкцій (кабін чи каркасів) колісних тракторів для сільського господарства та лісогосподарства. Національний стандарт України ДСТУ ISO 3463:2015 установлює метод динамічного випробування, умови приймання захисних конструкцій для захисту під час перекидання (кабіна чи каркас) сільськогосподарських і лісогосподарських колісних комбайнів. Практичне виконання тестувань за допомогою різних стендів з урахуванням вимог нормативних документів до характеристик впливу випробувального обладнання на захисну конструкцію дозволяє перевіряти теоретичні закономірності, оцінювати відповідність конструкції кабіни, встановлювати фактичне значення поглиненої енергії від прикладеного навантаження, опрацьовувати етапи прикладання навантажень на практиці та перевіряти точність системи вимірювань. Оглядовість з робочого місця оператора» встановлює вимоги, методи випробувань та критерії приймання оглядовості*

оператора. Конструкція і обладнання комбайна повинні забезпечувати відповідну оглядовість оператора при русі по дорогах загального користування і при виконанні польових робіт. Оглядовість вважається відповідною, якщо оператору забезпечена як мінімум часткова видимість кожного переднього колеса або крила при русі по прямій та при ширині колії, яка відповідає загальній ширині комбайна з одинарними колесами не більше 2,55 м.

Ключові слова: *захисна конструкція, статистичне навантаження, динамічне навантаження, оглядовість, випробування.*

Introduction

Combine harvesters are important vehicles for agriculture. During operation, these vehicles usually overcome terrain obstacles, work on slopes. Such conditions create a high risk of instability and overturning. For the operator, this threatens serious consequences – receiving serious injuries or fatalities. To increase the safety of the driver, all combines and combines must have a protective structure.

Along with the requirement to equip combines with protective structures against overturning, developers face the optimization task of ensuring safety criteria and minimum material consumption of the structure. The task became the subject of numerous scientific studies, experiments and tests [1].

Since 80% of the information about the operation of the machine is obtained by the operator as a result of visual observation, it is extremely important to ensure full visibility from the cab not only forward, but also so that he can observe the work process, working bodies, and vehicles moving nearby. Ensuring visibility from the operator's workplace is included among the main ergonomic requirements, as well as the most important operational indicators of combine harvesters [2].

Analysis of recent researches

The national standard of Ukraine DSTU ISO 5700:2004 establishes the static load test method and the conditions for acceptance of protective structures (cabins or frames) of wheeled combines for agriculture and forestry [3]. The national standard of Ukraine DSTU ISO 3463:2015 establishes the method of dynamic testing, the conditions of acceptance of protective structures for protection during overturning (cabin or frame) of agricultural and forestry wheeled combines (4). DSTU ISO 5721:2012 "Agricultural combines. Visibility from the operator's workplace" establishes requirements, test methods and acceptance criteria for the visibility of the operator of agricultural combines [5]. Researchers are guided by the requirements of these documents when conducting tests [6-18].

The aim and objectives of research

To consider and analyze the existing methods of testing cabins for strength and methods of evaluating the visibility of cabins.

Research results

Reproducing the conditions of a combine overturning with the help of test equipment requires obtaining the maximum reliability in order to make a conclusion about the conformity of the protective structure. At this time, the main methods of testing the operator's protective structures – static and dynamic – have been approved.

According to DSTU ISO 5700:2004 [3], horizontal loading tests and compression tests are carried out.

The test method involves the sequence of loading the protective structure of the operator on the stand - from the side, back, front and top.

The test must be carried out in accordance with the procedures in the following sequence:

1) The first longitudinal loading (for a combine with at least 50% of the weight on the rear wheels, the longitudinal load must be applied from the rear, for other combines, the longitudinal load must be applied from the front);

2) The first compression test (the load during the first compression test must be applied to the edge of the protective structure to which the first longitudinal load was applied;

3) Loading from the sides (in the case of a displaced driver's seat or a protective structure of asymmetrical strength, the loading from the sides occurs on the side of the most likely violation of the free space zone);

4) The second compression test (must be carried out on the side of the protective structure, opposite to the one to which the first longitudinal load was applied);

5) Second longitudinal load (the second longitudinal load is applied in combines manufactured with an open protective structure, only if the longitudinal force, according to 1), was not applied in the direction in which the protective structure is thrown).

There is a wide variety of structural schemes of frames and cabs, separate nodes and parts of protective devices, fastening of frames and cabs to the frame of the combine, which dampen the dynamic loads of the devices. Despite the great variety, all basic schemes of protective frames are classified according to the design and number of vertical power elements. Protective devices can be divided into two types: two-post and multi-post frames, which are built into the cabin or surround it along its contour [1].

The purpose of the research of the group of researchers of DNU "UkrNDIPVT named after L. Pohorily [1] was the development of technical support for tests of cabins or frames of wheeled combines with a static load.

The main purpose of the protective structure of the operator is to maintain the zone of free space for the operator during the absorption of external energy in the event of a rollover, therefore it is necessary that the materials, equipment and fasteners ensure the rigid fixation of the protective structure of the operator, mounted on the basis of the combine frame with a suspension system, and all the energy applied from the loading equipment was perceived only by the cabin and its rigid elements.

The impact of test equipment on cabins or frames is determined by the design of loading devices, the essential requirements for which are specified in the normative document on the test method [3], which served as a task for the development of technical support.

The developed and manufactured technical tool for testing the protective structures of wheeled combines with a static load is designed to carry out the following types of tests in accordance with DSTU ISO 5700:2004 [3]:

- Horizontal load test – application of horizontal load at the back, front and side of the protective structure;
- Compression test – application of a vertical load through a beam located on top of the upper part of the protective structure (1).

Technical characteristics of the developed UkrNDIPVT named after L. Pogorily stand for tests of cabins and frames of wheeled combines with static load is given in Table 1.

Further practical testing with the help of this stand, taking into account the requirements of the method for the characteristics of the impact of the test equipment on the protective structure, will allow to check the theoretical laws, evaluate the compliance of the cabin structure, establish the actual value of the absorbed energy from the applied load, work

out the stages of applying loads in practice and check the accuracy of the measurement system.

Table 1

Technical characteristics of the stand

No	The name of the indicator	The value of the indicator
1	The range of height change of the horizontal loading device, mm	100-3400
2	The range of height changes of the vertical load bar, mm	1500-2620
3	Means of creation of efforts	High pressure hydraulic cylinders
4	Energy source	Hydro station
5	Effort range, kg: - horizontal - vertical	 0...30160 0...21300
6	The number of tensometric links	3
7	Electric signal converter	Complex "Spider-8"
8	Device for processing information	Personal computer
9	Software	Microsoft Excel, Catman Express 4.5

The purpose of another study of the UkrNDIPVT named after L. Pohorily [3] determined cabin deformation indicators using standardized methods and developed technical means.

The tests were carried out in accordance with the methods specified in DSTU ISO 5700:2004 withusing a load stand, pressure and displacement sensors, a Spider 8 digital measuring amplifier and a laptop.

The protective structure AI.209.45.011.OO of the cabin of combines type C25 "Slobozhanets" was provided for testing.

Before conducting the tests, the dimensions of the protective structure of the cabin were measured and recorded. During the first longitudinal load, the load was applied to the upper transverse element of the protective structure from the front to the right. The point of application of the load was at a distance of 260 mm from the outer corner of the edge of the protective structure. Uniform distribution of the load in the direction perpendicular to the direction of action and along the loading beam was ensured using a sealing element. The value of the energy absorbed by the protective structure was 13100 J (required energy – 12586 J) with a maximum applied force of 82 kN and a displacement of 340 mm. During the first and second compression test, the structure was loaded vertically with a force of 180 kN along the front and rear upper transverse elements of the protective structure, withstanding the indicated force for 5 s. The side load was applied horizontally to the upper right longitudinal element of the protective structure at a distance of 85 mm forward from the control point of the driver's seat. The length of the loading beam was 600 mm. The value of the energy absorbed by the protective structure was 17,000 J (required energy – 15,732 J) with a maximum applied force of 80 kN and a displacement of 290 mm. After carrying out all stages of the tests, the front extreme point of the protective structure experienced the largest movement back – 70 mm, the front left point – 35 mm. The rear extreme points in the rear direction were also accommodated by 45 mm – right and 30 mm – left. In the lateral direction,

the front right extreme point moved forward by 15 mm. After the tests, the free space zone was not violated.

The methods and technical means used during the tests make it possible to determine the amount of applied forces and deformation with the necessary accuracy and reliability.

During the compression tests, the values of the test force (180 kN) were reached, and during the application of horizontal loads – the energy absorbed by the protective structure (13100 J – longitudinal load and 17000 J – lateral load).

The protective structure at the front extreme point experienced the greatest final deformation - 70 mm, under such conditions, there was no violation of the driver's free space zone by the elements of the protective structure.

Therefore, the protective structure AI.209.45.011.00 of the cabin of combines type C25 "Slobozhanets" passed static tests for compliance with DSTU ISO5700.

In another [7] study, the static load test of combine cabs is modeled by the finite element method in accordance with the standardDSTU EN ISO 3471:2014 Earth-moving machines. Overturn protection devices. Technical requirements and laboratory tests (EN ISO 3471:2008, IDT). The analysis was carried out using software based on the principle of operation of the load-carrying mechanism in order to simulate test loads. The finite element model is constrained by the connection points of the frame, and deformations are investigated for three loading conditions.

Before the physical tests, a finite-element model of the cabin was prepared and an analysis was carried out. In this way, precautions were taken on areas that could cause problems during testing and time was saved.

The national standard of Ukraine DSTU ISO 3463:2015 establishes the method of dynamic testing, the conditions of acceptance of protective structures for protection during overturning (cabin or frame) of agricultural and forestry wheeled combines [4]. The standard applies to combines with at least two axles, equipped with wheels with pneumatic tires, both with and without tracks, with a total mass between 600 kg and 6000 kg. The minimum track width of the rear wheels should normally be more than 1150 mm.

The standard provides impact tests (front and rear impact tests, side impact tests) and crumple tests.

Test methodology. Combines with less than 50% of the mass on the front axle must be tested in the following sequence:

- blow from behind;
- crumpling of the rear part of the structure for protection during overturning;
- impact from the front;
- side impact;
- crumpling of the front part of the structure for protection during overturning

Testing of combines. In which 50% or more of the mass is on the front axle, it is necessary to perform in the following sequence:

- hit from the front;
-sideswipe;
- crumpling of the rear part of the structure for protection during overturning;
- crumpling of the front part of the structure for protection during rollover.

It is not permissible to repair or straighten any structural elements in the period between tests.

The induced energy absorbed by the overturning protection structure during the test is recorded and calculated, in joules, by the formula:

$$E=19.6\,N, \quad (1)$$

where N is the lifting height of the pendulum shock block.

The seat reference point (SCP) must be determined in accordance with ISO 5353.

In the case of a sprung seat, the shock absorbers must be adjusted according to the seat manufacturer's instructions. If there are no such instructions, the seats are fixed in the middle of the stroke of the shock absorbers.

After installing the seat on the combine, the CTS becomes fixed in relation to the combine and does not depend on the horizontal and vertical adjustments of the seat.

The zone of free space is determined with respect to the reference plane and the CTS. The reference plane is a vertical plane that is usually located along the combine and passes through the CTS and the center of the steering wheel. Usually the plane coincides with the longitudinal plane of symmetry of the combine. This plane is horizontal when the seat or steering wheel is moved during loading, but remains perpendicular to the combine or the base of the structure for rollover protection.

A rollover protection structure can be adopted only if the following requirements are met:

- no parts of the combine should penetrate into the zone of free space. No parts of the combine must touch the seat during the test. In addition, the free space zone must not be disturbed by external elements of the rollover protection structure.

- the structure for protection during overturning and the combine after each test must be visually inspected for cracks and tears. The following conditions must be met:

a) there should be no cracks in structural elements, fastening elements and parts of the combine that provide structural strength for protection during overturning;

b) there should be no cracks in the welded joints, which ensure the strength of the structure for protection during overturning, or in its fastening elements;

c) energy-absorbing gaps in the metal sheets of the structure are acceptable provided that, according to the testing laboratory, they do not have a significant effect on reducing the deformation resistance of the structure for protection during overturning.

During the test, the elastic deformation shall not exceed 250 mm in the horizontal plane which coincides with the upper bounding surface of the free space zone.

Visibility is an important characteristic of cabins— objective ability to see road conditions from the place the driver.

DSTU ISO 5721:2012 "Agricultural combines. Visibility from the operator's workplace" establishes requirements, test methods and acceptance criteria for the visibility of the operator of agricultural combines [5].

The design and equipment of the combine must provide the operator with adequate visibility when driving on public roads and when performing field work. Visibility is considered adequate if the operator is provided with at least partial visibility of each front wheel or wing when moving in a straight line and with a track width that corresponds to the total width of the combine with single wheels of no more than 2.55 m.

Shading zones should not be more than 700 mm, it is permissible to have shading zones of no more than 1500 mm, if the structural elements that create them cannot be of a different shape and cannot be placed in a different way.

If the combine has a windshield, it must be equipped with one or more mechanically driven windshield wipers.

The following methods of visibility (front field of view) tests are regulated.

Visibility check. The combine must be placed on a horizontal surface. On the horizontal stand, which is placed at the level of the operator's eye point, two point light sources are placed, which are placed symmetrically with respect to the base point at a distance of 65 mm from each other. It is necessary that the stand can rotate around a vertical axis that passes through the base point. When measuring shading zones, the stand must be turned so that the line that connects the point light sources is perpendicular to the line that connects the element that obstructs the view and the point of placement of the operator's eyes.

It is also necessary to conduct additional tests if there are design features. From the previous position, the light sources are shifted to the side, first to one side, then to the other, until the shadowed area from each structural element that interferes with the view becomes the smallest on the semicircle of view. Areas determined in this way are taken as shading zones. It is also possible to carry out a mathematical calculation of shading zones (instead of the described tests). With binocular examination and the distance between the eyes equal to 65 mm, the size of the shading zone x, mm, is calculated by the formula:

$$X = [(b - 65) / a] \times 12000 + 65, \quad (2)$$

where *a* is the distance between the structural element that obstructs the view and the operator's eye placement point, measured along the line of sight that connects the operator's eye placement point, the center of the element, and the perimeter of the viewing semicircle, mm;

b – the width of the structural element that obstructs the view, measured in a horizontal plane perpendicular to the line of sight, mm.

Acceptance criteria for testing are:

- the distance between the centers of the shading zones, measured along the chord of the viewing semicircle, should not be more than 2500 mm;
- on combines with a maximum design speed of ≤25 km/h, shading zones should not exceed 5500 mm and the distance between shading zones should $b_e \geq 1300$ mm;
- on combines with a maximum design speed >25 km/h, shading zones should not exceed 4500 mm and the distance between shading zones should $b_e \geq 1300$ mm;
- the distance between the vertical transverse planes that pass through the extreme front point of the combine chassis or radiator grille and through the center of the steering wheel, or in its absence through the base point >3500 mm.

The rear lateral field of vision must provide visibility of at least flat horizontal areas on both sides behind the combine at a height of 1 m above the level of the supporting surface, 5 m wide from a plane parallel to the vertical longitudinal plane of the combine and passing through the extreme lateral point starting behind 30 m behind the point of the operator's eyes.

Visibility of the area on both sides of the combine at a height of 1 m above the level of the supporting surface, from a plane that is parallel to the vertical longitudinal plane of the combine and passing through the extreme lateral point that begins 4 m behind the vertical transverse plane, must also be ensured. What passes through the point of placement of the operator's eyes.

The lateral field of view must provide visibility, at least, of flat horizontal areas at a height of 1 m above the level of the supporting surface, which are limited by:

- a plane that is parallel to the vertical longitudinal plane of the combine and is at a distance of 0.5 m from its extreme side point;
- a plane that is parallel to the vertical longitudinal plane of the combine and is at a distance of 2 m from its extreme side point;
- a plane that is parallel to the vertical transverse plane that passes through the point of placement of the operator's eyes and is 1.75 m behind this plane;
- a plane that is parallel to the vertical transverse plane that passes through the point of placement of the operator's eyes and is 1 m ahead of this plane.

Methods of side and rear field of view tests.

Conditions for checking the side and rear field of view.

The combine must be placed on a horizontal surface. On the horizontal stand, which is installed at the level of the operator's eye placement point, two point light sources are placed, which are installed symmetrically with respect to the operator's eye placement point at a distance of 65 mm from each other. It is necessary that the stand can rotate around a vertical axis. What passes through the point of placement of the operator's eyes. To determine the

blackout zones, the stand must be turned in such a way that the simultaneous or alternating switching on of the light sources allows to determine the blackout zones in the field of view that is checked, at a height of 1 m from the supporting surface. It is allowed to shift the stand with light sources to the left or right by a distance of no more than 170 mm. Checking the field of view can be carried out, for example, by moving the mirror at a height of 1 m over the entire field of view to be checked. The mirror should be turned so that the light sources are visible in it.

Acceptance criteria of the field of direct view. When conducting the described tests, there should be no darkening zones at a height of 1 m from the support surface in the field of view that is being checked. When performing lateral field of vision tests, the areas of shading must not exceed 10% of the field of vision tested on each side of the combine, and the 300 mm diameter test object must not be completely covered by each area of obscuration in each field of vision tested.

In work [9]a system for measuring the visibility of agricultural combine operators was developed and evaluated according to ISO 5006 and ISO 5721 standards, and a blind spot diagram around the test combine was created.

Two light bulbs were used to simulate the eyes of the operator, they were attached to a beam with a supporting frame. A wooden frame was used to determine the position of the supporting point of the seat. The 12 m visibility test circle was divided into six viewing sectors, and the test combine was placed in the center of the circle. Artificial light was provided in a darkened environment, and shadow or masking effects were measured manually at a distance of 12 meters around.

Results: When the bulbs were placed at the operator's eye level, forward visibility was good; no dimming was detected in the field of view "A", but larger widths of dimming were detected in the fields of view "B" and "C". As the blackout width exceeded 700 mm, additional tests were performed, such as moving the light sources to either side of the operator's eye level. Less than six dimming effects were detected in the semicircle of front view, and more than one dimming effect was detected in the "B" and "C" fields of view. A diagram of blind spots and specular visibility was created to determine the exact nature.

In work [2], a method of obtaining experimental data was developed, which allowsto obtain accurate results of the study of shaded viewing areas when designing a combine cabin at the stage of developing a layout, without making prototypes in kind and conducting experimental studies aimed at the feasibility of using the cabin that is being developed.

Conclusions

1. The biggest hazard for vehicles used in agricultural land is rollover. The requirements approved by regulatory documents provide that all combines must have a protective structure. Technical support for tests of protective structures of the operator (cabin) in case of overturning within the scope of the distribution of regulatory documents, which define the method of static testing and the method of dynamic testing, can be implemented by various technical solutions.

2. Visibility assessment is an effective way to ensure proper and safe work for combine drivers. Incorporating visibility tests into the overall testing process can help combine manufacturers design safe and ergonomic cab designs.

3. This analysis will be used in the further planning and development of parameters and modes of testing of the protective structures of the operator (cabins) and the development of improved methods for assessing the visibility of the cabins.

References

1. Karpenko A., Gaponenko O., Ivanenko I. (2021). Technical support for tests of cabins and frames of wheeled combines with static loading. Agricultural machinery and equipment: forecasting, design, testing. No. 23 (37). P. 61–72.

2. Rogovskii I.L. Algorithmicly determine the frequency of recovery of agricultural machinery according to degree of resource's costs. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 2020. Vol. 11 (1). P. 155−162.

3. Agricultural and forestry wheeled combines. (2006). Protective structures. Static test method and acceptance conditions: DSTU ISO 5700:2004 (ISO 5700:1989, IDT). [Effective from 2005-01-01]. Kyiv. Derzhspozhivstandard of Ukraine. 10 p. (National Standard of Ukraine).

4. Agricultural and forestry wheeled combines. (2015). Structures for protection during rollover. Dynamic test method and acceptance conditions: DSTU ISO 3463:2015 (ISO 3463:2006, IDT). [Effective from 2015-09-21]. Kyiv. Derzhspozhivstandard of Ukraine, 2017. 21 p. (National Standard of Ukraine).

5. Agricultural combines. (2013). Visibility from the operator's workplace: DSTU ISO 5721:2012 (ISO 5721:1989, IDT). [Effective from 2013-05-01]. Kyiv. Derzhspozhivstandard of Ukraine, 2012. 21 p. (National Standard of Ukraine).

6. Postelga S. (2022). Results of static tests of protective structures of agricultural combine cabins. Agricultural machinery and equipment: forecasting, design, testing. No. 29 (43). P. 75−85.

7. Selen Sagsoz Karakulak, Emre Yetkin. (2020). Agricultural combine cabin safety analysis and test correlation. International Journal of Automotive Science and Technology. Vol. 4. Issue 1. P. 1−9.

8. Girutski I.I., Senkov A.G. (2019). Computerized test bench for combine cabs. International scientific journal "Mechanization in Agriculture & Conserving of the Resources". Issue 3. P. 88−89.

9. Md. Shaha Nur Kabir, Mingzhang Song, Sun-Ok Chung, Yong-Joo Kim, Su-Chul Kim, Jong-Kyou Ha. (2015). Visibility evaluation for agricultural combine operators according to ISO 5006 and 5721-1. Standards. Journal of Biosystems Engineering. Vol. 40(1). P. 19−27.(2015.3).

10. Rogovskii I., Titova L., Trokhaniak V., Trokhaniak O., Stepanenko S. (2020). Experimental study of the process of grain cleaning in a vibro-pneumatic resistant separator with passive weeders. Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering. Vol. 13 (62). No 1. P. 117−128.

11. Rogovskii I.L., Titova L.L., Trokhaniak V.I., Haponenko O.I., Ohiienko M.M., Kulik V.P. (2020). Engineering management of tillage equipment with concave disk spring shanks. INMATEH. Agricultural Engineering. Bucharest. Vol. 60. No 1. P. 45−52. https://doi.org/10.35633/INMATEH-60-05.

12. Rogovskii I.L. (2019). Consistency ensure the recovery of agricultural machinery according to degree of resource's costs. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. Vol. 10(4). P. 145−150. https://doi.org/10.31548/machenergy. 2019.04.145-150.

13. Yablonskyi P., Rogovskii I., Sobczuk H., Virchenko G., Volokha M., Vorobiov O. (2024). Computational approach to geometric modeling of plow bodies. Journal of Engineering Sciences (Ukraine). Vol. 11(1). P. E9–E18. https://doi.org/10.21272/jes.2024. 11(1).e2.

14. Nazarenko I., Mishchuk Y., Mishchuk D., Ruchynskyi M., Rogovskii I., Mikhailova L., Titova L., Berezovyi M., Shatrov R. (2021). Determiantion 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.

15. Zagurskiy O., Pokusa Z., Pokusa F., Titova L., Rogovskii I. (2020). Study of efficiency of transport processes of supply chains management under uncertainty. Monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole. ISBN 978-83-66567-13-9. 162 p.

16. Sheichenko, V., Rogovskii, I., Skoriak, Y., Petrachenko, D., Shevchuk, M., Sheichenko, D., Titova, L., Sivak, I. (2024). Defining patterns in the intensification of hemp stalk retting processes. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 6 (1 (132)), P. 50–63. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.3150.

17. Rogovskii I., Sivak I., Shatrov R., Nadtochiy O. (2024). Agroengineering studies of tillage and harvesting parameters in soybean cultivation. Engineering of Rural Development. 2024. P. 965–970. DOI: 10.22616/ERDev.2024.23.TF195.

18. Rogovskii I., Titova L., Ohiienko M., Sivak I., Mstowska I., Nadtochiy O., Matuhno N. (2024). Methods of production management of agrotronics of grain production by agricultural enterprises. Monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole, ISBN 978-83-66567-66-5; pp. 305, illus., tabs., bibls.

Список використаних джерел

1. Карпенко А., Гапоненко О., Іваненко І. Технічне забезпечення випробувань кабін та каркасів колісних тракторів статичним навантеженням. Agricultural Machinery and Equipment: Forecasting, Design, Testing. № 23 (37). С. 61–72.

2. Rogovskii I.L. Algorithmicly determine the frequency of recovery of agricultural machinery according to degree of resource's costs. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 2020. Vol. 11 (1). P. 155−162.

3. Сільськогосподарські та лісогосподарські колісні трактори. Захисні конструкції. Метод статичного випробовування та умови приймання: ДСТУ ISO 5700:2004 (ISO 5700:1989, IDT). [Чинний від 2005-01-01]. Київ. Держспоживстандарт України, 2006. 10 с. (Національний стандарт України).

4. Сільськогосподарські та лісогосподарські колісні трактори. Конструкції для захисту під час перекидання. Метод динамічного випробування та умови приймання: ДСТУ ISO 3463:2015 (ISO 3463:2006, IDT). [Чинний від 2015-09-21]. Київ. Держспоживстандарт України, 2017. 21 с. (Національний стандарт України).

5. Трактори сільськогосподарські. Оглядовість з робочого місця оператора: ДСТУ ISO 5721:2012 (ISO 5721:1989, IDT). [Чинний від 2013-05-01]. Київ. Держспоживстандарт України, 2012. 21 с. (Національний стандарт України).

6. Постельга С. Результати статичних випробувань захисних конструкцій кабін сільськогосподарських тракторів. Agricultural Machinery and Equipment: Forecasting, Design, Testing. 2022. № 29 (43). С. 75–85.

7. Selen Sagsoz Karakulak, Emre Yetkin. Agricultural combine cabin safety analysis and test correlation. International Journal of Automotive Science and Technology. 2020. Vol. 4. Issue 1. P. 1−9.

8. Girutski I.I., Senkov A.G. Computerized test bench for combine cabs. International scientific journal "Mechanization in Agriculture & Conserving of the Resources". 2019. Issue 3. P. 88−89.

9. Md. Shaha Nur Kabir, Mingzhang Song, Sun-Ok Chung, Yong-Joo Kim, Su-Chul Kim, Jong-Kyou Ha. Visibility evaluation for agricultural combine operators according to ISO 5006 and 5721-1. Standards. Journal of Biosystems Engineering. 2015. Vol. 40(1). P. 19−27.(2015.3).

10. Rogovskii I., Titova L., Trokhaniak V., Trokhaniak O., Stepanenko S. Experimental study of the process of grain cleaning in a vibro-pneumatic resistant separator with passive weeders. Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering. 2020. Vol. 13 (62). No 1. P. 117−128.

11. Rogovskii I.L., Titova L.L., Trokhaniak V.I., Haponenko O.I., Ohiienko M.M., Kulik V.P. Engineering management of tillage equipment with concave disk spring shanks. INMATEH. Agricultural Engineering. 2020. Bucharest. Vol. 60. No 1. P. 45−52. https://doi.org/10.35633/INMATEH-60-05.

12. Rogovskii I.L. Consistency ensure the recovery of agricultural machinery according to degree of resource's costs. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 2019. Vol. 10(4). P. 145−150. https://doi.org/10.31548/machenergy.2019.04.145-150.

13. Yablonskyi P., Rogovskii I., Sobczuk H., Virchenko G., Volokha M., Vorobiov O. Computational approach to geometric modeling of plow bodies. Journal of Engineering Sciences (Ukraine). 2024. Vol. 11(1). P. E9–E18. https://doi.org/10.21272/jes.2024.11(1).e2.

14. Nazarenko I., Mishchuk Y., Mishchuk D., Ruchynskyi M., Rogovskii I., Mikhailova L., Titova L., Berezovyi M., Shatrov R. Determiantion 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.

15. Zagurskiy O., Pokusa Z., Pokusa F., Titova L., Rogovskii I. Study of efficiency of transport processes of supply chains management under uncertainty. Monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole. 2020. ISBN 978-83-66567-13-9. 162 p.

16. Sheichenko, V., Rogovskii, I., Skoriak, Y., Petrachenko, D., Shevchuk, M., Sheichenko, D., Titova, L., Sivak, I. Defining patterns in the intensification of hemp stalk retting processes. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. Vol. 6 (1 (132)), P. 50–63. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.3150.

17. 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. DOI: 10.22616/ERDev.2024.23.TF195.

18. Rogovskii I., Titova L., Ohiienko M., Sivak I., Mstowska I., Nadtochiy O., Matuhno N. Methods of production management of agrotronics of grain production by agricultural enterprises. Monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole, 2024; ISBN 978-83-66567-66-5; pp. 305, illus., tabs., bibls.

Хмельовський О.В.
Національний університет біоресурсів і природокористування України,
м. Київ, Україна
E-mail:
khmelovskyi26@gmail.com

СИНТЕЗ ПАРАМЕТРІВ ГЛУШНИКА ДЛЯ ВАКУУМНОЇ УСТАНОВКИ

https://doi.org/10.37700/ts.2024.25.130-143

УДК 628.3

Хмельовський О.В. ***Синтез параметрів глушника для вакуумної установки.***

Анотація. *В результаті досліджень виробничо-економічної діяльності господарства зроблено висновок, що в доїльних установках вживаними є вакуумні установки з ротаційно-пластинчатими вакуумними насосами. Основним недоліком ротаційно-пластинчатих насосів є значна витрата оливи (до 1 г/м³) і забруднення парами відпрацьованої оливи навколишнього середовища. Глушники більшості існуючих вакуумних установок не дозволяють відокремлювати відпрацьовану оливу від повітря і забруднюють навколишнє середовище. Обгрунтована схема, розроблена конструкція і виготовлений дослідний зразок глушника вдосконаленої вакуумної установки дає можливість зменшити витрати оливи до 95 %.*

Ключові слова: *глушник, вакуум, установка, доїння.*

Khmelovskyi O.V. ***Synthesis of silencer parameters for vacuum unit.***

Abstract. *As a result of research into the production and economic activities of the farm, it was concluded that vacuum units with rotary vane vacuum pumps are used in milking units. The main disadvantage of rotary vane pumps is a significant oil consumption (up to 1 g/m³) and pollution of the environment with waste oil vapors. Silencers of most existing vacuum units do not allow separating waste oil from air and pollute the environment. A substantiated scheme, a developed design and a manufactured prototype of a silencer of an improved vacuum unit make it possible to reduce oil consumption by up to 95%.*

Key words: *silencer, vacuum, unit, milking.*

Постановка проблеми

Перехід до ринкових умов господарювання в сільськогосподарському виробництві взагалі, в тому числі й у такій галузі, як тваринництво, вимагає не тільки збільшення обсягу, а й зниження собівартості вироблюваної продукції для підвищення її конкурентноздатності [1]. Основними умовами забезпечення розвитку галузі, поряд із зміцненням кормової бази, є комплексна механізація виробничих процесів, кваліфіковане обслуговування і бережливе використання технічних засобів [2].

Впровадження машинного доїння стало прогресивним кроком в галузі тваринництва [3]. Машинне доїння істотно полегшує і підвищує продуктивність праці тваринників, створює передумови для одержання високосортного молока, особливо при доїнні в молокопровід [4]. Залежно від системи утримання тварин і технології їх доїння у 4-5 разів (доїння у стійлах) та навіть у 10-15 і більше (доїння на автоматизованих конвеєрних установках) можна знизити затрати праці порівняно з ручним варіантом [5].

Одержане молоко менше контактує з навколишнім середовищем, послідовно проходить первинну обробку, завдяки чому менше забруднюється, довше зберігає свою якість [6].

Та насамперед ефективне і без шкідливих наслідків доїння можливе тільки при дотриманні технології, що виходить з фізіологічних особливостей молоковіддачі тварин. Ця технологія може включати ручні, машинно-ручні, і машинні операції, співвідношення яких залежить від вибору технічного обладнання та організації процесу доїння [7].

В даній роботі вдосконалено конструкцію вакуумної установки, що дозволяє зменшити витрати оливи і усуне забруднення оливою довкілля.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Основною проблемою галузі є зменшення обсягів кормо виробництва, як наслідок відбувається зменшення продукції і поголів'я тварин [8].

Лише комплексний підхід до вирішення існуючих проблем в скотарстві дозволить докорінно змінити ситуацію в цьому сегменті [9].

Аналіз роботи різних господарсько-побутових станцій очищення побутових Теоретичні дослідження фільтра-глушника дають можливість обґрунтувати конструктивно-функціональну схему фільтра-глушника вакуумної установки [10]. Розроблений глушник повинен задовольняти такі вимоги:

- зменшувати рівень звуку зовнішнього шуму до рівня допустимого, що складає 80 дБ [11];
- створювати мінімальний опор руху повітря [12];
- забезпечувати максимально можливий відбір оливи з відпрацьованого повітря [13].

Враховуючи такі особливості був розроблений камерний глушник з гвинтовою поверхнею, який відповідає вищезгаданим вимогам [14].

Розроблений глушник рис. 1 складається з корпусу 1, конічної частини 2, оливозбірника 3, вхідного патрубка 4, гвинтової поверхні 5 та випускного патрубка.

Гвинтова поверхня розташована всередині корпусу складається з декількох секцій різного кроку, причому крок поверхні збільшується в напрямку випускного патрубку.

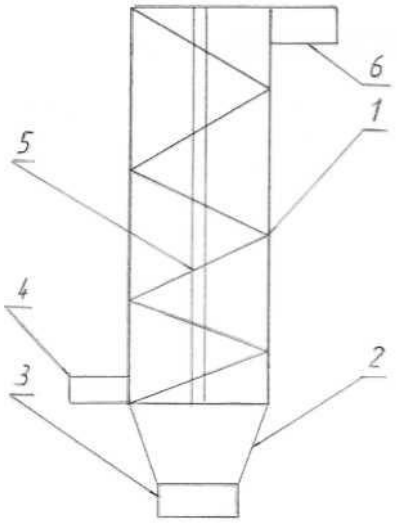


Рис. 1. Принципова схема глушника [15]: 1 – корпус; 2 – конічна частина; 3 – оливозбірник; 4 – вхідний патрубок; 5 – гвинтова поверхня; 6 – вихідний патрубок.

Робочий процес такого глушника проходить таким чином: повітря з нагнітального трубопроводу потрапляє в глушник та по гвинтовій лінії проходить через нього, за рахунок того, що крок гвинтової ліній збільшується, повітря втрачає швидкість та гасить звук вихлопу [16]. Повітря, проходячи через глушник, рухається по колу, а, отже, на частинки оливи, що знаходиться у зваженому стані, діє відцентрова сила в наслідок чого вони відкидаються на стінки глушника та спливають вниз [17]. В нижній частині глушника знаходиться масляний фільтр проходячи через який олива повертається у систему.

Формулювання мети досліджень

Метою роботи є вдосконалення вакуумної установки шляхом розробки пристрою для зменшення шуму та відбору відпрацьованої оливи.

Результати досліджень

Розроблена конструкція глушника при приєднанні до вакуумної установки забезпечує гасіння звуку і відбір відпрацьованої оливи (рис. 2). Олива збирається в оливозбірнику 3 після чого вона може або відправлятися на переробку, або ж після очищення знову поступати в систему. При поверненні очищеної оливи в систему, подача здійснюється трубопроводом для оливи 4, у якому створюється надлишковий тиск (за рахунок нагнітання вакуумним насосом повітря в глушник), що дає змогу, без застосування допоміжних пристроїв, повертати відібрану оливу в систему вакуумної установки.

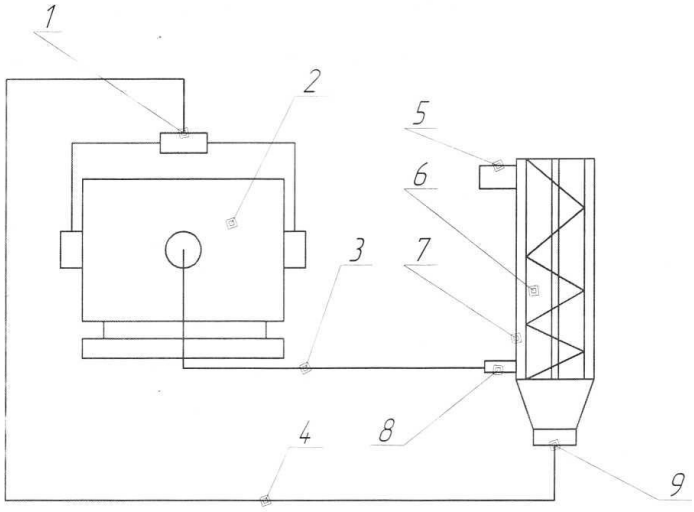


Рис. 2. Конструктивно-функціональна схема розробленої установки: 1 – система мащення вакуумного насоса; 2 – вакуумний насос; 3 – вихлопна труба; 4 – трубопровід для оливи; 5 – вихлопний патрубок глушника; 6 – глушник; 7 – теплообмінник; 8 – вхідний патрубок глушника; 9 – фільтр.

Також передбачена можливість застосування глушника для підігріву води за рахунок відбору теплоти з відпрацьованого повітря, що нагрівається до 80 ºС і більше, шляхом установки кожуху навколо глушника в якому циркулює.

Запропонована конструкція глушника дає змогу погасити швидкість вихлопу, зекономити мастильні матеріали та підігріти деяку кількість води для потреб господарства.

Важливою перевагою такого методу вдосконалення вакуумної установки є те, що вдосконаленню піддаються вже встановлені на господарствах установки.

Розрахунок олнвозбірної частини. Швидкість повітря на вході в глушник $V_{вх}$ має знаходитися в межах 11…16 м/сек саме така швидкість дозволяє найбільш повно відділити оливу від повітря. З умови цього визначається діаметр вхідного патрубка з формули:

$$d_{вх} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot V_{вх}}}, \quad м \tag{1}$$

де Q – продуктивність вакуумного насоса, м³/год; $V_{вх}$ – швидкість повітря на вході в глушник, м/год.

$$d_{вх} = \sqrt{\frac{4 \cdot 60}{3{,}14 \cdot 57600}} = 0{,}036 \text{ (м)};$$

Тобто спостерігається така залежність між діаметром вхідного патрубка глушника і продуктивністю вакуумного насоса (рис. 3).

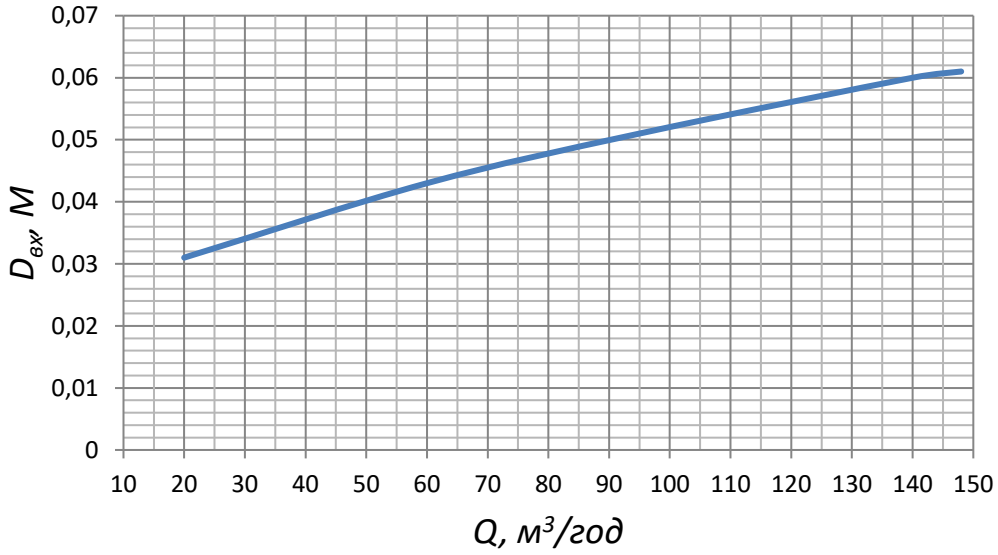


Рис. 3. Залежність діаметра вхідного патрубка від продуктивності вакуумного насоса

На вході в оливозбірну частину швидкість повітря за рахунок розширення падає на 30-40%, тому швидкість повітря в першій секції гвинтової поверхні глушника дорівнюватиме:

$$V_{с1} = 0{,}35 \cdot V_{ВХ.}, \text{ м/год} \tag{2}$$

де $V_{ВХ.}$ – швидкість повітря на вході, м/год; $V_{с1}$ – швидкість повітря в першій секції глушника, м/год.

$$V_{с1} = 0{,}35 \cdot 57600 = 20160 \text{ м/год};$$

Для визначення конструктивних параметрів глушника необхідно знайти так званий умовний діаметр вхідного перерізу секції з допомогою якого розраховуються інші елементи:

$$D_0 = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot V_{вх} \cdot 0{,}35}} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot V_{с1}}}, \text{ м} \tag{3}$$

$$D_0 = \sqrt{\frac{4 \cdot 60}{3{,}14 \cdot 20160}} = 0{,}061 \text{ м},$$

Отримуємо залежність подібну до (рис. 4).

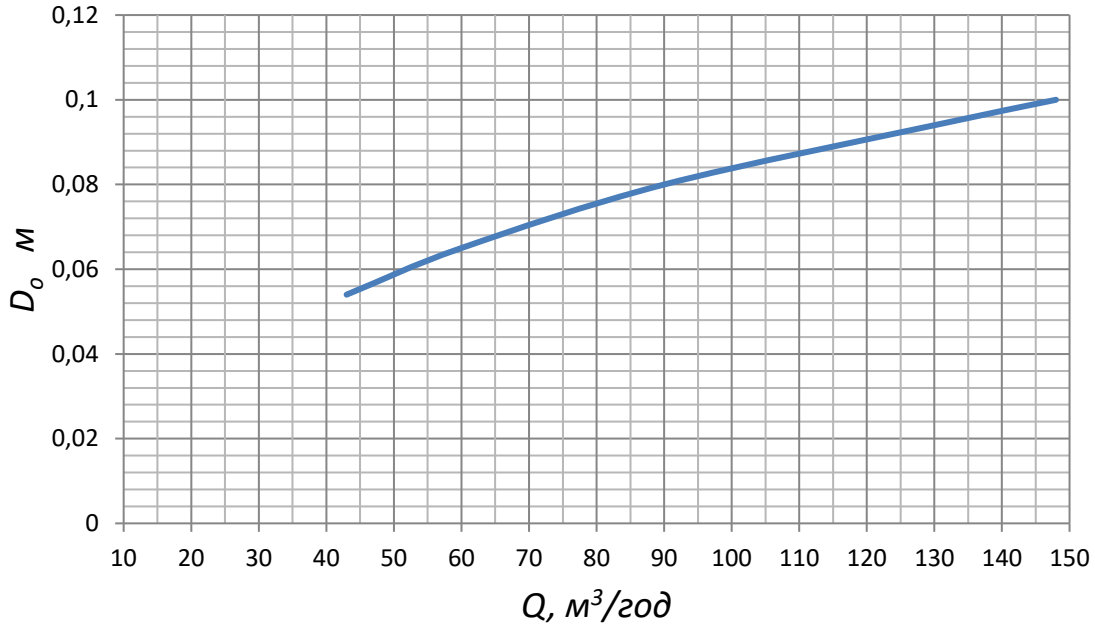


Рис. 4. Залежність діаметра умовного перерізу секції від продуктивності насоса

Використовуючи умовний діаметр вихідного перерізу знаходяться мінімальні розміри глушника за такими залежностями:

$$D_1 = 3{,}0D_0, \text{ м} \quad (4)$$
$$H = 1{,}35D_0, \text{ м} \quad (5)$$
$$D_2 = 0{,}4D_0, \text{ м} \quad (6)$$
$$d_1 = 0{,}1D_0, \text{ м} \quad (7)$$

де D_1 – зовнішній діаметр глушника; Н – висота конусної частини; D_2 – діаметр збірника оливи (рис. 5).

$$D_1 = 3{,}0 \cdot 0{,}061 = 0{,}184 \text{ м};$$
$$H = 1{,}35 \cdot 0{,}061 = 0{,}0831 \text{ м};$$
$$D_2 = 0{,}4 \cdot 0{,}061 = 0{,}0246 \text{ м};$$
$$d_1 = 0{,}1 \cdot 0{,}061 = 0{,}0061 \text{ м};$$

Параметри гвинтової поверхні визначають з площі вихідного перерізу, що розраховують за формулою:

$$S_1 = \frac{\pi \cdot D_0^2}{4}, \text{ м}^2 \quad (8)$$
$$S_1 = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}082^2}{4} = 0{,}0029 \text{ м}^2$$

де D_0 – умовний діаметр вхідного перерізу першої секції, м.

Приймаючи, що вихідний переріз має прямокутну форму – визначають крок гвинтової поверхні за формулою:

$$P_1 a = S_1, \text{ м}^2 \quad (9)$$

де $a = (D_1 - d_1)/2$

P_1 – крок гвинтової поверхні, м;
D_1 – зовнішній діаметр глушника, м;
d_1 – діаметр прутка на якому кріпиться гвинтова поверхня, м.

$$\text{а} = (0{,}184 - 0{,}0061)/2 = 0{,}089 \text{ м};$$

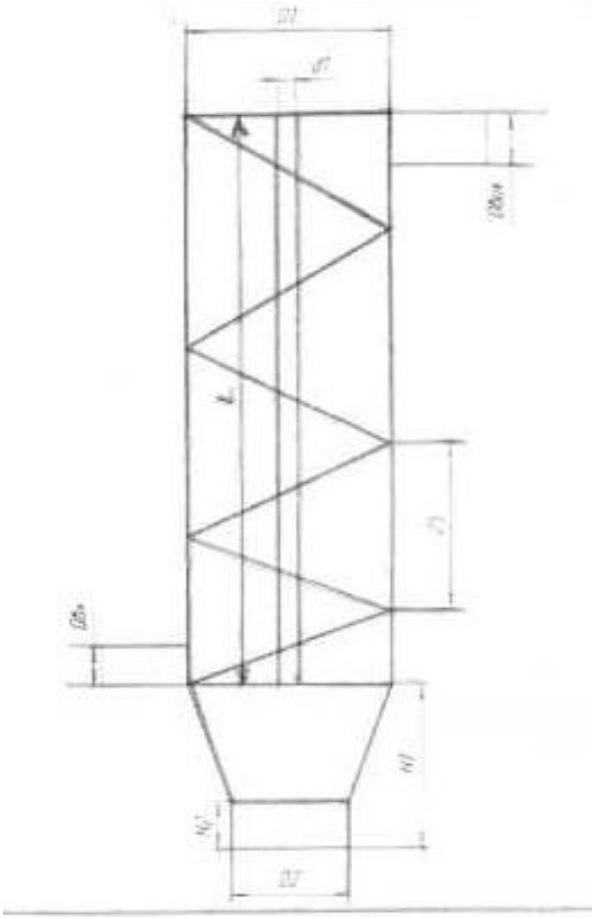


Рис. 5. Розрахункова схема глушника

Отже, крок гвинтової поверхні знаходиться з виразу

$$\text{P}_1 = \frac{2S_1}{D_1 - d_1}, \text{ м} \qquad (10)$$

$$P_1 = \frac{2 \cdot 0{,}0053}{0{,}24 - 0{,}0082} = 0{,}033 \text{ м};$$

Отже можна виявити таку залежність зміни кроку гвинтової поверхні від продуктивності вакуумного насоса (рис. 6).

Визначення параметрів наступних секцій проводиться з умови забезпечення поглинання шуму.

Розрахунок шумопоглинаючої частини. Кількість секцій гвинтової частини вибирають в межах 2-4 в залежності від продуктивності вакуумного насоса, забруднення повітря на виході з насосу та ступеню затухання шуму який потрібно отримати в глушнику. За нашими дослідженнями доцільно приймати кількість секцій рівну трьом, саме при такій конструкції найбільш повно проходить відділення оливи від повітря. Конструктивні параметри гвинтової поверхні приймають або з конструктивних

міркувань або ж визначають з величини затухання, яке необхідно отримати в глушнику. Визначаючи конструктивні розміри гвинтової поверхні бажано приймати такі значення, щоб секції мали повний виток.

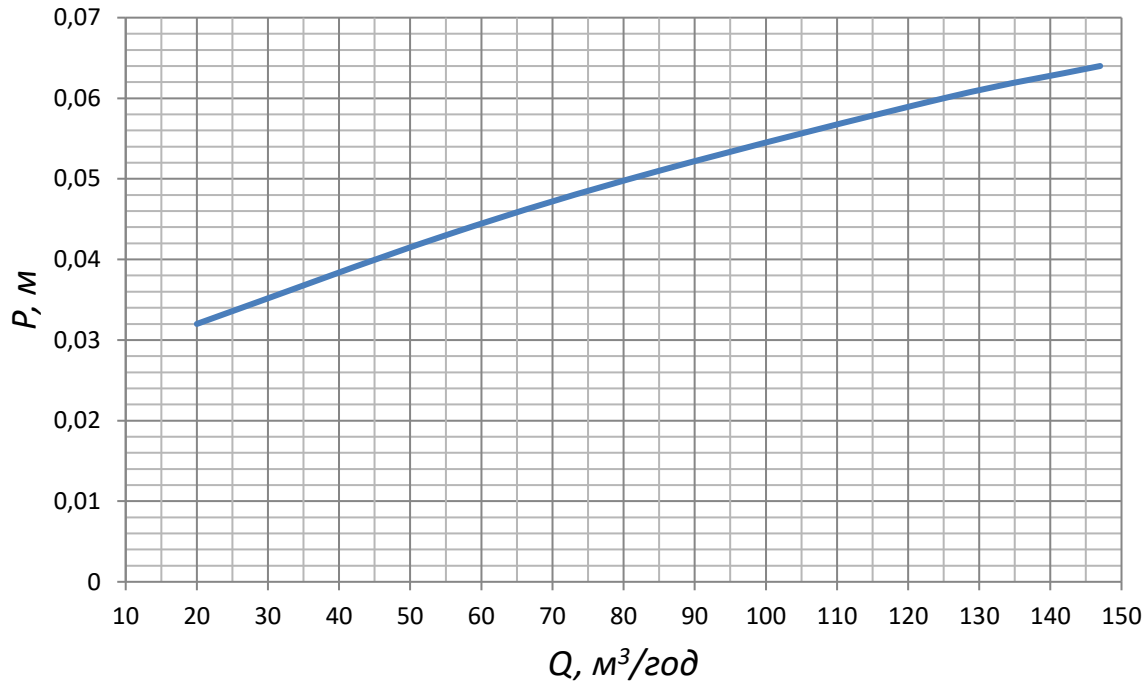


Рис. 6. Залежність зміни кроку гвинтової поверхні від продуктивності вакуумного насоса

Загальна величина поглинання в глушнику дорівнює сумі поглинань його структурних частин:

$$\Delta\varepsilon_{\text{сум}} = \Sigma\Delta\varepsilon_{\text{пр}} + \Sigma\Delta\varepsilon_{\text{ф}} + \Sigma\Delta\varepsilon_{\text{вих}},\text{ дб} \quad (11)$$

$$\Delta\varepsilon_{\text{сум}} = 0{,}23 + 32{,}66 + 3{,}34 = 36{,}23 \text{ дб.}$$

де $\Delta\varepsilon_{\text{сум}}$ – величина сумарного поглинання, дБ, $\Delta\varepsilon_{\text{пр}}$ – величина поглинання в прямих каналах глушника, $\Delta\varepsilon_{\text{ф}}$ – величина поглинання в перхідних частинах, $\Delta\varepsilon_{\text{вих}}$ – величина поглинання вихідного перерізу.

Величина поглинання в прямих каналах визначається як:

$$\Delta\varepsilon_{\text{пр}} = \alpha_{\text{к}}\frac{\Phi_{\text{м}}}{\Phi_{\text{к}}},\text{ дб} \quad (12)$$

$$\Delta\varepsilon_{\text{пр}} = 0{,}01 \cdot 0{,}068/0{,}0029 = 0{,}23 \text{ дБ.}$$

де $\Phi_{\text{м}}$ – площа поверхні звукопоглинаючого матеріалу, м, $\Phi_{\text{к}}$ – площа перерізу каналу, м, $\alpha_{\text{к}}$ – коефіцієнт звукопоглинання матералу, для металічних каналів складає 0,01.

Площу поверхні звукопоглинаючого матеріалу знаходимо як:

$$\Phi_{\text{м}} = (2P_n + 2a)l_{\text{сек}},\text{ м}^2 \quad (13)$$

$$\Phi_{\text{м}} = (2 \cdot 0{,}033 + 2 \cdot 0{,}089) \cdot 0{,}28 = 0{,}068 \text{ м.}$$

де $P_{\text{п}}$ – крок n-ої секції гвинтової поверхні, м, $l_{\text{сек}}$ – довжина секції, м, $a = (D_1 - d_1)/2$ - ширина каналу.

Довжина секції визначається з залежності:

$$l_{\text{сек}} = \pi D_1/2, \text{ м} \quad (14)$$

$$l_{\text{сек}} = 3{,}14 \cdot \frac{0{,}184}{2} = 0{,}28 \text{ м}.$$

де D_1 – зовнішній діаметр глушника, м.

Площу перерізу $\Phi_к$ знаходимо з виразу (8). Отже (рис. 7), враховуючи залежності (4-7, 9, 13 і 14) знаходимо залежність кроку гвинтової поверхні від величини затухання:

$$P_n = 0{,}0435\pi D_0/(1{,}45\Delta\varepsilon_{\text{пр}} - 0{,}03\pi), \text{ м} \quad (15)$$

$$P_n = 0{,}0435 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}061/(1{,}45 \cdot 0{,}23 - 0{,}03 \cdot 3{,}14) = 0{,}034 \text{ м}.$$

де D_0 – умовний діаметр вхідного перерізу, м (3).

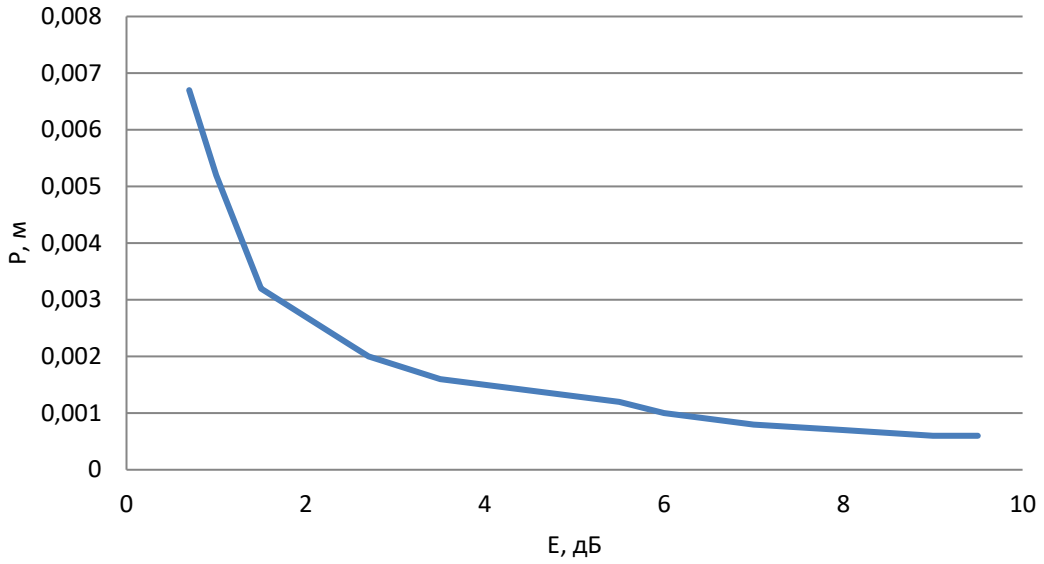


Рис. 7. Залежність величини поглинання від кроку гвинтової поверхні

Величину поглинання в перехідних частинах $\Delta\varepsilon_ф$ знаходимо за формулою:

$$\Delta\varepsilon_ф = 10\ln((1+m)^2/4m), \text{ дб} \quad (16)$$

$$\Delta\varepsilon_Ф = 10\ln((1+2{,}86)^2/4 \cdot 2{,}86) = 32{,}66 \text{ дБ}$$

де m – відношення площ повздовжніх перерізів до Φ_{n-1} та після Φ_n зміни перерізу:

$$m = \frac{\Phi_n}{\Phi_{n-1}}, \quad (17)$$

Враховуючи залежність (9) можемо записати вираз (17) у вигляді:

$$m = P_n/P_{n-1}, \quad (18)$$

де P_n – крок секції гвинтової поверхні, м; P_{n-1} – крок попередньої секції гвинтової поверхні, м.

Потрібпо врахувати, що при першій зміні перерізу на вході в глушник m = 2,86 з залежності 2.

Прийнявши до уваги залежності 4, 7, 18 запишемо залежність відношення площ перерізів (кроків 18) (рис. 8) від величини затухання $\Delta\varepsilon_ф$:

$$P_n/P_{n-1} = (4 \cdot 10^{\Delta\varepsilon a} - 2 \pm ((4 \cdot 10^{\Delta\varepsilon a} - 2)^2 - 4)^{0{,}5})/2, \quad (19)$$

Значення величини поглинання вихідного перерізу $\Delta\varepsilon_{\text{вих}}$ знаходимо з залежності:

$$\Delta\varepsilon_{\text{вих}} = 10lnA/\Phi_{\text{вих}}, \quad (20)$$

$$\Delta\varepsilon_{\text{вих}} = 10\ln 0{,}0116/0{,}0083 = 3{,}34 \text{ дб}.$$

де А-величина сумарного поглинання матеріалу себін, $Ф_{вих}$-площа перерізу вихідного патрубка, м,

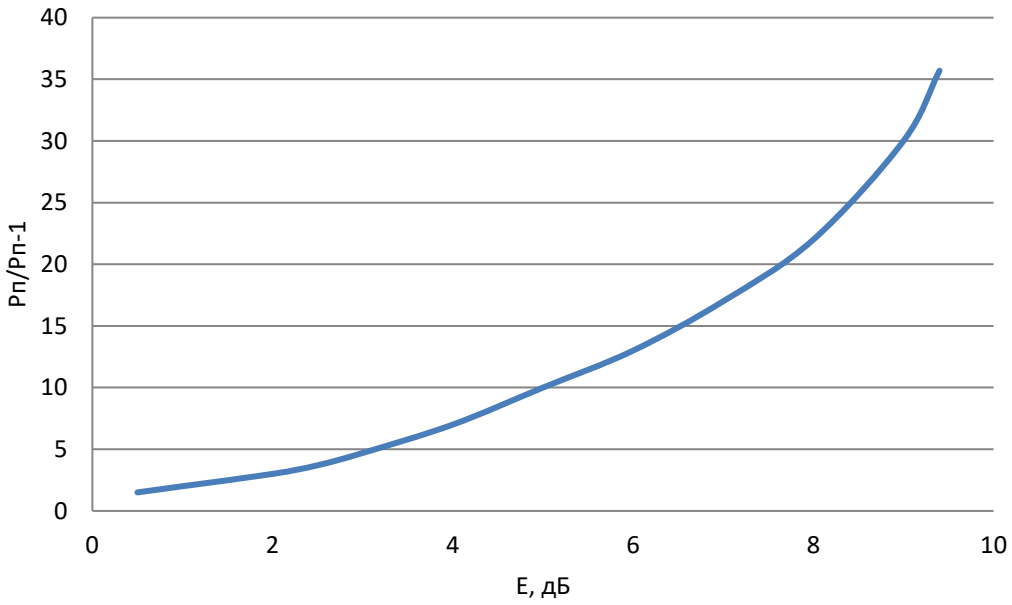


Рис. 8. Залежність величини поглинання від відношення кроків

Сумарне поглинання матеріалу знаходять з залежності:

$$A = \Sigma \alpha S, \quad (21)$$

$$A = 0{,}04 \cdot 0{,}29 = 0{,}0116\text{м}.$$

де S – сума площ поверхонь глушника, a – коефіцієнт звукопоглинання.

Запишемо залежність площі вихідного перерізу від величини звукопоглинання:

$$Ф_{вих} = A/e^{0{,}1\Delta\varepsilon_{вих}}, \quad (22)$$

$$Ф_{вих} = 0{,}0116/0{,}02^{0{,}1\cdot 6{,}49} = 0{,}0083\text{м}.$$

Діаметр вихідного патрубка визначається з залежності:

$$D = \sqrt{4S/\pi}, \quad (23)$$

$$D = \sqrt{4 \cdot 0{,}0029/3{,}14} = 0{,}06\text{м}.$$

Отже, конструктивні параметри шумопоглинаючої частини можна вирахувати з необхідної величини затухання в глушнику та параметрів розрахованих в оливозбірній частині.

Аналізуючи наведені розрахунки випливає, що зовнішній діаметр глушника D_1, висоту конічної частини оливозбірника Н, діаметр збірника оливи D_2 та крок першої секції гвинтової поверхні знаходиться з розрахунку оливозбірної частини за умови відділення оливи. Кроки гвинтових поверхонь інших секцій та площу вихідного патрубку визначають з умови отримання необхідного затухання шуму в глушнику.

Тобто оливозбірна частина розглядається як циклон та розраховується як елемент для відділення домішок, шумопоглинаюча частина розглядається як глушник і розраховується відповідно для поглинання звукових коливань (рис. 9).

Таким чином, при продуктивності насоса Q=60 м/год конструктивні параметри глушника становитимуть: діаметр вхідного патрубка $d_{вх}$ = 0,032м (з формули 1), зовнішній діаметр D_1 =0,197 м (з формули 4), висота конусної частини Н = 0,09 м (з

формули 5), діаметр оливо збірника D_2=0,028 м (з формули 6), крок першого витка гвинтової поверхні P_1=0,04 м (з формули 10).

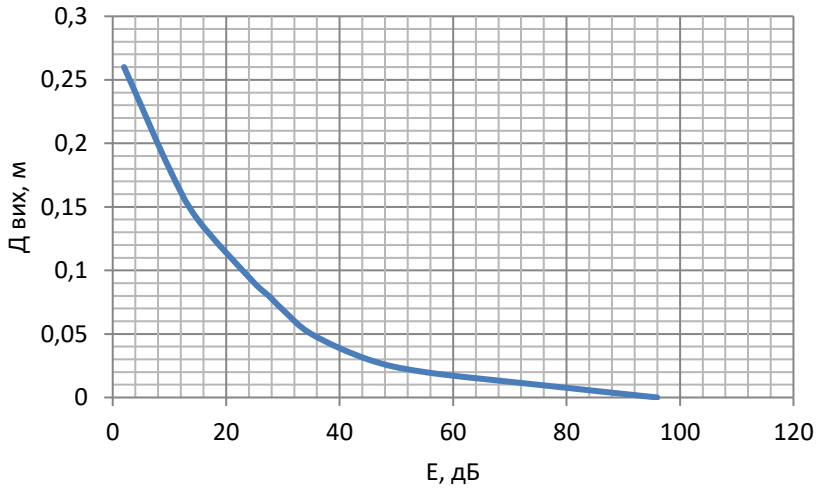


Рис. 9. Залежність величини поглинання від діаметру вихідного патрубку

Дослідженням встановлено, що досліджувальний глушник забезпечує 100% очищення повітря від оливи. Об'єм оливи, що поступила на мащення насоса і відділена оливозбірною частиною глушника відібрані з оливозбірника склала 78%, решта оливи залишивши слід (змочила) і осіла на з'єднувальних трубопроводах, нижніх витках і стінках глушника.

Одержані результати показують, що досліджений глушник зменшує величину шуму в 1,5 разів (рис. 10). Величина створюваного шуму вакуумною установкою УВУ-60-1,0 з дослідним зразком на 12 дБ менша від нормативної яка становить 80 дБ.

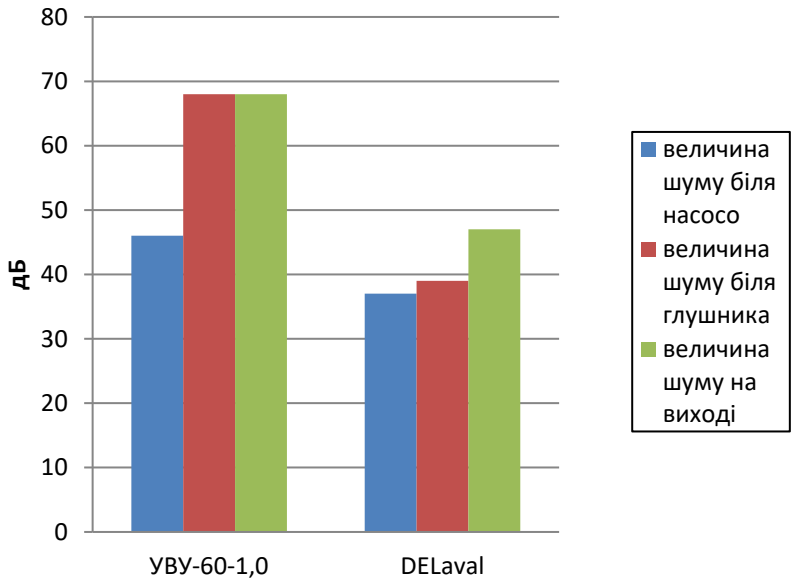


Рис. 10. Величина шуму створювана вакуумними установками в залежності від розміщення глушника

Розміщення глушника відносно вакуумного насоса суттєво впливає на величину створюваного шуму. Так при розміщенні глушника біля вакуумного насосу (DeLaval)

величина шуму біля насосу і глушника однакові і склала 63 dB. Величина шуму на виході з вихлопної труби глушника, що розміщена ззовні приміщення, склала 84 dB.

Визначення шуму в установці УВУ-60-1,0 біля насоса і глушника розміщеного ззовні відповідно склали 46 і 68 dB.

Одержані дані показують, що рекомендованим є розміщення глушника ззовні приміщення, так як величина шуму в приміщенні біля насосу, при цьому, зменшується на 30%.

Висновки

1. В результаті досліджень виробничоекономічної діяльності господарства зроблено висновок, що в доїльних установках вживаними є вакуумні установки з ротаційно-пластинчатими вакуумними насосами. Основним недоліком ротаційно-пластинчатих насосів є значна витрата оливи (до 1 г/м³) і забруднення парами відпрацьованої оливи навколишнього середовища.

2. Глушники більшості існуючих вакуумних установок не дозволяють відокремлювати відпрацьовану оливу від повітря і забруднюють навколишнє середовище.

3. Обгрунтована схема, розроблена конструкція і виготовлений дослідний зразок глушника вдосконаленої вакуумної установки дає можливість зменшити витрати оливи до 95 %.

4. Теоретично встановлено взаємозв'язок між продуктивністю насоса і конструктивними параметрами глушника. При продуктивності вакуумного насоса 60 м³/год: діаметр вхідного патрубка $d_{вх}$ = 0,032м, зовнішній діаметр D_1 =0,159 м, висота конусної частини H = 0,072 м, діаметр оливозбірника D_2 = 0,0212 м, крок першого витка гвинтової поверхні P = 0,04 м. Розміри глушника визначаються виходячи з умов максимального відділення оливи від повітря, значного зменшення шуму при мінімальному опорі руху повітря.

5. Встановлено, що відокремлення оливи від повітря в досліджуваному глушнику складає 95%, величина затухання шуму становить 32 дБ і не перевищує 68 дБ.

6. Доцільно розміщувати глушник ззовні вакуумного приміщення, так як при цьому величина створюваного шуму в приміщенні зменшується на 30%.

Список використаних джерел

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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).f1 Scopus

5. 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.

6. 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.

7. Romaniuk W., Rogovskii I., Polishchuk V., Titova L., Borek K., Wardal W.J., Shvorov S., Dvornyk Y., Sivak I., Drahniev 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.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. Nazarenko I., Mishchuk Y., Mishchuk D., Ruchynskyi M., Rogovskii I., Mikhailova L., Titova L., Berezovyi M., Shatrov R. Determiantion 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.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. Rogovskii I.L., Polishchuk V.M., Titova L.L., Sivak I.M., Vyhovskyi 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. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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).f1 Scopus

5. Rogovskii I., Titova L., Sivak I., Berezova L., Vyhovskyi 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.

6. 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.

7. Romaniuk W., Rogovskii I., Polishchuk V., Titova L., Borek K., Wardal W.J., Shvorov S., Dvornyk Y., Sivak I., Drahniev 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.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. Nazarenko I., Mishchuk Y., Mishchuk D., Ruchynskyi M., Rogovskii I., Mikhailova L., Titova L., Berezovyi M., Shatrov R. (2021). Determiantion 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.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. 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. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. Vol. 15. Issue 22 (20th November). P. 2652−2663.

Науменко О.А.[1],
Сайчук О.В.[2],
Науменко А.О.[2],
Козій О.Б.[1]
[1]Державний біотехнологічний університет,
м. Харків, Україна,
E-mail:
ol.naumenko20@gmail.com
[2]Полтавський державний аграрний університет,
м. Полтава, Україна,
E-mail: lajo@ukr.net,
sajchuksacha@gmail.com

ПРОГНОЗУВАННЯ ОБСЯГІВ СПИСАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ: МЕТОДОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД

https://doi.org/10.37700/ts.2024.25.144-152

УДК 628.3

Науменко О.А., Сайчук О.В., Науменко А.О., Козій О.Б. ***Прогнозування обсягів списання сільськогосподарської техніки: методологічний підхід.***

Анотація. *Дослідження присвячено методологічному підходу до прогнозування обсягів списання сільськогосподарської техніки. Розглянуто актуальність проблеми утилізації технічних засобів агропромислового комплексу у контексті екологічних, економічних та соціальних викликів. Метою досліджень є розроблення методики прогнозування щорічного обсягу списаної сільськогосподарської техніки, враховуючи динаміку змін технічного парку, інтенсивність оновлення та середньостатистичні питомі показники. У роботі проаналізовано динаміку змін парку сільськогосподарської техніки за видами, кількістю та марками. Оцінено інтенсивність оновлення технічного парку та досліджено середньостатистичні терміни списання різних видів сільськогосподарської техніки. На основі отриманих даних розроблено модель прогнозування кількості техніки, що підлягає списанню. Результати дослідження дозволять розробити ефективні заходи щодо зниження витрат на утилізацію та підвищення ефективності використання вторинних ресурсів. Отримані дані можуть бути використані для формування регіональних та загальнодержавних програм утилізації сільськогосподарської техніки, а також для розробки бізнес-планів підприємств, що займаються утилізацією та переробкою.*

Ключові слова: *прогноз, списання, техніка, методологія.*

Naumenko O.A., Saichuk O.V., Naumenko A.O., Koziy O.B. ***Forecasting the volume of agricultural machinery write-off: a methodological approach.***

Abstract. *The study is devoted to a methodological approach to forecasting the volume of agricultural machinery write-off. The relevance of the problem of utilization of technical means of the agro-industrial complex in the context of environmental, economic and social challenges is considered. The purpose of the research is to develop a methodology for forecasting the annual volume of agricultural machinery written-off, taking into account the dynamics of changes in the technical fleet, the intensity of renewal and average specific*

indicators. The work analyzes the dynamics of changes in the agricultural machinery fleet by type, quantity and brand. The intensity of renewal of the technical fleet is estimated and the average terms of writing-off of various types of agricultural machinery are studied. Based on the data obtained, a model for forecasting the amount of machinery to be written-off is developed. The results of the study will allow developing effective measures to reduce costs for utilization and increase the efficiency of using secondary resources. The obtained data can be used to form regional and national programs for the disposal of agricultural machinery, as well as to develop business plans for enterprises engaged in disposal and processing.

Key words: *forecast, write-off, equipment, methodology.*

Постановка проблеми

Ефективний розвиток сільськогосподарського виробництва значною мірою залежить від широкого використання технічних засобів, які забезпечують високу продуктивність, якість та конкурентоспроможність. Однак після завершення терміну експлуатації тракторів, комбайнів та іншої сільськогосподарської техніки виникають серйозні проблеми, пов'язані з необхідністю її утилізації. Станом на сьогодні рівень утилізації техніки аграрного сектору залишається вкрай низьким [10], [11]. Це зумовлено реформами в управлінських органах, що призвели до відсутності належної організаційної системи в регіонах, недосконалості нормативно-правової бази, відсутності відповідальності державних структур, а також низькою ефективністю бізнесових структур у цій сфері.

Більшість сільськогосподарських підприємств розглядають утилізацію техніки лише як здачу металобрухту, ігноруючи потенціал вторинної переробки інших матеріалів. Як наслідок, загострюється проблема утилізації таких складових, як скло, пластик, гума, алюміній тощо, які залишаються недооціненими з точки зору техногенного забруднення довкілля через неналежну переробку [11], [13].

Актуальність питання утилізації техніки агропромислового комплексу необхідно розглядати не лише у контексті екологічної загрози, але й з точки зору її позитивного впливу на економіку та суспільство. Зокрема, це стосується вторинного використання природних ресурсів, створення робочих місць у переробній галузі, а також розвитку "зеленої" економіки.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Законодавчі норми, що регулюють утилізацію технічних засобів агропромислового комплексу. В Україні питання утилізації транспортних засобів, включаючи сільськогосподарську техніку, регулюються низкою законодавчих актів. Зокрема, це директиви Європейського Союзу [1], [2], які визначають вимоги щодо коефіцієнтів вторинної переробки (не менше 0,85) та утилізації (не менше 0,95), а також обмеження на вміст шкідливих речовин у складі деталей і матеріалів транспортного засобу. Директиви передбачають також обов'язкове маркування складу матеріалів для цілей утилізації.

В Україні діють також Закони [3], [4], [5], [6], які встановлюють вимоги до належної утилізації транспортних засобів та сільськогосподарської техніки. Їх метою є мінімізація негативного впливу на навколишнє середовище, збереження здоров'я людей та економія матеріальних ресурсів.

Сільськогосподарська техніка відіграє важливу роль у структурі технічних засобів, які підлягають утилізації по всій території України. Відсутність розробленої методики для оцінки обсягів списаної техніки значно ускладнює планування її утилізації,

створення ринку відповідних послуг, а також формування ефективної державної політики у цій сфері.

Розробка такої методики дозволить: забезпечити ефективне планування утилізації техніки як на регіональному, так і на загальнодержавному рівнях; створити сприятливі умови для розвитку підприємств, що спеціалізуються на переробці машин; контролювати та прогнозувати екологічні наслідки утилізації; стимулювати інновації у сфері переробки; полегшити розробку бізнес-планів з урахуванням реальних обсягів роботи.

Формулювання мети досліджень

Мета дослідження: розробити методику прогнозування щорічного обсягу списаної сільськогосподарської техніки, враховуючи динаміку змін технічного парку, інтенсивність оновлення та середньостатистичні питомі показники.

Завдання дослідження:

1. Провести аналіз динаміки змін парку сільськогосподарської техніки в розрізі її видів (трактори, комбайни, інше).
2. Проаналізувати придбання і введення техніки в експлуатацію та оцінити інтенсивність оновлення парку техніки АПК.
3. Дослідити середньостатистичні показники для розрахунку кількості списання різних видів сільськогосподарської техніки.
4. Визначити щорічний обсяг списання техніки.

Результати досліджень

1. Аналіз динаміки змін парку сільськогосподарської техніки за видами, кількістю та марками. Характеристика тенденцій розвитку парку технічних засобів агропромислового комплексу в попередні періоди, його сучасний стан та прогнози на найближчу перспективу є основою для створення ефективної системи обліку, накопичення та утилізації машин. Структурні, кількісні, маркові та вікові показники техніки є критично важливими для формування дієвих механізмів її обліку та утилізації. Чинниками списання техніки можуть бути: повне відпрацювання ресурсу, невідповідність сучасним вимогам енергоефективності та продуктивності, а також неможливість адаптації для застосування в сучасних технологічних процесах.

Для встановлення динаміки змін парку тракторів і комбайнів до 2021 року доцільно використовувати дані Державної служби статистики України [7]. Ці дані дозволяють аналізувати ситуацію як у загальнодержавному розрізі, так і на рівні регіонів та областей. Додатково, аналітичні звіти консалтингових компаній [10] та інші спеціалізовані дослідження можуть підвищити обґрунтованість прийняття управлінських рішень.

Деякі загальні тенденції в змінах парку сільськогосподарської техніки: Трактори. У 2000 році кількісний склад тракторів перевищував 400 тис. одиниць. Надалі спостерігалося поступове зменшення, яке стабілізувалося з 2015 року на рівні близько 320 тис. одиниць. За віковими характеристиками зросла частка тракторів до 10 років на 20-30%. Частка імпортної техніки суттєво зросла і становить майже 50%. Зернозбиральні комбайни. У 2000 році загальна кількість комбайнів становила близько 70 тис. одиниць. Після 2010 року кількість зменшилася з 53 до 44 тис. одиниць. Середній вік комбайнів коливається в межах 12-15 років. Частка сучасної техніки (віком до 10 років) досягла рівня 40%.

Зазначені показники свідчать про певну стабілізацію в структурі парку техніки АПК, однак в кожному конкретному випадку необхідно проводити уточнюючі дослідження динаміки наявних машин та обладнання для розробки дієвих механізмів утилізації.

2. Аналіз придбання і введення техніки в експлуатацію та оцінка інтенсивності оновлення технічного парку. Динаміка придбання сільськогосподарської техніки (тракторів і комбайнів) є ключовим показником, який дозволяє відстежувати зміну вікової структури машинного парку. Цей аналіз має важливе значення для оцінки морфологічного складу техніки (матеріалів, з яких вона виготовлена) залежно від року випуску. Інформація про морфологічний склад техніки є основою для ефективного планування її утилізації та рециклінгу, оскільки склад матеріалів визначає вартість, методи та екологічну ефективність процесу.

Знання динаміки придбання техніки є важливим, оскільки зміна складу машин залежить від року випуску. Машини старших поколінь мають більшу загальну масу та значну частку металів, які легко переробляються. Нові моделі, виготовлені з легких сплавів і пластиків, вимагають використання сучасних підходів до утилізації, таких як термопереробка чи спеціалізований рециклінг [8], [14].

Нами був проведений аналіз придбання сільськогосподарської техніки з 2011 року, результати якого представлено на рис. 1. Динаміка щорічної інтенсивності оновлення парку тракторів і зернозбиральних комбайнів демонструє як пікові значення, так і періоди різкого зниження. За даними [10], закупівлі техніки відбувалися навіть у складних умовах, зокрема під час війни.

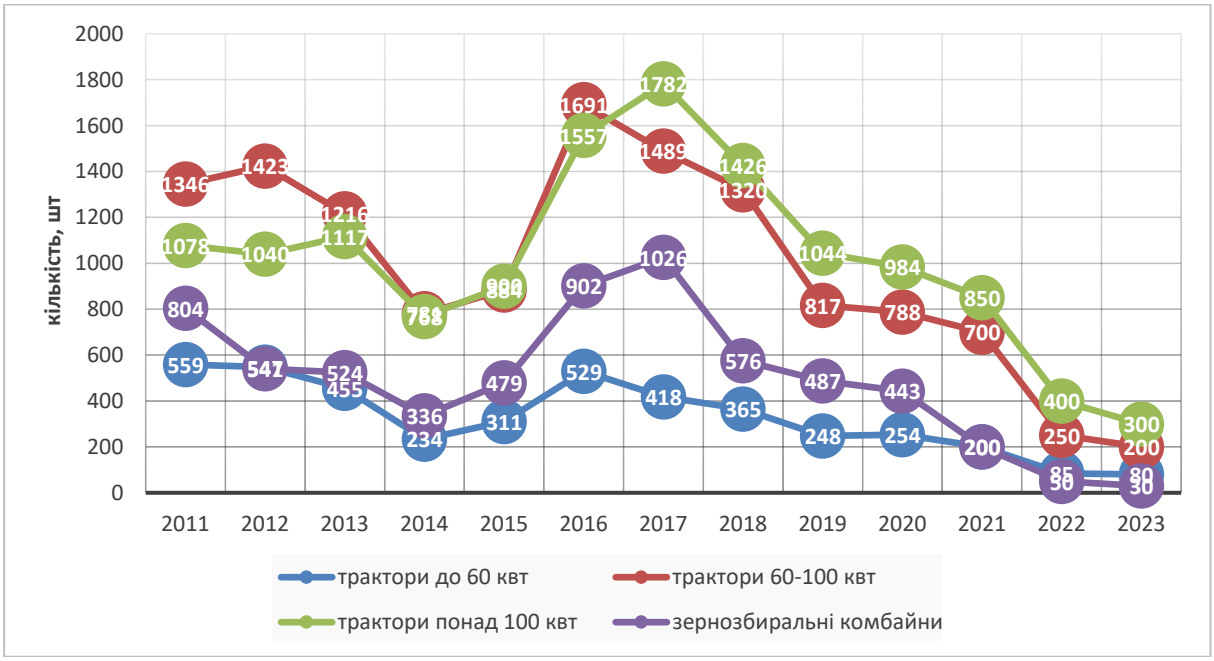


Рис. 1. Придбання техніки сільгоспвиробниками.

Ця динаміка дозволяє врахувати масу та морфологічний склад техніки, що підлягає утилізації, а також визначити частку машин різних поколінь. Старіші моделі можна утилізувати традиційними методами (металобрухт, плавлення), тоді як сучасні моделі потребують новітніх технологій (розділення композитів, термічна обробка пластмас тощо).

Аналіз також показав, що серед найбільш поширених марок тракторів в Україні є: МТЗ, ЮМЗ, Case, Claas, Deutz-Fahr, Fendt, John Deere, Massey Ferguson, New Holland,

Valtra, ХТЗ, Challenger, Landini. Для зернозбиральних комбайнів популярними є: "Дніпро", "Полісся", Case, Claas, Fendt, John Deere, Lexion, Massey Ferguson, Tucano, "CR", "CS", "CX". Серед кормозбиральних комбайнів найбільш затребуваними є "КПИ-Ф", "КРП-Ф", Jaguar, John Deere.[14]/

Прогноз утилізації техніки. Техніка, придбана в період 2015–2017 років (пік на графіку), досягне граничного віку у 2030–2035 роках. Це створить підвищене навантаження на інфраструктуру утилізації. Заздалегідь отримана інформація про обсяги та склад техніки, що підлягає списанню, дозволить підготувати бізнес до роботи з конкретними видами відходів.

Прогнозування динаміки придбання техніки сприяє визначенню обсягів матеріалів, які будуть отримані в процесі утилізації, та дозволяє розробити довгострокову стратегію у сфері управління відходами. Ці дані мають вирішальне значення для прийняття ефективних управлінських рішень та розвитку бізнесу у сфері рециклінгу.

3. Дослідження середньостатистичних показників для розрахунку кількості списання різних видів сільськогосподарської техніки. Визначення щорічної кількості списаної сільськогосподарської техніки для подальшої утилізації є складним завданням, що потребує врахування численних факторів. У попередні роки, за умов суворого контролю за звітністю щодо наявності, використання та списання техніки, а також виконання планів здачі металобрухту, відповідна інформація була досить повною та достовірною. Цьому сприяла діяльність служби "Інспекція технічного нагляду".

Для обґрунтування обсягів списання машин часто використовується загальновідомий метод, що базується на кількості наявної техніки, роках її випуску та середньому терміні служби. Однак застосування цього методу на регіональному чи загальнодержавному рівнях є надзвичайно складним через численні змінні. Наприклад, у випадку використання вживаної техніки, метод розрахунків, який враховує динаміку придбання та тривалість життєвого циклу машини, стає малоефективним.

Метод опитування фахівців (фермерів, інженерів, дилерів) є корисним інструментом для збору емпіричних даних, але не вирішує проблему комплексного оцінювання списання техніки. З огляду на це, було проведено дослідження з використанням наявної статистичної інформації щодо списання різних видів техніки за попередні роки.

Основою дослідження стали дані Державної служби статистики та інших джерел, які містять інформацію про кількість техніки, що експлуатується, а також кількість списаних тракторів, вантажних автомобілів, комбайнів тощо. Статистична обробка даних та регресійний аналіз дозволили отримати точніші результати [12]. Застосовано метод моделювання, який враховує реальні показники списання, отримані з регіонів, і екстраполює їх на загальнодержавний рівень.

На рисунку 2 представлені результати визначення відсотка одиниць списаних комбайнів (зернозбиральних, кукурудзозбиральних, кормозбиральних).

Аналіз графіка показує, що частка списання зернозбиральних комбайнів протягом 2011–2019 років залишалася стабільною в межах 2,2–3,3%. Найвищі показники були зафіксовані у 2011 році (3,1%), після чого спостерігалося незначне зниження до 2,8–2,4% у 2017–2019 роках. Така стабільність свідчить про допустимість використання цих даних для прогнозних розрахунків.

Найвищий відсоток списання кукурудзозбиральних комбайнів був зафіксований у 2011 році (5,5%). Згодом простежується тенденція до поступового зменшення цього показника до 3,6% у 2019 році. Це може свідчити як про зменшення частки застарілих кукурудзозбиральних комбайнів у парку техніки, так і про покращення рівня їх технічного обслуговування.

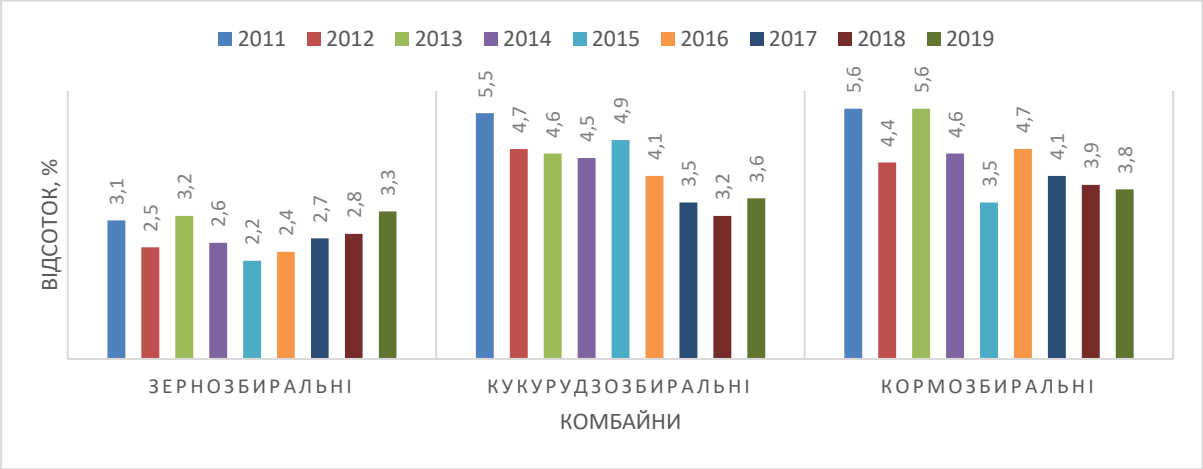


Рис. 2. Відсоток від наявної кількості списаних комбайнів сільгосппідприємствами за рік.

Отримані дані також враховують результаті проведених досліджень отримані також дані для тракторів різних категорій: до 60 кВт, від 60 до100 кВт і понад 100 кВт.

Ці результати є важливими для планування, оскільки дозволяють у поєднанні з інформацією Державної служби статистики оцінити обсяги щорічного списання техніки в розрізі різних видів машин. Такі розрахунки допомагають визначити потреби в оновленні парку техніки та створенні інфраструктури для утилізації, що сприяє покращенню технічної політики на національному рівні.

4. Визначення кількості техніки, що підлягає списанню. Розрахунок обсягів списаної техніки за рік рекомендується здійснювати на основі наявної кількості техніки та відсоткових показників списання за відповідний період. На рисунку 4, як приклад, представлені залежності щорічного списання комбайнів за останні 20 років.

Аналіз динаміки списання зернозбиральних комбайнів (синя лінія) показує чітку тенденцію до зниження кількості списаних одиниць. У 2000 році було списано 2221 одиницю, тоді як до 2020 року цей показник зменшився до 600 одиниць. Спостерігається аналогічне зниження і для спеціальних комбайнів (кукурудзозбиральних та кормозбиральних).

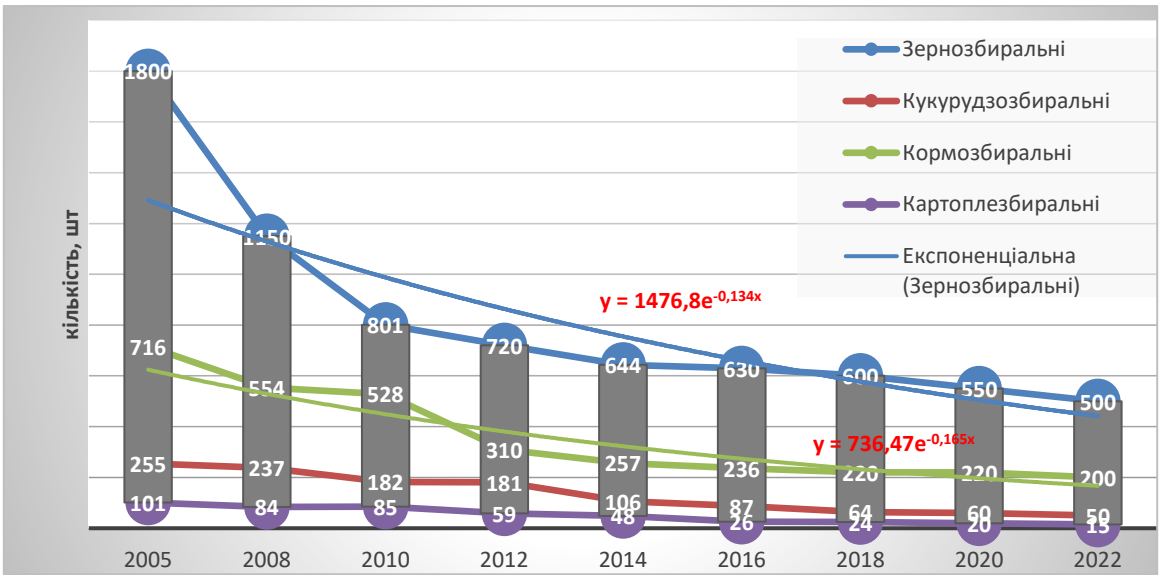


Рис. 3. Кількість комбайнів списаних за рік.

Значне зменшення списання техніки пов'язане з тим, що парк сільськогосподарської техніки поступово оновлюється більш продуктивними і надійними моделями, однак у меншій кількості. Зниження темпів списання зернозбиральних комбайнів поступово стабілізується на рівні близько 600 одиниць на рік. Це підтверджується експоненційною залежністю, яка вказує на уповільнення темпів списання.

Експоненційна модель для зернозбиральних комбайнів дозволяє прогнозувати обсяги списання у майбутньому, що є важливим для планування потужностей утилізаційних центрів. Наприклад, техніка, придбана у 2010–2015 роках, досягне граничного терміну експлуатації у 2030–2035 роках, що створить додаткове навантаження на систему утилізації.

Стабільні показники списання кукурудзозбиральних і кормозбиральних комбайнів свідчать про потребу підтримання мінімальної, але ефективної інфраструктури для утилізації цього обладнання. Уповільнення темпів списання дозволяє сконцентрувати зусилля на створенні кількох регіональних центрів утилізації, які можуть обслуговувати фермерів у ключових сільськогосподарських регіонах. В подальших дослідженнях був виконаний регіональний аналіз кількості різних видів списаної техніки, а також еволюції морфологічного складу матеріалів в конструкції машин на протязі декількох десятиліть.

Екологічні та бізнесові аспекти утилізації. Розробка системи утилізації з урахуванням типу техніки дозволить мінімізувати втрати матеріалів та створити умови для ефективної вторинної переробки. Правильна утилізація старої техніки також сприятиме зменшенню ризиків забруднення довкілля. Бізнес у сфері утилізації техніки може орієнтуватися на регіони з найбільшими обсягами списання. Наприклад, Центральний регіон може стати ключовою зоною для розвитку переробної інфраструктури, тоді як у Північному та Південному регіонах перспективною є спеціалізація на вторинній переробці металу та деталей.

Такі регіональні особливості дозволяють підприємствам розробляти інноваційні рішення, які відповідатимуть потребам локальних ринків і сприятимуть розвитку економіки циркулярного типу в аграрному секторі.

Висновки

1. Розроблено методику прогнозування обсягів списання сільськогосподарської техніки, яка враховує динаміку змін парку, інтенсивність оновлення та середньостатистичні терміни експлуатації.

2. Проаналізовано структуру та динаміку оновлення парку тракторів і комбайнів в Україні, що дозволяє прогнозувати тенденції списання техніки та обґрунтовано необхідність розвитку утилізаційної інфраструктури

3. Підтверджено доцільність використання експоненційних моделей для прогнозування щорічних обсягів списання техніки, що дозволяє оптимізувати планування утилізаційних потужностей.

4. Отримані результати можуть бути використані для формування державної політики у сфері управління технічними відходами агропромислового комплексу.

Список використаних джерел

1. Директиви 2000/53/ЄС (ELV) з утилізації старих автомобілів (з урахуванням змін, внесених рішенням 2002/525/ЄС, рішенням 2005/673/ЄС, рішенням 2008/689/ЄС, рішенням 2010/115/ЄС.

2. Директиви 2005/64/ЄС (RRR) щодо класифікації типів ТЗ щодо їх повторного використання, вторинної переробки та утилізації.

3. Закон України від 16 січня 2014 року № 719-VII. "Про утилізацію транспортних засобів".

4. Закон України від 04.07.2013 № 421-VII. "Про оброблення транспортних засобів, знятих з обліку".

5. Закон України від 9 липня 2023 року. «Про управління відходами».

6. Закон України від 05.06.2003 року № 900-IV. "Про захист прав покупців сільськогосподарських машин".

7. Державна служба статистики України. Дані про динаміку списання сільськогосподарської техніки, статистичні збірники про сільське господарство. https://www.ukrstat.gov.ua.

8. Науменко А.А., Тимчук Д.С. Аналіз оновлення парку вантажних автомобілів в підприємствах агропромислового комплексу. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Автомобільний транспорт в аграрному секторі: проектування, дизайн та технологічна експлуатація». 2019. С. 22–24.

9. Ринок сільськогосподарської техніки України: сучасний стан та перспективи розвитку. Pro-Consulting https://pro-consulting.ua/ua/pressroom/rynok-selskohozyajstvennoj-tehniki-ukrainy-sovremennoe-sostoyanie-i-perspektivy-razvitiya.

10. Бойченко С.В., Лейда К.М., Іванченко О. В. Екологістика, утилізація та рециклінг транспортних засобів: тенденції та перспективи розвитку. Наукоємні технології. 2016. Вип. 2(30). DOI: 10.18372/2310-5461.30.10568.

11. Науменко О.А., Біловод О.І., Тарасенко Д.С. Визначення об'ємів утилізації обладнання АПК. Нові технології і обладнання харчових та переробних виробництв: Матеріали І Всеукраїнської науково-практичної конференції. Полтава, 19-20 квітня 2023 року. ПДАУ.

12. Гуримський В. В. Аналіз щорічного списання комбайнів в АПК. / В. В. Гуримський ; керівник О. А. Науменко // Молодь і індустрія 4.0 в XXI столітті: матеріали XX Міжнародного форуму молоді, 4-5 квітня 2024 року. Харків. ДБТУ, 2024. С. 11.

13. Науменко О.А. Еволюція концепції ремонту і обслуговування (технічного сервісу) техніки АПК. Крамаровські читання: збірник тез доповідей XI Міжнародної науково-технічної конференції з нагоди 117-ї річниці від дня народження професора Крамарова В.С. (1906-1987), м. Київ, 22-23 лютого 2024 року. Київ. НУБіП України. 2024. С. 234–235.

14. Науменко А.О., Біляєва О.С., Науменко О.А. Дослідження процесу оновлення тракторів потужністю більше 100 кВт в АПК України. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: збірник тез доповідей IX Міжнародної науково-практичної конференції, 14-16 травня 2019 року. м. Чернігів. у 2 томах. Чернігів. ЧНТУ. 2019. Том 1. С. 80–81.

References

1. Directive 2000/53/EC (ELV) on the disposal of end-of-life vehicles. (2010). (as amended by Decision 2002/525/EC, Decision 2005/673/EC, Decision 2008/689/EC, Decision 2010/115/EC.

2. Directive 2005/64/EC (RRR) on the classification of types of vehicles for the purposes of their reuse, recycling and disposal. (2005).

3. Law of Ukraine dated January 16. (2014). No. 719-VII. "On the disposal of vehicles".

4. Law of Ukraine dated July 4. (2013). No. 421-VII. "On the treatment of vehicles removed from registration".

5. Law of Ukraine dated July 9. (2023). "On waste management".

6. Law of Ukraine dated 05.06.2003. (2003). No. 900-IV. "On the protection of the rights of buyers of agricultural machinery".

7. State Statistics Service of Ukraine. (2024). Data on the dynamics of write-off of agricultural machinery, statistical collections on agriculture. https://www.ukrstat.gov.ua.

8. Naumenko A.A., Tymchuk D.S. (2019). Analysis of the renewal of the fleet of trucks in the enterprises of the agro-industrial complex. Materials of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference "Motor Transport in the Agricultural Sector: Planning, Design and Technological Operation". P. 22–24.

9. The agricultural machinery market of Ukraine: current state and development prospects. (2024). Pro-Consulting https://pro-consulting.ua/ua/pressroom/rynok-selskohozyajstvennoj-tehniki-ukrainy-sovremennoe-sostoyanie-i-perspektivy-razvitiya.

10. Boychenko S.V., Leida K.M., Ivanchenko O. V. (2016). Environmental management, utilization and recycling of vehicles: trends and development prospects. Science-intensive technologies. Issue 2(30). DOI: 10.18372/2310-5461.30.10568.

11. Naumenko O.A., Bilovod O.I., Tarasenko D.S. (2023). Determination of the volumes of utilization of agricultural equipment. New technologies and equipment of food and processing industries: Materials of the 1st All-Ukrainian scientific and practical conference. Poltava, April 19-20, 2023. PDAU.

12. Gurymsky V.V. (2024). Analysis of the annual write-off of combines in the agricultural industry. Youth and industry 4.0 in the 21st century: materials of the 20th International Youth Forum, April 4-5, 2024. Kharkiv. DBTU. P. 11.

13. Naumenko O. A. (2024). Evolution of the concept of repair and maintenance (technical service) of agricultural equipment. Kramarov readings: collection of abstracts of the reports of the 11th International scientific and technical conference on the occasion of the 117th anniversary of the birth of Professor Kramarov V. S. (1906-1987), Kyiv, February 22-23, 2024. Kyiv. NUBiP of Ukraine. P. 234–235.

14. Naumenko A.O., Bilyaeva O.S., Naumenko O.A. (2019). Research on the process of updating tractors with a capacity of more than 100 kW in the agro-industrial complex of Ukraine. Comprehensive quality assurance of technological processes and systems: collection of abstracts of reports of the IX International Scientific and Practical Conference, May 14-16, 2019. Chernihiv. in 2 volumes. Chernihiv. ChNTU. Volume 1. P. 80–81.

Коваленко В.О.,
Журавель О.В.,
Стрижак В.В.,
Іглін С.П.,
Стрижак М.Г.
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
м. Харків, Україна,
E-mail:
vsevolod.stryzhak@khpi.edu.ua

ПРОГНОЗУВАННЯ ВАГИ МОСТОВИХ КРАНІВ МЕТОДАМИ АНАЛІЗУ ДАНИХ

https://doi.org/10.37700/ts.2024.25.153-164

УДК 621.86

Коваленко В.О., Журавель О.В., Стрижак В.В., Іглін С.П., Стрижак М.Г. ***Прогнозування ваги мостових кранів методами аналізу даних.***

Анотація. *У статті представлено новий метод для вирішення науково-практичної задачі автоматизованого розрахунку ваги мостових кранів загального призначення. Числові дані щодо ваги наявних кранів наведено у вигляді таблиць і структуровано в залежності від вантажопідйомності і прольоту. Використано гіпотези математичної статистики, які дали змогу розподілити результати відповідно до нормального закону за умови однакової точності отриманих даних. На основі цих припущень застосовано метод найменших квадратів, що дозволило побудувати функцію двох змінних, яка визначає залежність ваги крана від прольоту та вантажопідйомності, об'єднуючи ці параметри. Отримано формулу, що дає можливість програмно обчислювати вагу кранів. За статистичними даними побудовано нейромережу, яка аналогічно до традиційних статистичних методів знаходить вагу мостових кранів. Виконано оцінку якості отриманого результату традиційним статистичними методами та за допомогою нейромережі. Виконано дослідження роботи статистичної моделі і нейромережі в області, що виходить за область визначення даних У статті обгрунтовано переваги запропонованого методу.*

Ключові слова: *нейронна мережа, мостовий кран, вага крану, автоматизація, розрахунок.*

Kovalenko V.O., Zhuravel' O.V., Stryzhak V.V., Ihlin S.P., Stryzhak M.H. ***Forecasting the weight of bridge cranes using data analysis methods.***

Abstract. *The article presents a new method for solving the scientific and practical problem of automated calculation of the weight of general-purpose bridge cranes. Numerical data on the weight of existing cranes are given in the form of tables and structured depending on the load capacity and span. Hypotheses of mathematical statistics were used, which made it possible to distribute the results according to the normal law under the condition of the same accuracy of the obtained data. Based on these assumptions, the least squares method was applied, which made it possible to construct a function of two variables that determines the dependence of the crane weight on the span and load capacity, combining these parameters. A formula was obtained that makes it possible to programmatically calculate the weight of cranes. Based on statistical data, a neural network was built, which, similarly to traditional*

statistical methods, finds the weight of bridge cranes. The quality of the obtained result was assessed using traditional statistical methods and using a neural network. The work of the statistical model and neural network in the area beyond the data definition area was studied. The article substantiates the advantages of the proposed method.

Key words: *neural network, bridge crane, crane weight, automation, calculation.*

Постановка проблеми

Наукові школи в та за кордоном створили значний теоретичний фундамент для проектування механізмів вантажопідйомних машин, підтвердження їх міцності, стійкості, витривалості і інших показників безпечної роботи. Крім цього підприємствами напрацьовано великий масив даних фактичних конструкцій виготовлених і працюючих машин. Однак підходи до проектування нових машин в більшості випадків, як і раніше передбачають велику кількість ручної роботи. Традиційний розрахунок потужності приводу механізму пересування крану вимагає визначення опору статичного пересування крану. В свою чергу цей параметр залежить від конкретних показників – діаметра колеса, діаметра цапфи, коефіцієнта реборди, що може бути різним в залежності від типу струмопідводу, а також від форми поверхонь рейки та колеса (опір тертя). Тобто вже на цьому етапі нам необхідно прийняти велику кількість конструктивних рішень, що є дуже затратним. Для вирішення цієї проблеми пропонується змінити підхід, використовуючи математичні методи статистики. Це дозволить автоматизувати процес розрахунку і скоротить час проектування, що є актуальним на сьогоднішній день.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Значення ваги кранів формується через велику кількість факторів, але найголовнішим чином визначається розрахунком на міцність, що докладно описано в ряді довідкової літератури та стандартів зокрема в роботах [1–3]. Актуальність теми також підтверджує і велика кількість опублікованих досліджень в галузі вивчення силових факторів та динаміки мостових кранів, що супроводжує їх роботу. Так в статті [4] вивчається вплив бокових сил на ходову частину мостового крана. Заміна аналітичних розрахунків чисельними також досліджується і для металоконструкцій мостових кранів, але для цього необхідно порівняти їх результати. Приклад такого дослідження виконано в роботі [5]. Чисельні розрахунки параметрів застосовуються все частіше, особливо при виборі електроприводів, що випливає з публікацій [6–10]. Питання вдосконалення розрахунку в частині визначення ваги мостових кранів залишається висвітленим недостатньо і потребує подального вивчення.

Формулювання мети досліджень

Мета дослідження сформувати фунціональну залежність для визначення ваги мостового крану в залежності від вантажопідйомності і прольоту, що дозволить автоматизувати розрахунок.

Результати досліджень

Найбільш точне визначення ваги крану відбувається на заключному етапі проектування, коли відома конструкція всіх його основних елементів. В свою чергу, на початковому етапі розробки крану також необхідно знати точне значення його ваги. Від цього буде залежати визначення його ціни і ціни проекту, а також дані ваги крану

необхідні для визначення ряду інших параметрів – потужності механізмів пересування, міцності підкранових шляхів.

На практиці на початкових етапах проектування користуються даними вже виконаних проектів. Складність полягає в тому, що параметри крану, який необхідно буде виготовити можуть не співпадати з параметрами вже виготовлених кранів. Тому, спираючись на виконані проекти потребується виконувати усереднення, що вимагає ручної роботи і прийняття відповідальних рішень. Вирішенням цієї проблеми і способом підвищити точність є застосування статистичного методу.

Вага крану головним чином залежить від таких факторів: група режиму роботи, проліт та вантажопідйомність.

Розподілимо крани в залежності від груп класифікації режиму роботи за ISO 4301 наступним чином : А1-А3 – легкі, А4-А5 – середні, А6-А8 – важкі.

Використовуючи дані виконаних проектів (будемо вважати їх експериментальними даними), для кожної з цих трьох груп запишемо в таблиці значення ваги кранів у відповідності до прольоту і вантажопідйомності. Експериментальні дані для різних груп режиму роботи приведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Експериментальні дані щодо ваги мостових кранів в залежності від прольоту і вантажопідйомності для груп режиму роботи А6-А8

Проліт, м в/п, т	10	14	18	22	26	30
5	14,99	16,88	20,62	25,46	30,36	33,79
10	19,04	21,81	24,65	27,64	31,96	38,08
15	25,39	28,19	31,35	35,49	40,7	48,76
20	27,73	30,17	33,26	37,09	42,28	49,12
30	37,31	41,5	47,57	54,45	60,81	69,93
50	50,89	59,45	63,83	68,52	75,42	83,59

Проведемо дослідження нульової гіпотези про нормальний розподіл експериментальних даних. Для прикладу такого аналізу використаємо дані (табл. 1). Тут ми маємо 36 експериментальних точок, математичне очікування залишків становить $m = 2{,}9606 \times 10^{-15}$, а їхнє середньоквадратичне відхилення – $s = 1{,}7327$. На рис. 1 показано емпіричну функцію розподілу цих даних, нормовану за формулою $x_i = \left(r_i - m_R\right) / s_R$, та стандартну функцію нормального розподілу. Тут статистика Колмогорова становить 0,1101, що менше за критичне значення 0,2653. Отже, на рівні значущості α=0,01 немає підстав відкидати нульову гіпотезу, і розподіл результатів експерименту можна вважати нормальним (рис. 1). Побудуємо для цих даних будувалася математична модель у вигляді полінома оптимального ступеня:

$$z = b_1 + b_2 \cdot x + b_3 \cdot y + b_4 \cdot x^2 + b_5 \cdot x \cdot y +$$
$$+ b_6 \cdot y^2 + b_7 \cdot x^3 + b_8 \cdot x^2 \cdot y + b_9 \cdot x \cdot y^2 + b_{10} \cdot y^3 + \ldots$$

де: x – проліт, м; y – вантажопідйомність, т.

Для всіх груп режимів роботи ми додавали до моделі доданки не по одному, а групами: лінійні, квадратичні тощо. У табл. 2 наведені вибіркові дисперсії для різних математичних моделей і різних груп режиму роботи та їхнє порівняння.

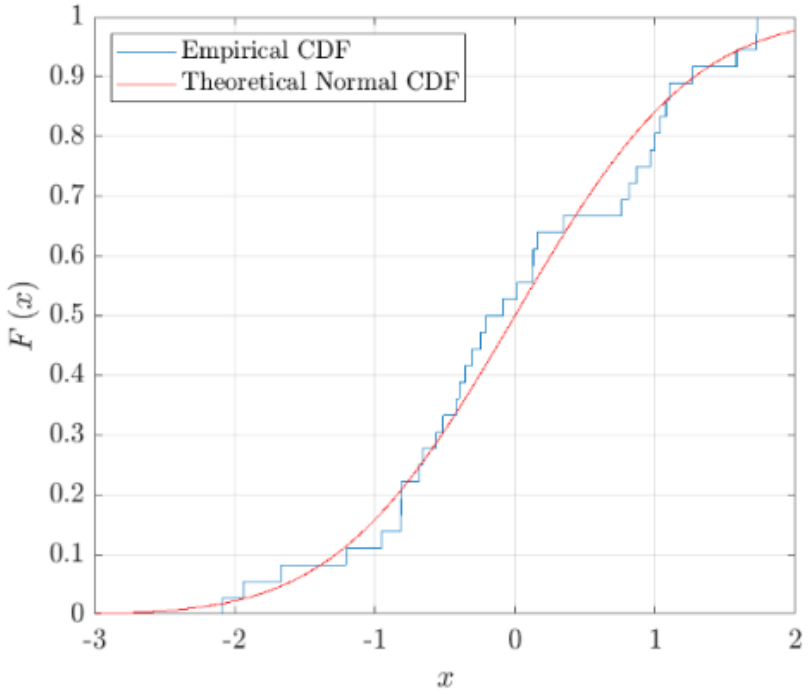


Рис. 1. Емпірична та теоретична стандартна нормальна кумулятивна функція розподілу для даних ваги крану

Таблиця 2

Вибіркові дисперсії та їхнє порівняння для різних математичних моделей та різних груп режиму роботи.

режим роботи модель	А6-А8
лінійна: m=3; f=36–3=33	D_3=9.3593
квадратична: m=6; f=36–6=30	D_6=5.2323
порівняння квадратичної моделі з лінійною: $F_{0.01}(30,33)$=0.4246	D_6/D_3=0.5591; 0.5591>0.4246; але все одно приймаємо квадратичну модель
кубічна: m=10; f=36–10=26	D_{10}=4.0417
порівняння кубічної моделі з квадратичною: $F_{0.01}(26,30)$=0.3996	D_{10}/D_6=0.7725; 0.7725>0.3996; але все одно приймаємо кубічну модель
4-го ступеня: m=15; f=36–15=21	D_{14}=3.4154
порівняння моделі 4-го ступеня з кубічною: $F_{0.01}(21,26)$=0.3610	D_{14}/D_{10}=0.8450; 0.8450>0.3610; відкидаємо модель 4-го ступеня

Пояснимо заповнення табл. 2 на прикладі стовпчика А6-А8. Для спрощення обчислень ми додавали до моделі доданки не по одному, а групами: лінійні, квадратичні

тощо. Для лінійної моделі (m=3) вибіркова дисперсія D_3=9.3593, а для квадратичної (m=6): D_6=5.2323. Їхнє відношення D_6/D_3=0.5591, а квантиль F-розподілу Фішера для f_1=36–6=30; f_2=36–3=33 на рівні значущості α=0.01 дорівнює $F_{0.01}(30,33)$=0.4246. Оскільки 0.5591>0.4246, то зменшення вибіркової дисперсії при врахуванні квадратичних доданків не є суттєвим, але все одно врахуємо квадратичні доданки.

Далі додаємо ще чотири кубічні доданки: це базисні функції x^3, x^2y, xy^2 та y^3. Вибіркова дисперсія кубічної моделі D_{10}=4.0417, а її відношення до вибіркової дисперсії квадратичної моделі D_{10}/D_6=0.7725. Відповідний квантиль F-розподілу Фішера $F_{0.01}(26,30)$=0.3996. І тут 0.7725>0.3996, але й кубічні доданки теж врахуємо.

Тепер додамо ще й п'ять доданків 4-го ступня: x^4; x^3y; x^2y^2, xy^3 та y^4. Для цієї моделі вибіркова дисперсія D_{14}=3.4154; її відношення до вибіркової дисперсії кубічної моделі D_{14}/D_{10}=0.8450. Квантиль $F_{0.01}(21,26)$=0.3610. Тут теж 0.8450>0.3610; тобто зменшення вибіркової дисперсії є незначним. Робимо висновок, що врахування доданків вищого ступеня не додає точності розрахунку. Отже, доданки 4-го ступеня можна не враховувати, і обмежитися кубічною моделлю. Слід зазначити, що проведені експерименти для інших значень дали результати, які свідчать про обгрунтованість врахування доданків 3-го ступеня, а доданки 4-го ступеня у практично досяжних значеннях ваги крану завжди залишаються несуттєвими.

В таблиці 3 наведені розраховані параметри кубічної моделі та довірчі інтервали до них для кранів усіх груп режиму роботи.

Таблиця 3

Параметри кубічної моделі та довірчі інтервали для них

Параметр	Значення і довірчі інтервали
b_1	0,660≤10,927≤21,193
b_2	-0,881≤0,732≤2,345
b_3	-0,898≤-0,494≤-0,091
b_4	-0,118≤-0,035≤0,048
b_5	0,019≤0,042≤0,065
b_6	0,036≤0,0488≤0,0619
b_7	-0,0002≤0,001≤0,002
b_8	-0,0007≤-0,0002≤0,0002
b_9	-0,0005≤-0,0003≤0
b_{10}	-0,0007≤-0,0006≤-0,0004

На рисунку 2 показані поверхні залежності ваги від прольоту та вантажопідйомності для різних груп режиму роботи кранів. Червоними зірочками показані експериментальні дані, а напівпрозорими поверхнями — верхні та нижні довірчі границі. З рисунків видно, що запропонована кубічна модель достатньо точно апроксимує експериментальні дані, і всі експериментальні точки потрапляють в довірчі границі.

Визначення ваги крану за допомогою нейронних мереж. У статистичних моделях ми самі задаємо (або обираємо з теоретичних міркувань) вигляд теоретичної залежності, а потім перевіряємо адекватність побудованої моделі за певними критеріями. Інший підхід використовується в штучних нейронних мережах.

Нейронна мережа — це програма, створена за принципами роботи головного мозку людини чи тварини. Така мережа опрацьовує поданий на її вхід набір даних, але

при цьому не вимагає завдання конкретної теоретичної залежності. Вона сама під час навчання аналізує дані, шукає в них закономірності та підбирає найкращу, на її погляд, математичну модель. Аналітичний вигляд цієї моделі може бути дуже складним, і навіть не виражатися готовим аналітичним виразом, а бути якимось алгоритмом (чорною скринькою). Але за цією моделлю можна прогнозувати поведінку досліджуваного об'єкту при довільному вході.

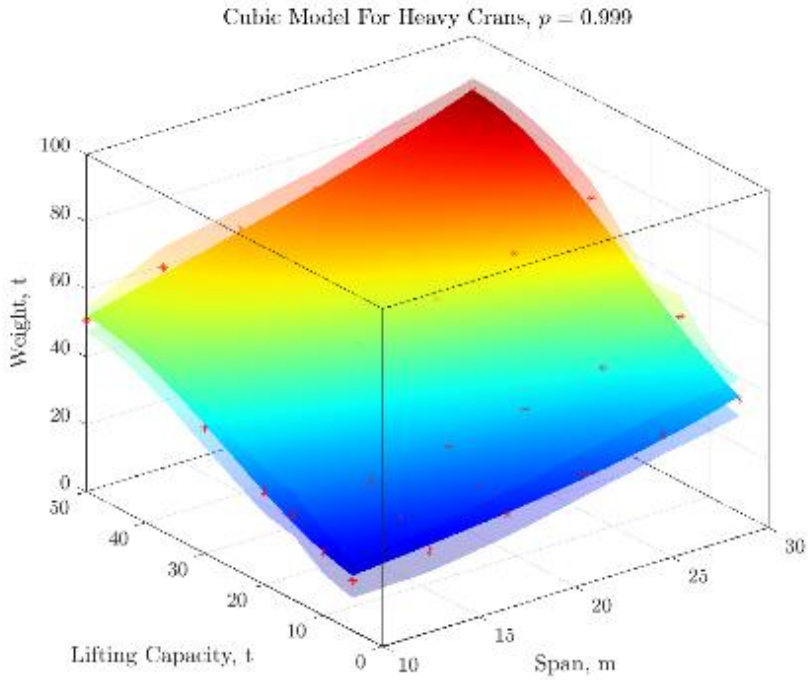


Рис. 2. Результат розрахунку маси крану в залежності від прольоту і вантажопідйомності на основі отриманої функціональної залежності для кранів режимів роботи: А6-А8

Розглянемо можливості застосування нейронних мереж для нашої задачі визначення маси крану. Маємо значення функції двох змінних $z = f(x, y)$ в окремих точках з можливими похибками. Ставиться завдання як найточніше спрогнозувати поведінку цієї функції в проміжних точках. Для цієї задачі можна використати, зокрема, глибокі нейромережі з прямим зв'язком (DFFNN — Deep Feed Forward Neural Network), які використовуються в задачах розпізнавання та прогнозування. Такі мережі можуть бути представлені у вигляді ациклічного орграфу (орієнтованого графу без орієнтованих циклів): вони отримують інформацію на вході, обробляють її та подають на вихід. Вхідні нейрони — це початкові вершини орграфу (з них тільки виходять дуги), вихідні — кінцеві (в них тільки входять дуги). Всі інші вершини (нейрони) утворюють приховані шари нейронної мережі. З теорії орграфів відомо, що вершини ациклічного орграфу частково упорядковуються: орграф DFFNN можна зобразити таким чином, що вхідні нейрони будуть зображені на одній вертикальній прямій ліворуч, вихідні – на одній вертикальній прямій праворуч, а приховані шари — посередині на одній або кількох вертикальних лініях, і всі дуги будуть прямувати зліва направо.

DFFNN легко програмуються, для них є готові рішення в сучасних математичних пакетах. У таких мережах кожен вхідний нейрон поєднується з кожним нейроном першого прихованого шару, у свою чергу кожний нейрон першого прихованого шару поєднується з кожним нейроном другого прихованого шару, і т. д. аж до вихідного шару.

В роботі [1] надані рекомендації з вибору кількості прихованих шарів. Для простих даних достатньо 1-2 шари, для складніших — від 3 до 5. Щоб виявити, як в нашому випадку кількість прихованих шарів впливає на точність був проведений наступний чисельний експеримент. Кількість прихованих шарів варіювалася від 1 до 15, і для кожного значення було проведено по 20 розрахунків. Залежність середньої по цих 20 розрахунках точності від кількості прихованих шарів наведена на рис. 3.

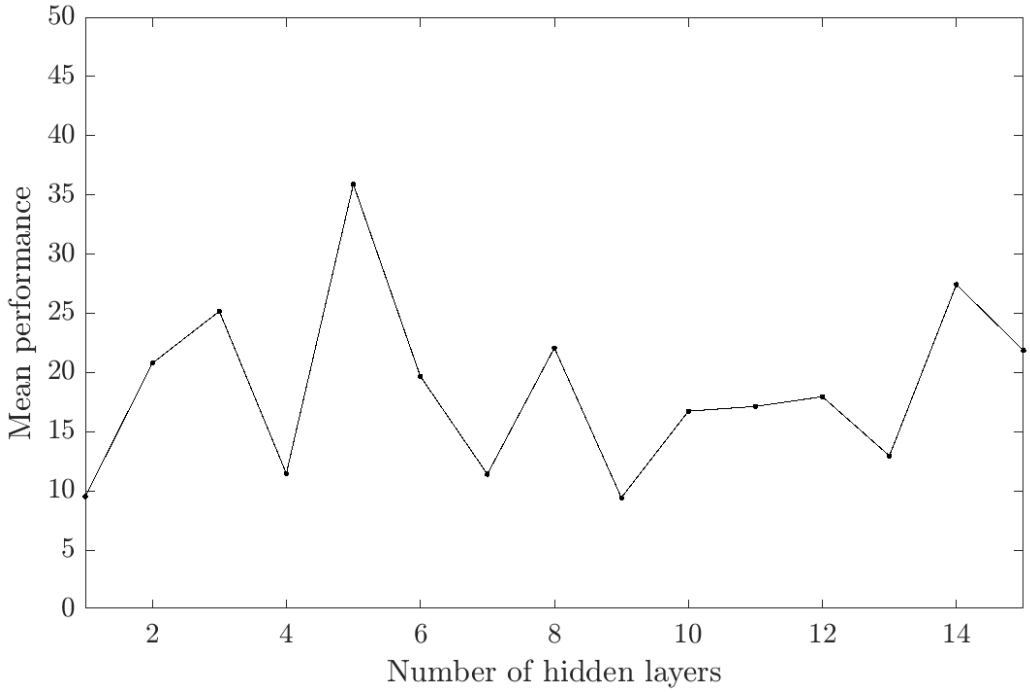


Рисунок 3. Залежність середньої точності від кількості прихованих шарів

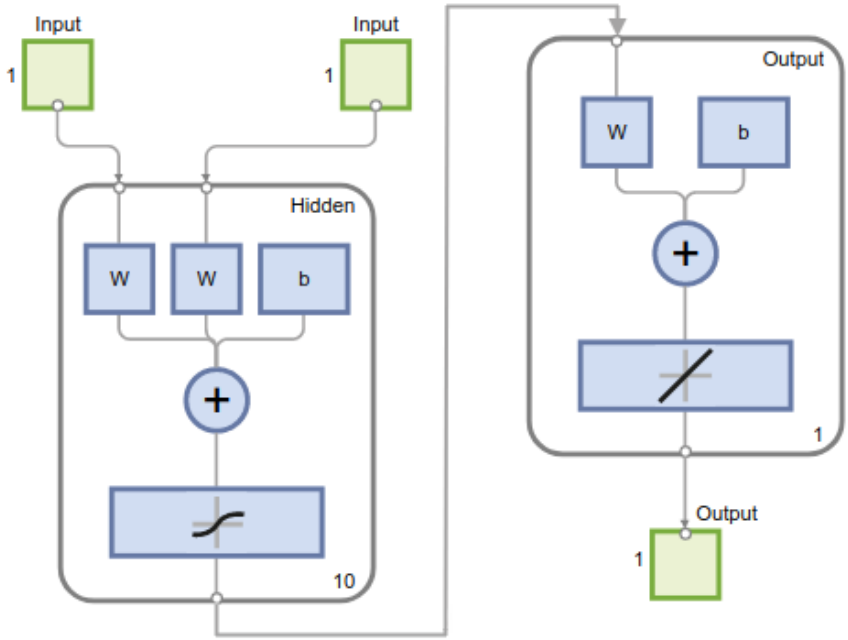


Рис. 4. Структура нейронної мережі для розрахунку ваги мостових кранів

Як випливає з рис. 3, точність змінюється абсолютно непередбачуваним чином. Тому для подальших розрахунків згідно з рекомендаціями [1] була обрана мережа з 4

прихованими шарами. При цьому треба використовувати мережу з двома входами (x, y) та одним виходом (z). Структура цієї мережі показана на рис. 4.

Є різні види навчання нейронних мереж: контрольоване, неконтрольоване, з підкріпленням тощо. У нашому випадку, коли відомі значення функції $z = f(x, y)$ в окремих точках, використано саме контрольоване навчання. Контрольними точками є як раз відомі значення функції. Мережа навчається на цих даних, а потім видає результати в потрібних проміжних точках. При контрольованому навчанні використовується алгоритм градієнтного спуску.

Градієнтний спуск є одним з основних алгоритмів оптимізації в області машинного навчання та статистики. Його мета полягає у знаходженні мінімуму функції втрат шляхом ітеративного коригування параметрів моделі на основі обчислених градієнтів.

Функція втрат є критерієм для оцінки якості моделі шляхом вимірювання відхилення між прогнозованими значеннями та фактичними значеннями у навчальному наборі даних. Вона є невід'ємною частиною навчання моделей машинного навчання, оскільки дозволяє кількісно оцінювати ефективність моделі.

Процедура градієнтного спуску включає обчислення градієнту функції втрат відносно параметрів моделі, що дозволяє оцінити напрямок найбільшого зменшення функції. Параметри моделі оновлюються за допомогою цього градієнту з визначеним кроком навчання, що забезпечує поступове наближення до мінімуму функції втрат.

Оскільки розроблена нейронна мережа виконую задачу регресії, передбачаючи чисельні значення, у якості функції втрат була використана середньоквадратична похибка.

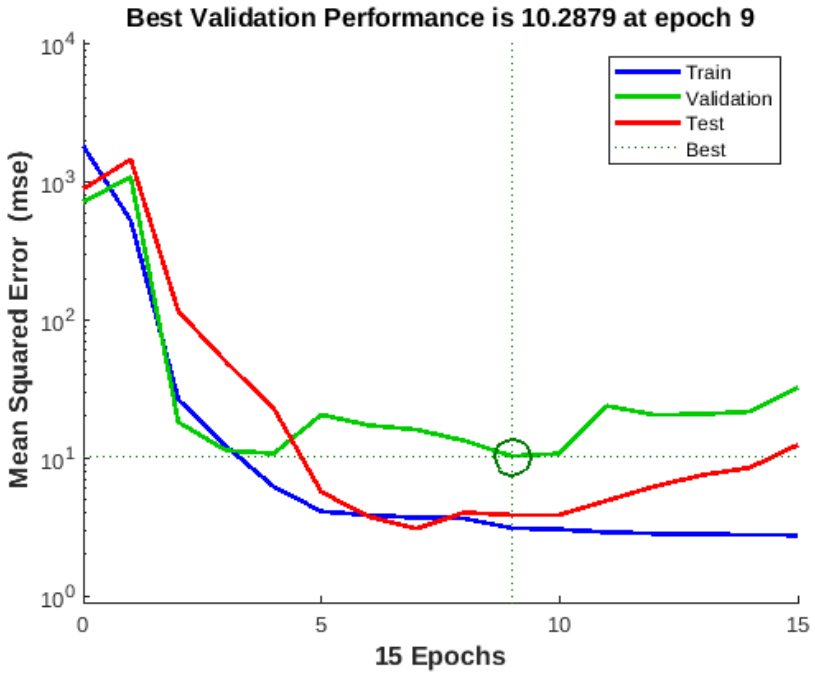


Рис. 5.

Під час навчання моделей, повний набір даних прийнято ділити на тренувальний, валідаційний та тестувальний набори. Тренувальний набір використовується для навчання моделі, валідаційний набір слугує для налаштування гіпер-параметрів (таких як згадана вище кількість прихованих шарів), а тестувальний набір дозволяє оцінити остаточну ефективність моделі на невідомих даних.

Графіки зміни функції втрат протягом тренування для кожного з цих наборів можуть бути використані для виявлення явищ недо- чи перенавчання моделі. У випадку недонавчання, функція втрат буде залишатися високою як на тренувальному, так і на валідаційному наборах, що свідчить, зокрема, про недостатню спроможність моделі адаптовуватися до тренувальних даних. Перенавчання ж проявляється в значному розходженні функцій втрат на тренувальному і валідаційному наборах, де модель демонструє дуже низькі втрати на тренувальних даних, але високі на валідаційних, що вказує на те, що модель занадто точно адаптована до специфічних ознак тренувального набору і не здатна узагальнювати нові дані. Для вирішення проблеми навчання можна як тим чи іншим чином збільшити розмір тренувального набору даних, так і використати менш складну модель.

Аналізуючи зміни значень функції втрат під час навчання нейронної мережі, ми спостерігаємо її поступове зниження, а також відсутність великого відриву тренувального набору даних від інших. Це свідчить про гарний баланс кількості даних та складності моделі і відсутність проблем недо- та перенавчання.

При тренуванні за допомогою градієнтного спуску також важливо звертати увагу на абсолютні значення обрахованих градієнтів, щоб уникнути феноменів "зникнення" та "вибуху" градієнтів. Зникнення градієнтів виникає, коли градієнти в нейронній мережі стають дуже малими, що призводить до повільного або взагалі відсутнього навчання. У свою чергу, вибух градієнтів відбувається, коли градієнти стають надзвичайно великими, що може спричинити нестабільність навчання і великі коливання ваг. Обидві проблеми ускладнюють ефективне навчання глибоких нейронних мереж.

На графіку зміни абсолютних значень градієнту протягом тренування коливання залишаються в межах норми, тому не можна виділити вираженість жодного з цих феноменів і їх негативний вплив на тренування. Також можна відмітити наближення значення градієнта до 0 на тій же епосі тренування, де було зафіксоване найменше значення функції втрат, що говорить про досягнення принаймні локального мінімума функції на цій епосі.

На рис. 6 представлена поверхня, що відображає результат розрахунку маси крану від прольоту і вантажопідйомності виконаний за допомогою нейромережі.

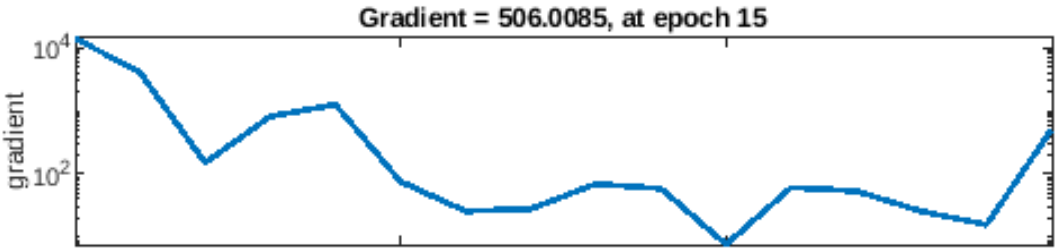


Рис. 6.

Похибка мережі на цих даних (сума квадратів відхилень даних мережі від заданих) складає ~3.37285. Для порівняння: похибка повної кубічної моделі ~105.0847.

Слід зауважити, що штучна нейронна мережа працює приблизно так, як і мозок людини: при кожному запуску дає різні результати. Але майже завжди її похибка приблизно в 10-15 разів менша за похибку повної кубічної моделі.

Сфера застосування отриманих функціональних залежностей. Оскільки ми отримали функціональні залежності на основі даних, які охоплюють відносно вузький проміжок можливих значень прольоту і вантажопідйомності, доцільно дослідити поведінку отриманих функцій для розширених діапазонів, тобто можливість екстра-

поляції результатів. На рис. 8 представлені графіки розрахунку маси кранів режимів роботи А6-А8 за допомогою поліному 3 ступеня (а) і за допомогою нейромережі (б).

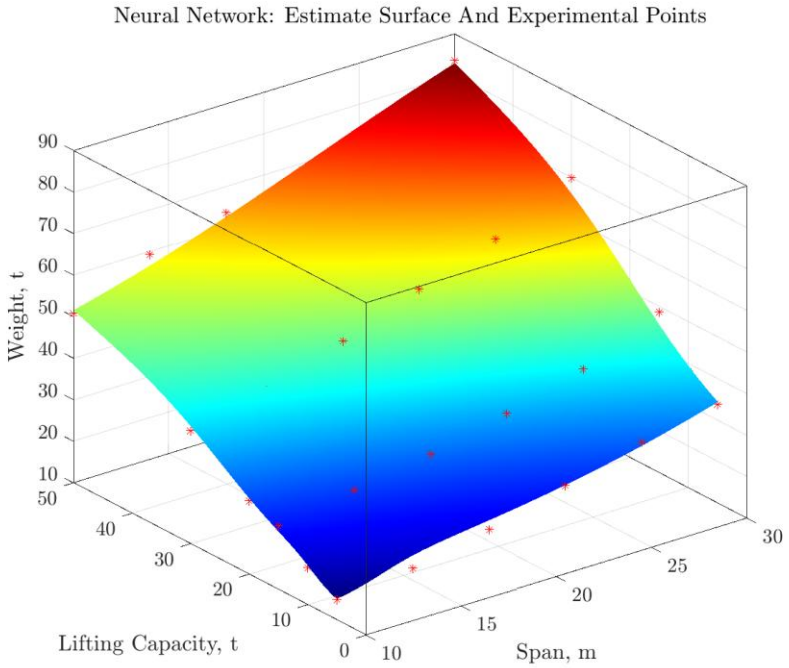
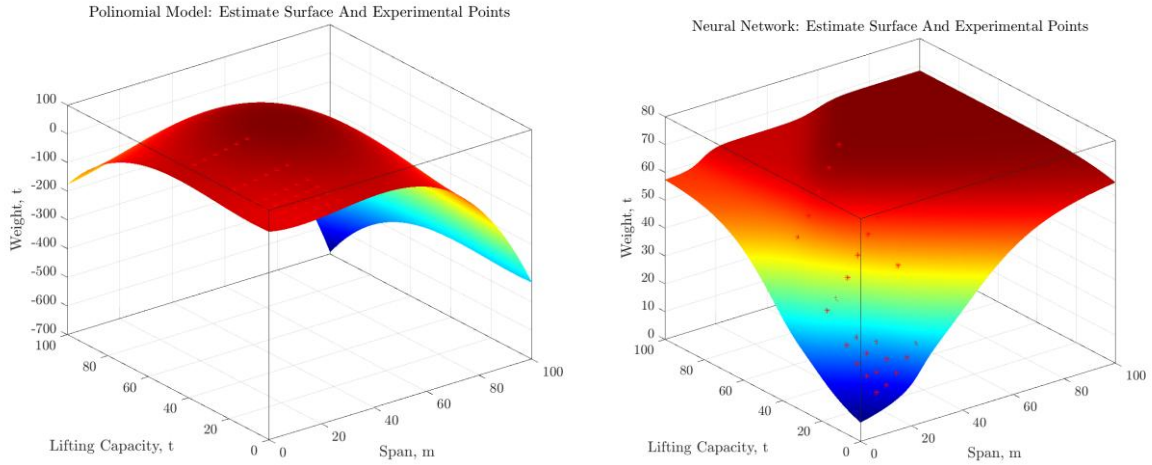


Рис. 7. Результат розрахунку маси крану в залежності від прольоту і вантажопідйомності за допомогою нейромережі для кранів режимів роботи А6-А8



а б

Рис. 8. Порівняння результатів розрахунку маси крану групи режимів роботи А6-А8 в залежності від прольоту і вантажопідйомності на основі фунціональної залежності і за допомогою нейромережі: а – розрахунок на основі функціональної залежності; б – розрахунок за допомогою нейромережі

З графіків на рис. 8 можна зробити висновок, що знайдена функціональна залежність добре апроксимує експериментальні дані в тому діапазоні, де вони відомі. Але за межами діапазону функція починає швидко спадати і давати хибні результати. Трохи кращий характер зміни значень ваги кранів за межами діапазону експериментальних даних спостерігається при обчисленні за допомогою нейромережі.

Однак в обох випадках, можна зробити висновок що обидва ці методи погано придатні для екстраполяції. Тому для розширення діапазону розрахунку необхідно визначати функціональну залежність і виконувати навчання нейромережі на більшій кількості експериментальних даних.

Висновки

В статті розв'язана задача визначення ваги мостового крану на основі статистичних даних за допомогою функціональних залежностей. Встановлено, що розрахунок параметрів за традиційною методикою вимагає відчутних працезатрат і є ускладненим на певних етапах проектування. Запропонована концепція розрахунку ваги мостових кранів із застосуванням методів математичної статистики на основі існуючої теоретичної бази й бази фактичних значень параметрів раніше виготовлених і успішно працюючих кранів.

Список використаних джерел

1. Scheffler M. Grundlagen der Fördertechnik — Elemente und Triebwerke. Vieweg Verlag. 1994.

2. EN 13001-1 Cranes - General design - Part 1: General principles and requirements.

3. EN 13001-2 Crane safety - General design - Part 2: Load actions.

4. Zelić, Atila & Zuber, Ninoslav & Šostakov, Rastislav. Experimental determination of lateral forces caused by bridge crane skewing during travelling. Eksploatacja i Niezawodnosc - Maintenance and Reliability. 2017. Vol. 20. P. 90-99. doi: 10.17531/ein.2018.1.12.

5. Denis Molnár, Miroslav Blatnický, Ján Dižo. Comparison of Analytical and Numerical Approach in Bridge Crane Solution. Manufacturing Technology. April 2022, Vol. 22, No. 2 DOI: 10.21062/mft.2022.018.

6. Kozłowski, M., & Czerepicki, A. Quick electrical drive selection method for bus retrofitting. Sustainability (Switzerland), 2023. 15(13). https://doi.org/10.3390/su151310484.

7. Husain, I., Ozpineci, B., Islam, M. S., Gurpinar, E., Su, G. J., Yu, W., Chowdhury, S., Xue, L., Rahman, D., & Sahu, R. Electric drive technology trends, challenges, and opportunities for future electric vehicles. Proceedings of the IEEE, 2021. 109(6). https://doi.org/10.1109/JPROC.2020.3046112.

8. Suryavanshi, S., Dr. Pravin M. Ghanegaonkar, Dr. Ganesh K. Jadhav, & Sagar R Wankhede. comparative performance assessment of sizing of electric motor through analytical approach for electric vehicle application. ARAI Journal of Mobility Technology, 2023. 3(4). https://doi.org/10.37285/ajmt.3.4.7.

9. Akl, M. M., Ahmed, A. A., & Rashad, E. E. M. A wide component sizing and performance assessment of electric drivetrains for electric vehicles. 2019 21st International Middle East Power Systems Conference, MEPCON 2019 - Proceedings. https://doi.org/10.1109/MEPCON47431.2019.9008195.

10. Belhadi, Y., Kraa, O., Saadi, R., Bahri, M., & Telli, K. Sizing of fuel cell/supercapacitor hybrid system based on frequency splitting of required energy. EEA - Electrotehnica, Electronica, Automatica, 2023. 71(4). https://doi.org/10.46904/eea.23.71.4.1108005.

References

1. Scheffler M. (1994). Grundlagen der Fördertechnik — Elemente und Triebwerke. Vieweg Verlag.

2. EN 13001-1 Cranes - General design - Part 1: General principles and requirements.

3. EN 13001-2 Crane safety - General design - Part 2: Load actions.

4. Zelić, Atila & Zuber, Ninoslav & Šostakov, Rastislav. (2017). Experimental determination of lateral forces caused by bridge crane skewing during travelling. Eksploatacja i Niezawodnosc - Maintenance and Reliability. Vol. 20. P. 90-99. doi: 10.17531/ein.2018.1.12.

5. Denis Molnár, Miroslav Blatnický, Ján Dižo (2022). Comparison of analytical and numerical approach in bridge crane solution. manufacturing technology. April 2022, Vol. 22, No. 2 DOI: 10.21062/mft.2022.018.

6. Kozłowski, M., & Czerepicki, A. (2023). Quick electrical drive selection method for bus retrofitting. Sustainability (Switzerland), 15(13). https://doi.org/10.3390/su151310484.

7. Husain, I., Ozpineci, B., Islam, M. S., Gurpinar, E., Su, G. J., Yu, W., Chowdhury, S., Xue, L., Rahman, D., & Sahu, R. (2021). Electric drive technology trends, challenges, and opportunities for future electric vehicles. Proceedings of the IEEE, 109(6). https://doi.org/10.1109/JPROC.2020.3046112.

8. Suryavanshi, S., Dr. Pravin M. Ghanegaonkar, Dr. Ganesh K. Jadhav, & Sagar R Wankhede. (2023). Comparative performance assessment of sizing of electric motor through analytical approach for electric vehicle application. ARAI Journal of Mobility Technology, 3(4). https://doi.org/10.37285/ajmt.3.4.7.

9. Akl, M. M., Ahmed, A. A., & Rashad, E. E. M. (2019). A wide component sizing and performance assessment of electric drivetrains for electric vehicles. 2019 21st International Middle East Power Systems Conference, MEPCON 2019 - Proceedings. https://doi.org/10.1109/MEPCON47431.2019.9008195.

10. Belhadi, Y., Kraa, O., Saadi, R., Bahri, M., & Telli, K. (2023). Sizing of Fuel Cell/Supercapacitor Hybrid System based on Frequency Splitting of required Energy. EEA - Electrotehnica, Electronica, Automatica, 71(4). https://doi.org/10.46904/eea.23.71.4.1108005.

Tytskyi O.Yu.
National Transport University,
Kyiv, Ukraine,
E-mail:
alexander.tytskyi@scania.com

METHODS OF ANALYSIS OF OUTPUT DATA FOR TRUCK ENGINE DIAGNOSTICS

https://doi.org/10.37700/ts.2024.25.165-173

УДК 621.86

Tytskyi O.Yu. ***Methods of analysis of output data for truck engine diagnostics.***

Abstract. *The article presents a new method for solving the scientific and practical problem of forming a functional dependence for determining methods of analyzing the initial data of diagnosing truck engines. Applied methods and means of studying the initial data of diagnosing truck engines have been developed, which allow minimizing the resource characteristics at the early stages of product design and modernization. In the course of the research, a method of setting the spatial impact is presented, which consists in the fact that statistical characteristics using known methods are converted into mutual characteristics taking into account the correlation of profiles. At the same time, accounting for the initial data allows for the process of forming the efforts that fall on each parameter of the technical condition of the truck engine and to bring it as close as possible to the real one.*

Key words: *data network, diagnostics, truck, method.*

Тицький О.Ю. ***Методи аналізу вихідних даних діагностування двигунів вантажних автомобілів.***

Анотація. *У статті представлено новий метод для вирішення науково-практичної задачі сформувати фунціональну залежність для визначення методів аналізу вихідних даних діагностування двигунів вантажних автомобілів. Розроблено прикладні методи та засоби дослідження вихідних даних діагностування двигунів вантажних автомобілів, що дозволяють на ранніх стадіях проектування та модернізації виробів мінімізувати ресурсні характеристик. У ході досліджень представлений спосіб завдання просторового впливу, полягає в тому, що статистичні характеристики за допомогою відомих методів перетворюються на взаємні характеристики з урахуванням кореляції профілів. При цьому облік вихідних даних дозволяє провести процес формування зусиль, що припадають на кожний параметр технічного стану двигуна вантажного автомобіля та максимально наблизити до реального.*

Ключові слова: *мережа даних, діагностування, вантажний автомобіль, метод.*

Introduction

All trucks in international and national classification systems are divided according to their purpose, consumer properties and requirements [1]. According to the classification developed by the Inland Transport Committee of the United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) and adopted by the Geneva Agreement of 1958, there are 3 categories of trucks, presented in Table 1.

When assessing the consumer properties of a truck [2], the following concepts are used in accordance with UN/ECE No. 68 No. 101. The load capacity of a truck is the largest number

of goods or passengers that a truck can simultaneously transport based on its strength and body dimensions, while complying with the permissible values of loads on the supporting surface of the road [3]. The mass of a fully equipped truck is the mass corresponding to its own mass, i.e. includes tools, a spare wheel and all provided equipment, but does not include the mass of the driver, crew, passengers and cargo [4]. The total mass is the mass of a fully equipped truck, which includes the mass of the driver, crew, cargo, passengers and luggage [5]. The load capacity of a truck is the largest mass of cargo that can be transported while complying with the permissible values of loads on the supporting surface of the road [6].

Table 1

Classification of trucks

Vehicle category	Gross weight, t	Vehicle type
N_1	$m_a \leq 3.5$	Trucks
N_2	$3.5 < m_a < 12$	
N_3	$m_a > 12$	

The truck moves on different types of roads, which, as is known, are the main source of disturbances and vibrations that negatively affect both the truck in general and the passengers and cargo transported in particular [7]. It is practically impossible to accurately assess such a large number of influences, since the condition of the road surface depends not only on the terrain, but also on weather conditions and the specifics of the region. However, to assess and analyze the operational properties of the vehicle, a simplified classification of road surface types is used. According to [8], as well as [9], highways are divided into five categories (Table 2).

Table 2

Characteristics of road operating conditions

Road category		Road clothing	Main types of coatings	Estimated speed*, km/h
1	1 – a	Capital	Cement concrete monolithic; reinforced concrete or reinforced concrete prefabricated; asphalt concrete	100
	1 – b			
2				
3				
4		Lightened	Tar concrete, paving stones, made of crushed stone, gravel and sand, treated with binders	60
		Transitional	Crushed stone and gravel, made from soils and local low-strength stone materials treated with binders.	
5		Lower	From soils fortified or improved with additives	40

* For this task

The realization of a random surface of a specific section of the road surface is called the road relief and is the most general model of the roadway. The road profile is the section of the relief in the direction of traffic [10]. The section of the surface of a specific section of the road is a realization of profile, and the set of such realizations is the road profile as a random process.

The road profile is distinguished by three components:

- Macroprofile – long smooth irregularities with a wavelength of 100 m or more,

which cause minor vibrations of the truck on the suspension, but significantly affect traction and dynamic performance;

- Microprofile – irregularities with a wavelength of 0.1 to 100 m, which cause significant vibrations of the truck on the suspension, determine the load on the components and assemblies, and are one of the main factors determining the speed of movement, maneuverability, and load capacity;
- Roughness – irregularities with a wavelength of less than 0.1 m, which are smoothed out by the tires and do not cause noticeable vibrations of the truck, but significantly affect the operation of the tires, their grip on the road surface and wear.

Analysis of recent researches

EU Directives 85/3, 86/360, 88/212, 89/338 set the maximum values of axle loads depending on the design and number of wheels of each axle. The maximum loads must not exceed the following values: on driving axles: with single wheels – 92kN; with twin wheels – 115kN; on driven axles: with single wheels – 71.2kN; with twin wheels – 101.7kN.

In the CIS countries, road trucks are divided into 2 categories depending on the axle load (Table 3): category A includes vehicles with an axle load not exceeding 100 kN per axle or 180 kN per bogie; category B includes vehicles with an axle load not exceeding 60 kN per axle or 100 kN per bogie.

Table 3

Distribution of axle loads in trucks and coupling weight coefficient

Vehicle group and axle/bogie load, kN		wheel formula	Load per axle of a full-weight vehicle, %		Load per axle of equipped vehicle, %		Gross vehicle weight, t	k_φ	
			front	back	front	back		With full load	Without cargo
B	60	4 × 2	24…30	70…76	45…49	51…55	8	0.75	0.55
	110	6 × 4	25…28	72…75	42…47	53…58	15	0.73	0.55
D	80	4 × 2	25...31	69…75	46…53	47…54	12	0.67	0.47
	140	6 × 4	22…24	76…78	33…44	56…67	18.5	0.76	0.57
	100	4 × 2	33…38	62…67	51…58	42…49	16	0.62	0.41
	180	6 × 4	23…29	71…77	53…59	41…47	24	0.75	0.54

Table 4

Truck layout parameters

Vehicle layout diagram	Gross vehicle weight, t	$L_{пл}/L$
Cab over the engine	up to 6.5	1.3…1.5
	6.5 - 12.0	
	12.0 - 16.0	
	more than 16.0	

In all-wheel drive vehicles, uniform distribution of the load on the axles leads to increased operational efficiency, while in non-all-wheel drive vehicles, the load should be distributed slightly differently, according to Table 3, since it is this distribution that leads to

satisfactory traction and coupling properties and improved cross-country ability. In this case, the assumption is made that the load is distributed throughout the body volume with the same density and the center of gravity of the load coincides with the geometric center of the body volume.

Those trucks whose gross weight, overall dimensions, or load distributed over the axles exceed the maximum permissible standards established in the relevant documents are classified as off-road, and their movement on highways is not allowed.

Table 4 shows the main dimensional parameters of the layout of trucks.

The wheel formula is also determined based on the operating conditions and purpose of the vehicle while ensuring reliable starting and movement without slipping of the driving wheels.

The aim and objectives of research

The purpose of the study is to form a functional dependence to determine methods for analyzing the initial data for diagnosing truck engines.

Research results

The condition of the vehicle moving without skidding $G_{\text{зц}}\varphi \geq G_a\Psi$ allows us to determine the coupling weight coefficient, which characterizes the part of the total vehicle load on the road that falls on the driving axle and can be used to ensure coupling qualities and overcome road resistance (Table 3).

$$k_\varphi = \frac{G_{\text{вд}}}{G_a}, \quad (1)$$

where $G_{\text{вд}}$ – the towing weight of the vehicle (weight on the driving axle),

φ – coefficient of adhesion of tires to the road;

G_a – total weight of the vehicle;

$\Psi = f + i$ – coefficient of total road resistance;

f – rolling resistance coefficient;

i – the angle of elevation of the road.

Therefore, to reduce the probability of loss of vehicle cross-country ability in specific road conditions, with a higher gross vehicle weight, there should be a greater load on the driving axle or, taking into account the limitations for the maximum axle load, there should be a greater number of driving axles. The number of driving axles is determined taking into account the purpose of the vehicles under the conditions of ensuring satisfactory traction and coupling properties of the vehicle. The minimum permissible value of the coupling weight coefficient for category A vehicles is calculated from the condition of reliable starting from a standstill and movement on a slippery road ($\varphi = 0.2$) at the rolling resistance coefficient $f = 0.008 \ldots 0.012$ on the rise with the largest permissible slope for roads with a capital coating $i = 0.05$.

$$k_{\varphi\, min} = \frac{f+i}{\varphi} = 0.29 \ldots 0.31, \quad (2)$$

For group B vehicles, the towing weight coefficient is determined taking into account more difficult road conditions: $\varphi = 0.2$, $f = 0.02 \ldots 0.03$, $i = 0.06$, $k_{\varphi\, min} = 0.40 \ldots 0.45$.

Table 3 shows the optimal values k_φ, that exceed the value $k_{\varphi\, min}$, which indicates the possibility of using these vehicles as tractors in a road train, and their passability will be ensured even when driving without cargo on a slippery road.

Smoothness of movement - a set of potential properties of a vehicle that characterize its ability to move in a given speed range without exceeding the established norms of vibration load of the driver, passengers, cargo and structural elements of the vehicle. To assess the

smoothness of movement of road trucks, there are methods based on the principle of eliminating, firstly, unpleasant sensations and rapid fatigue during vibrations of the driver and passengers, and secondly, damage during vibrations of the cargo and structural elements.

The method of assessing the smoothness of a vehicle's ride, consists in analyzing the oscillations of the body vibration frequency range of 0.9-2 Hz. This is due to the fact that with oscillations with such a frequency, a person will not feel discomfort. From the analysis of the accelerations of a person's head in different driving modes, he proposed the limit values $\sqrt{D_{\ddot{z}}}$, $\sqrt{D_y}$, $\sqrt{D_{\ddot{x}}}$ which are given in Table 5. However, the intensity of oscillations also plays a great role, which is not taken into account in this method.

Table 5

Limit values of root mean square accelerations

Driving mode	$\sqrt{D_{\ddot{z}}}$, m/s^2	$\sqrt{D_{\ddot{x}}}$, m/s^2	$\sqrt{D_y}$, m/s^2
Jog	1.0	0.6	0.5
Normal walking	2.5	1.0	0.7
Short run at a speed of 8-9 km/h	4.0	2.0	1.0

There is a technique that takes into account the intensity and power of vibrations at different frequencies and directions, but people perceive vibrations differently, and the technique does not take this fact into account.

The methodology for assessing vibrations from vehicle body jolts assumes that these jolts have a greater impact on human performance and health than harmonic vibrations. At the same time, the speed and acceleration of the jolts are not taken into account.

The following method is based on experimental data. The study analyzes the acceleration of vertical and horizontal harmonic vibrations. Vibrations are divided into levels: imperceptible, barely perceptible, well perceptible, strongly perceptible, conditionally harmful and harmful. However, the disadvantage of this method is the artificial nature of the vibrations.

It is also possible to assess vehicle vibrations using control parameters in certain frequency ranges. Based on this technique, the Geneva standards for comfort assessment were adopted (Table 6).

Table 6

Assessment of ride smoothness

Frequency range, Hz	Parameters	Valid parameter values
1 – 6	Rate of change of vibration acceleration	12.6 m/s^2
6 – 20	Vibration acceleration	0.33 m/s^2
20 – 60	Vibration speed	2.7 m/s^2

Thus, in the course of various studies, standards were developed for assessing and normalizing the smoothness of motor vehicles.

International standard ISO 2631 "Guide to the assessment of the effects of general vibration on the human body", as well as 12.1.012 "System of occupational safety standards. Test methods for smoothness of movement take into account the same physical factors, except for the duration of vibration exposure. The assessment of sensations is carried out in the frequency range of 1-90 Hz, which can be represented in octave or third-octave bands. For the octave band there are upper and lower limits and an average frequency, with the upper limit frequency being twice the lower.

Human sensations during vibrations are estimated by accelerations during large-amplitude vibrations and frequencies of 0.5-5 Hz and by velocity during small-amplitude vibrations and frequencies of 15-80 Hz. Each octave or third-octave band corresponds to a weighting factor necessary to bring the root mean square value of vibration acceleration to the frequencies at which the human body is most sensitive to vibrations: 4-8 Hz – for vertical vibrations, 1-2 Hz – for horizontal vibrations.

Table 7

Characteristics of octave frequency bands

Geometric mean frequencies of octave bands, Hz	Octave band cutoff frequencies, Hz		Sensitivity weighting factors		$L_{k_{\ddot{z}i}}$, dB	$\sigma_{\ddot{z}i}$, m/s^2	$L_{\sigma_{\ddot{z}i}}$, dB
	lower	upper	Z_0	X_0			
1.0	0.8	1.4	0.50	1.0	-6	1.10	121
2.0	1.4	2.8	0.71	1.0	-3	0.79	118
4.0	2.8	5.6	1.00	0.5	0	0.57	115
8.0	5.6	11.2	1.00	0.25	0	0.6	116
16.0	11.2	22.4	0.50	0.125	-6	1.13	121

Table 8

Characteristics of third-octave frequency bands

Geometric mean frequencies of one-third octave bands, Hz	Band cut-off frequencies, Hz		Sensitivity weighting factors		$L_{k_{\ddot{z}i}}$, dB	$\sigma_{\ddot{z}i}$, m/s^2	$L_{\sigma_{\ddot{z}i}}$, dB
	lower	upper	Z_0	X_0			
0.8	0.70	0.89	0.45	1.00	-7	0.71	117
1.0	0.89	1.12	0.50	1.00	-6	0.63	116
1.25	1.12	1.41	0.56	1.00	-5	0.56	115
1.6	1.41	1.80	0.63	1.00	-4	0.50	114
2.0	1.80	2.25	0.71	1.00	-3	0.45	113
2.5	2.25	2.81	0.80	0.80	-2	0.40	112
3.15	2.81	3.55	0.90	0.63	-1	0.355	111
4.0	3.55	4.50	1.00	0.50	0	0.315	110
5.0	4.50	5.60	1.00	0.40	0	0.315	110
6.3	5.60	7.07	1.00	0.315	0	0.315	110
8.0	7.07	9.00	1.00	0.25	0	0.315	110
10.0	9.00	11.2	0.80	0.20	-2	0.40	112
12.5	11.2	14.1	0.63	0.16	-4	0.50	114
16.0	14.1	18.0	0.50	0.125	-6	0.63	116
20.0	18.0	22.4	0.40	0.10	-8	0.80	118

Vibration intensity is determined using the root mean square value of the vertical vibration acceleration or controlled parameter $\sigma_{\ddot{z}}$and its logarithmic level.

$$L_{\sigma_{\ddot{z}}} = 201g\frac{\sigma_{\ddot{z}}}{\sigma_{\ddot{z}0}}, \quad (3)$$

where $\sigma_{\ddot{z}0}$ is the limiting root mean square value of the vertical vibration acceleration m/s. $\sigma_{\ddot{z}0} = 10^{-6}$.

When analyzing vibration exposure to humans, the indicators that are normalized are single-digit parameters – integral assessment, or the vibration spectrum - frequency-separated assessment.

Integral assessment refers to the frequency-adjusted value of the controlled parameter, which takes into account the heterogeneity of human perception of vibrations with different frequency spectrum.

The frequency-adjusted value of the controlled parameter and its logarithmic level are calculated as follows:

$$\overline{\sigma_{\ddot{z}}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(k_{\ddot{z}i}\sigma_{\ddot{z}i})^2},\ L_{\overline{\sigma_{\ddot{z}}}} = 101g\sum_{i=1}^{n}10^{0.1(L_{\sigma_{\ddot{z}i}}+L_{k_{\ddot{z}i}})},\ L_{k_{\ddot{z}i}} = 201gk_{\ddot{z}i}. \quad (4)$$

where $\sigma_{\ddot{z}i}$, $L_{\sigma_{\ddot{z}i}}$ – the root mean square value of the parameter being adjusted and its logarithmic level in the i-th octave or third-octave frequency band;

$k_{\ddot{z}i}$, $L_{k_{\ddot{z}i}}$ – weighting factor for the root mean square value of the controlled parameter and its logarithmic level in the i-th frequency band;

n – number of bands in the normalized frequency range.

Thus, Table 9 shows the maximum technical standards for the smooth running of trucks, i.e., the root mean square values of vibration accelerations operating in the frequency range of 0.7-22.4 Hz are indicated. In this table, the road sections correspond to the following coatings:

- I – cement concrete, dynamometric with a mean value of irregularities of 0.6 cm;
- II – cobblestone paved without potholes (special paved road) with a mean value of irregularities of 1.1 cm;
- III – cobblestone with potholes (special section) with a mean value of irregularities of 2.9 cm.

Table 9

Maximum technical standards for smooth running of trucks

Road section number	Corrected values of vibration accelerations on the seat, m/s^2, not more than			RMS of vertical vibration accelerations at characteristic points of the sprung part, m/s^2, slightly more $\sqrt{D_{\ddot{z}}}^{\text{вст}}$
	$\sqrt{D_{\ddot{z}}}^{\text{кор}}$	$\sqrt{D_{\ddot{x}}}^{\text{кор}}$	$\sqrt{D_{\ddot{y}}}^{\text{кор}}$	
I	1.00	0.65	0.65	1.30
II	1.50	1.00	0.80	1.80
III	2.30	1.60	1.60	2.70

In frequency-separated assessment to determine the vibration load on a person, the normalized indicator is the root mean square value of the vibration acceleration or its logarithmic level in octave or third-octave frequency bands.

Due to the fact that different methods yield different results, it is recommended to use frequency-separated estimation as more accurate results.

To assess the vibration loading of sprung masses of trucks, tractors, and dump trucks, acceleration is measured at characteristic points of the left side member: above the front axle; above the rear axle of a two-axle vehicle and midway between the middle and rear axles of a three-axle vehicle.

For a two-axle trailer, the characteristic points are the points on the left side member above both axles; for a semi-trailer, the points on the floor of the body platform, to the left of the vertical axis passing through the fifth wheel coupling at a distance equal to half the track of the rear wheels of the tractor, as well as on the left side member of the frame above the rear axle. For trailers and semi-trailers with two or more rear axles, the characteristic points are midway between the extreme axles of the rear track of the bogie. In special vehicles designed

for trucks and passenger trucks, acceleration is measured on the floor of the cargo platform or the frame above the rear axle.

Conclusions

To analyze the process of vehicle movement on roads of various types and develop a methodology for selecting design parameters of the suspension system, it is necessary to compile a mathematical model of the oscillatory process, which will allow using mathematical dependencies to describe the action of a technical object in the environment. According to the definition, mathematical modeling is an indirect practical and theoretical study of an object, in which not the object of interest to us is directly studied, but some auxiliary artificial or natural system, which:

1) is in some objective correspondence to the cognitive object;

2) capable of replacing them in certain respects;

3) when studying it, it ultimately provides information about the modeled object.

Thus, to build a mathematical model, we first need to determine the scheme that most accurately characterizes the process of truck movement, and then compile a series of mathematical dependencies that describe its operation.

References

1. 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.

2. 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.

3. Nazarenko I., Mishchuk Y., Mishchuk D., Ruchynskyi M., Rogovskii I., Mikhailova L., Titova L., Berezovyi M., Shatrov R. (2021). Determiantion 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.

4. Rogovskii I., Titova L., Sivak I., Berezova L., Vyhovskyi 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. Kuzmich I.M., Rogovskii I.L., Titova L.L., Nadtochiy O.V. (2021). Research of passage capacity of combine harvesters depending on agrobiological state of bread mass. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 677. P. 052002. https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/5/052002.

Список використаних джерел

1. 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.

2. 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.

3. Nazarenko I., Mishchuk Y., Mishchuk D., Ruchynskyi M., Rogovskii I., Mikhailova L., Titova L., Berezovyi M., Shatrov R. Determiantion 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. Kuzmich I.M., Rogovskii I.L., Titova L.L., Nadtochiy O.V. Research of passage capacity of combine harvesters depending on agrobiological state of bread mass. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 677. P. 052002. https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/5/052002.

Надточій О.В.,
Войтюк В.Д.
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна
E-mail: o.nad@ukr.net

МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ КАТЕГОРІЇ N ПРОЦЕСУ ТРАНСПОРТУВАННЯ СІНА В РУЛОНАХ

https://doi.org/10.37700/ts.2024.25.174-186

УДК 629.3.016:629.3.018.7

Надточій О.В., Войтюк В.Д. ***Модель визначення експлуатаційних показників транспортних засобів категорії N процесу транспортування сіна в рулонах.***

Анотація. *В статті розкрито особливості методичного обґрунтування експлуатаційних показників транспортних засобів категорії N при транспортуванні сіна в рулонах. Транспортування грубих кормів здійснюється по широко застосовується в даний час прямої схемою, що включає операції очікування транспортним засобом завантаження, завантаження рулонів навантажувачем, переїзд транспортного засобу з поля до місця зберігання рулонів, очікування навантажувача для розвантаження рулонів, у випадку використання не самоскидного транспортного засоби, розвантаження, переїзд до місця завантаження рулонів.*

Ключові слова: *автомобіль, експлуатація, транспортування, сіно.*

Nadochiy O.V., Voytyuk V.D. ***Model for determining the performance indicators of category N vehicles in process of transporting hay in rolls.***

Abstract. *The article describes the features of methodological substantiation of performance of vehicles of category N when transporting hay in rolls. Transportation of coarse feed is carried out on a widely used direct scheme, which includes operations of waiting for the vehicle, loading rolls by a loader, moving the vehicle from the field to the storage location of rolls, waiting for the loader for unloading rolls, in case of use of non -self -esteem vehicles, unloading, unloading.*

Key words: *vehicle, operation, transportation, hay.*

Постановка проблеми

В даний час підбирачі-транспортувальники випускають як великі фірми-виробники сільськогосподарської техніки Сполучених Штатів, Німеччини, Швеції, Канади та інших країн, так і самі фермери [1]. Зокрема, фірма Cook випускає самозавантажний транспортувальник одного рулону моделей B, A, L, E, Biggy BBI-20NS і BBI-20 H, фірма Bale Shunter – на 5 рулонів довжиною 1,2 м або 4 рулони довжиною 1,5...1,8 м, фірма Traileyre Systems – на 4, 5 і 8 рулони [2]. Огляд досліджень показує, що використання технологій заготівлі сіна в тюках і рулонах великих розмірів і маси має суспільних переваги в порівнянні з технологіями заготівлі сіна в розсипному вигляді і в пресованому вигляді в тюки і рулони малих розмірів і маси:

1) висока продуктивність навантажувачів і транспортних засобів; близькою до стандартної 17% з допустимим відхиленням не більше 3-5%, що не завжди можливо виконати через часто змінюються погодні умови [3];

2) у разі відсутності можливості забезпечення необхідної вологості сіна шляхом ворошіння, вспушування і валкування спеціальними машинами, забезпеченість господарств якими вельми низька, потрібно використання дорогих консервантів [4];

3) низька забезпеченість господарств спеціальними подрібнювачами і розмотувальник тюків і рулонів [5];

4) низький ступінь реалізації приватним подвір'ях [6].

У зв'язку з цим, в господарствах Київської області в більшій мірі використовуються прес-підбирачі, формують рулони масою до 250 кг.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

На наш погляд, ефективність впровадження нової або модернізованої техніки недостатньо оцінювати лише з економічної точки зору, оскільки, як зазначалося в роботі [7] ефективність будь-якого технологічного процесу або впровадження нової техніки оцінюється ступенем відповідності реального результату y(u) необхідному $y_{тр}$.

Для опису цього пропонується використовувати числову функцію відповідності результату безлічі операцій [8]. Це формально можна записати в такий спосіб:

$$\rho = \rho\,(y(u), y_{тр}). \quad (1)$$

В даному випадку функція відповідності, виражена в числовому вигляді, приймається як приватний показник ефективності даного процесу [9]. Вона повинна бути змістовною, інтерпретується і вимірної [10].

Крім того, оскільки ефективність розглянутого в даній роботі процесу транспортування рулонів сіна передбачається оцінювати декількома приватними показниками, які залежать від безлічі факторів, які, як правило, носять випадковий характер, і визначають в кінцевому підсумку результат процесу транспортування рулонів сіна y(u), то y(u) – випадкова функція.

Тоді, відповідно до положень роботи [11] математичне очікування даної числової функції є показником ефективності транспортування рулонів сіна

$$П(i) = m\,[\rho\,(y\,(u), y_{тр})], \quad (2)$$

Оцінка ефективності транспортування рулонів сіна може бути здійснена з урахуванням як одиничних (приватних) показників ефективності, так узагальнюючих показників і комплексного критерію.

Одиничні (частинні) та узагальнюючі показники ефективності визначаються на різних рівнях, можуть перебувати в складному взаємозв'язку.

Крім того, в роботах [12, 13] показано, що показники ефективності відносяться до векторних величин П (i), i = 1, m.

Тому показник

$$П_i\,(i) = m\,[\,\rho_i\,(y_i\,(u), y_{iтр})\,],\ i = 1, m \quad (3)$$

Функція агрегування може бути:

- адитивною

$$\varphi(W) = \sum_{i=1}^{m} \gamma_i W_i$$

- мультиплікативною

$$\varphi(W) = \prod_{i=1}^{m} W_i^{\gamma_i}$$

- агрегуючою

$$\varphi(W) = \min_i \left\{\frac{W_i}{\gamma_i}\right\}$$

- степеневою

$$\varphi(W) = \left[\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} W_i^p\right]^{\frac{1}{p}}$$

де γ_i – коефіцієнт відносної важливості розглянутого одиничного (приватного) показника W_i, m – число приватних показників ефективності; p – показник, що відображає допустиму ступінь компенсації малих значень одних рівноцінних показників великими значеннями інших показників.

Агрегированную функцію у вигляді адитивної використовувати для оцінки ефективності транспортування рулонів сіна не можемо, так як в нашому випадку не прийнятна компенсація абсолютного зменшення одного з одиничних показників сумарним абсолютним збільшенням інших через використання неоднорідних одиничних (приватних) показників [14].

У нашому випадку застосовним видом функції агрегування може бути функція, що представляє собою відношення твори одиничних (приватних) показників, значення яких необхідно збільшувати в процесі впровадження нових машин або технологій, до твору одиничних (приватних) показників, значення яких необхідно зменшувати:

$$\varphi(W) = \frac{\prod_{i=1}^{m_1} W_i}{\prod_{i=m_1+1}^{m_i} W_i}$$

Таким чином, для оцінки ефективності використання машин з транспортування грубого корму в рулонах слід використовувати функцію агрегування, що враховує сукупність одиничних (частинних) показників.

Формулювання мети досліджень

Метою дослідження є методичне обґрунтування покращення експлуатаційних показників транспортних засобів категорії N при транспортуванні сіна в рулонах.

Методичний підхід в проведенні досліджень

З метою оцінки рівня ефективності використання машин по транспортуванні грубого корму в рулонах спочатку встановили основної принцип, що визначає загальний підхід для досягнення поставленої мети – комплексна оцінка рівня ефективності використання машин з транспортування грубого корму в рулонах повинна ґрунтуватися на результатах оцінки одиничних (приватних) показників.

З огляду на сформульований принцип, необхідно, по-перше, вибрати фактори, що впливають на ефективність використання машин з транспортування грубого корму в рулонах, дати їх аналіз, по-друге, ви-брати сукупність одиничних (приватних) показників, що дають можливість виконати диференціальну оцінку ефективності за результатами Експериментальні досліджень, по-третє, використовуючи сукупність обраних одиничних (приватних) показників ефективності та можливі форми когось комплексний критерій ефективності, а також мета дослідження вибрати комплексний критерій ефективності використання машин по транспортування грубого корму в рулонах і розрахувати його значення, по-четверте, дати аналіз ефективності використання машин з транспортування грубо-го корму в рулонах, на підставі якого запропонувати технічні або (і) технологічні рішення по підвищенню ефективності збирання сіна. Подальші теоретичні та експериментальні дослідження передбачають виконання всіх представлених на схемі (рис. 1) етапів оцінки ефективності використання машин з транспортування грубого корму в рулонах.



Рис. 1. Схема оцінки ефективності використання автомобіля з транспортування грубого корму в рулонах

На ефективність використання машин з транспортування сіна в рулонах впливає сукупність різних факторів (рис. 2). Всі фактори можна поділити на дві основні групи: конструктивно-технологічні і експлуатаційно-організаційні.

Конструктивно-технологічні чинники залежать, перш за все, від конструктивних особливостей транспортного засобу: вантажопідйомності і можливості її використання, обсягу кузова і можливості його зраді-ня, швидкісних можливостей, маневреності, прохідності по різним видам доріг, стійкості до перекидання, конструктивних особливостей вивантажного пристрої (самоскидну або з використанням додаткових-них коштів), технічної та технологічної надійності транспортного засобу, можливості транспортування рулонів сіна, збереження форми рулонів, їх обов'язки і інших чинників.

Експлуатаційно-організаційні чинники визначаються показниками використання транспортних засобів в заданих умовах, що залежать від кваліфікації обслуговуючого персоналу, середньої швидкості транспортування, величина якої визначається як характеристиками потужності і швидкісними можливостями самохідного транспортного засобу або тягача транспортного засобу, так і кваліфікацією водія, станом доріг. Крім того, до цієї групи факторів можна віднести середня відстань перевезення рулонів, яке визначається, зокрема, розмірами господарства і відстанях до місця реалізації, стан доріг як ґрунтових, так і з твердим покриттям, частка шляху, що

відноситься до транспортування рулонів по дорогах з твердим покриттям і до переїздів по полю, форма організації роботи (індивідуальна, ланкова, бригадна), навантаження на один транспортний засіб, що залежить від обсягу перевезень і кількості транспортних засобів різної вантажопідйомності і обсягу кузова, потоковість збирально-транспортно-розвантажувальних робіт, залежна від якості роботи персоналу, що управляє щодо забезпечення узгодженої роботи всіх ланок, що виконують технологічний процес і інші.



Рис. 2. Фактори, що впливають на ефективність використання машин з транспортування грубого корму в рулонах

Таким чином, для оцінки рівня ефективності використання машин з транспортування грубого корму в рулонах необхідно враховувати вплив як окремих факторів, так і їх сукупності, на поодинокі (приватні) показники і на комплексний критерій ефективності. Розглянемо, наприклад, вплив одного з найважливіших чинників - відстань від місця збирання сіна та формування рулонів до місця їх вивантаження, на показники застосування автотранспортних засобів при перевезенні сіна або соломи в рулонах в господарствах незалежно від їх форми власності.

Результати досліджень

Вивантаження рулонів може здійснюватися або на місці їх зберігання в господарстві, або місці їх реалізації. У даній роботі розглянемо перший випадок, коли рулони перевозяться автотранспортом до місця їх зберігання в господарстві.

Обраний фактор, як випливає з огляду наукових досліджень, впливає на продуктивність транспортних засобів і питомі витрати, в тому числі і грошові, пов'язані з транспортуванням рулонів сіна.

Продуктивність транспортних засобів за підсумковим показником – обсягом Q перевезень в т за 1 год часу циклу визначається за формулою:

$$W_{тр} = \frac{q_н \gamma}{t_ц}$$

де $q_н$ – номінальна вантажопідйомність транспортного засобу, т,

γ – коефіцієнт використання вантажопідйомності (при транспортуванні рулонів сіна або соломи $\gamma = 1$ при використанні спеціальної вантажної платформи [12]);

$t_ц$ – тривалість циклу, год.

Продуктивність прес-підбирача по площі в га за 1 год змінного часу визначається за формулою

$$W_{П\text{-}П} = 0{,}1 B_р v_р \tau$$

де $B_Р$ – робоча ширина захвату косарки при скошуванні сіна, м;

$v_р$ – робоча швидкість прес-підбирача, км/год;

τ – коефіцієнт використання часу зміни;

Знаючи врожайність культури (У) і продуктивність прес-підбирача за площею ($W_{П\text{-}П}$), визначимо продуктивність прес-підбирача по масі сформованого сіна в рулони:

$$W_{пр\text{-}п} = W_{П\text{-}П} У.$$

Припустимо, що в ланці з прибирання сіна використовуються $n_{пр\text{-}п}$ прес-підбирачів однієї марки, а в транспортному – $n_{тр}$ автомобілів однаковій вантажопідйомності. Тоді, для забезпечення потоковості процесу збирання сіна на етапі «підбір сіна з формуванням рулонів - транспортування рулонів з поля до місця вивантаження», необхідно дотримуватися рівність сумарної годинної продуктивності всіх прес-підбирачів ланки і всіх транспортних засобів:

$$W_{пр\text{-}п} n_{пр\text{-}п} = W_{тр} n_{тр}.$$

$$0{,}1 B_р v_р \tau У n_{пр\text{-}п} = \frac{q_н \gamma}{t_ц} n_{тр}$$

Отримуємо формулу для розрахунку довжини їздки автомобіля:

$$l_г = \frac{q_н v_{г-х}}{2}\left[\frac{\gamma n_{тр}}{0{,}1 B_р v_р \tau У n_{пр-п}} - \frac{2}{W_{п-р}}\right]$$

Ефективність використання машин з транспортування сіна в рулонах Ефективність використання машин з транспортування сіна в рулонах можливо оцінювати за сукупністю одиничних (приватних) показників, визначення значень яких є метою диференційованого метода. Даний метод полягає в зіставленні значень одиничних (приватних) показників ефективності використання машин з транспортування грубих кормів в рулонах з аналогічними показниками, найкращими, прийнятними для порівняння.

При виборі одиничних (частинних) показників ефективності використання автомобілів з транспортування грубого корму в рулонах до них пред'являють такі вимоги:

1. Важливість кожного показника в сукупності показників. При цьому слід вибирати і надалі використовувати найбільш суттєві показники, тобто ті, які в більшій мірі впливають на рівень транспортування грубого корму в рулонах.

2. Оцінку одиничних (частинних) показників ефективності слід вести з урахуванням досягнутого рівня відповідних показників.

3. Враховувати можливість підвищення значень одиничних (частинних) показників шляхом різних заходів, в тому числі технічних, як на стадії розробки проекту технологічного процесу, так і на стадії його реалізації.

4. Можливість розширення сфери використання обраних показників на аналогічні технологічні сільськогосподарські процеси.

5. Стрункість структури. Всі одиничні (частинні) показники повинні бути однорідними в даній групі показників, не допускати їх якісно-ного повторення при оцінці ефективності транспортування грубого корму в рулонах і використання зайвих показників.

6. Сумісність одиничних (частинних) показників ефективності транспортування грубого корму в рулонах з деякими показниками якості технологічного процесу.

7. Можливість оцінки одиничних (частинних) показників ефективності і перевірки результатів оцінки при повторних дослідженнях.

8. Можливість практичного застосування.

З урахуванням зазначених вимог визначається склад і структура одиничних (частинних) показників ефективності транспортування грубого корму в рулонах.

При виборі сукупності одиничних показників, які відповідали б цілям практичної оцінки ефективності транспортування грубого корму в рулонах, використовувався відомий метод експертних оцінок. Він дозволив врахувати як якісний характер оцінюваних показників, так і професійний і науковий досвід фахівців з прибирання грубих кормів.

В експертизі брали участь інженери, агрономи і економісти, які пов'язані з проблемою прибирання сіна, формування рулонів і транспортування їх до місця зберігання або реалізації.

Всі експерти були розділені на групи, але кожна група формувалась з осіб різних спеціальностей. Кожна група експертів виконувала інтуїтивно-логічний аналіз питань, поставлених перед ними.

Мета експертизи – отримання корисної інформації, що дозволяє ка-кількісний судити про вплив обраних одиничних (частинних) показників на ефективність транспортування грубого корму в рулонах.

Попереднє опитування експертів – фахівців в області збирання сільськогосподарських культур, в основному, сіна, з безлічі можливих показників, що впливають на ефективність використання машин з транспортування грубого корму в рулонах обрано такі приватні показники: продуктивність транспортного засобу; собівартість транспортування одного рулону сіна на відстань один кілометр; використання вантажопідйомності транспортного засобу; трудомісткість розвантаження одного рулону сіна з транспортного засобу; металоємність транспортного засобу, яка припадає на один рулон сіна при перевезенні його на один кілометр – питома металоємність транспортного засобу; пошкоджуваність рулонів; втрати сіна.

Однак подальший аналіз перерахованих вище показників показав, що при виборі в якості одиничних (частинних) показників виробника транспортного засобу і використання його вантажопідйомності відходить якісне повторення цих показників, тому що вони взаємозалежні.

Продуктивність транспортного засобу – найважливіший показник його використання. Але при цьому даний показник залежить від вантажопідйомності транспортного засобу і коефіцієнта використання вантажопідйомності. Крім того, застосування зайвих показників при оцінці ефективності будь-якого технологічного процесу не припустимо.

Крім того, застосування зайвих показників при оцінці ефективності будь-якого технологічного процесу не припустимо.

З огляду на можливість оцінки коефіцієнта використання вантажопідйомності транспортного засобу та перевірки результатів його оцінки при повторних дослідженнях, прийшли до висновку застосовувати вказаний показник в якості одиничного (приватного) показника ефективності.

Як відомо, продуктивність транспортного засобу необхідно збільшувати з метою мінімізації собівартості транспортних операцій. При цьому слід враховувати обмеження щодо використання вантажопідйомності. Коефіцієнт використання вантажопідйомності транспортного засобу не повинен перевищувати одиниці.

При виборі бажаного значення даного коефіцієнта слід враховувати, що обмежувальними факторами є максимально можливі (за вимогами правил дорожнього руху) габаритні розміри, можливість втрати керованості і перекидання транспортного засобу.

У зв'язку з тим, що максимально допустима швидкість руху транспортного засобу, що визначається типом дороги і неприпустимістю випадання рулонів сіна з кузова при русі машини, то можна припустити, що втрат рулонів сіна при їх доставці до місця зберігання або до місця реалізації не буде.

Дане припущення підтвердив аналіз багаторічних спостережень за транспортуванням рулонів сіна. Втрати рулонів зафіксовані в одиничних випадках, в основному, при доставці їх з поля до місця зберігання, коли вони не закріплені і транспортний засіб перевантажено. Втрат рулонів сіна до місця їх реалізації не спостерігалося.

У зв'язку з цим, як одиничного (приватного) показника втрати сіна надалі розглядати не будемо.

Таким чином, обрані наступні одиничні (приватні) показники ефективності транспортування грубого корму в рулонах з урахуванням їх ранжирування:

1) собівартість транспортування одного рулону сіна на відстань один кілометр, С, грн. / км · рул.;

2) використання вантажопідйомності транспортного засобу, γ;

3) трудомісткість розвантаження одного рулону сіна з транспортного засобу, Т, чол. · год;

4) питома металоємність транспортного засобу, $М_{пит}$, кг / км · рул.;

5) пошкоджуваність рулонів, П, %.

Результати інформації, отриманої від експертів, були оброблені. При цьому використовувався відповідний математичний апарат. При оцінці показників, що характеризують транспортування рулонів сіна, експерти виконували «вимір» важливості всіх одиничних (приватних) показників. Потім виконувався аналіз отриманої від експертів інформації, і її обробка. Після чого проводилося узгодження думок окремих експертів і формувалося колективна думка.

Експертна оцінка важливості одиничних (приватних) показників ефективності включала такі основні етапи:

1) обґрунтування мети і завдань дослідження;

2) розробка методики отримання вихідної інформації;

3) вибір методів обробки вихідної інформації;

4) формування груп експертів;

5) підготовка анкет для опитування експертів;

6) опитування експертів;

7) обробка отриманих результатів;

8) аналіз отриманих результатів експертизи;

9) інтерпретація результатів.

При ранжируванні одиничних (частинних) показників ефективності транспортування грубого корму в рулонах все експерти мали оцінювані показники в порядку їх зростання по їх переваги з точки зору експерта і приписували кожному одиничному (частинному) показником ранги у вигляді натуральних чисел. Нами

використовувалося пряме ранжування показників, відповідно до якого більш кращий показник мав ранг 1, а менш кращий – ранг m.

Потім здійснювалася обробка переваг кожного експерта і аналіз рангів одиничних (приватних) показників, після чого визначалося перевагу групи експертів по відношенню до досліджуваних одиничним (приватним) показниками.

В результаті прямого ранжирування одиничних (приватних) показників ефективності транспортування грубого корму в рулонах було отримано розподіл розглянутих за важливістю. При цьому враховували результати ранжування одиничних (приватних) показників тих експертів, думки яких були незалежними.

Розраховувалися коефіцієнти рангової кореляції ρ Спірмена, за значеннями яких оцінювалася незалежність думок експертів:

$$\rho = 1 - \frac{6}{m(m^2-1)} \sum_{i=1}^{m} (r_{1i} - r_{2i})^2 ,$$

де m – число показників; r_{1i} і r_{2i} – ранг, віднесений відповідно першим і другим експертом до і-того показника.

Значення коефіцієнтів ρ змінюються від -1 до +1. Якщо ρ = +1, то ранжування однакові, якщо ρ = -1 – протилежні, при ρ = 0 ранжування лінійно не корельовані.

$$\alpha = \{S_p < S_\alpha / m\} = P\{S_p \geq S_{max} - S_\alpha / m\}.$$

Значення S_{max} і S_{min} табличні. Чим більша ймовірність Р на прийнятому 5%, тобто α = 0,05 рівні значущості, тим вірніше гіпотеза про незалежність думок експертів.

Моделювання показали, що для всіх варіантів $\alpha_i > \alpha = 0{,}05$. Групова думка експертів, отримане за результатами індивідуальних переваг, оцінювалося за середнім значенням коефіцієнтів Спірмена:

$$\rho = 2 \Sigma \rho_i / n(n-1).$$

Визначено, що ρ = 0,818. Застосувавши метод відносних частот, були визначені коефіцієнти важливості кожного одиничного (приватного) показника ефективності транспортування грубого корму в рулонах:

$$\alpha_i = \sum_{l=1}^{n} r_j^l \Big/ \sum_{l=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} r_j^l ,$$

де r_j^l – ранг, присвоєний j-му одиничного (окремого) показника l – m експертом.

При цьому слід враховувати, що найкращий показник буде мати ранг (m – 1), а найгірший – ранг 0, а також, що $\Sigma \alpha_i = 1$.

Таким чином, оцінку ефективності використання машин з транспортування сіна в рулонах пропонується виконувати як диференційовано, тобто по кожному окремому одиничного показника, так і комплексно, тобто по їх сукупності, сформованих в комплексний критерій з урахуванням важливості кожного одиничного показника ефективності. З огляду на можливість оцінки коефіцієнта використання вантажно-підйомності транспортного засобу та перевірки результатів його оцінки при повторних дослідженнях, прийшли до висновку застосовувати вказаний показник як одиничного (частинного) показника ефективності.

Оцінку ефективності використання машин з транспортування грубого корму в рулонах пропонується здійснювати з використанням комплексного критерію, що враховує відповідність фактичних значень сукупності одиничних (частинних) показників найкращим, або ідеальним, або бажаним.

З огляду на результати теоретичних і експериментальних досліджень запропоновані етапи оцінки ефективності використання машин з транспортування грубого корму в рулонах:

- аналіз сукупності факторів, що впливають на ефективність використання машин з транспортування грубого корму в рулонах;
- вибір сукупності факторів найбільш значущих, що визначаються за результатами експериментальних досліджень і математичної обробки цих результатів;
- обґрунтування одиничних (частинних) показників ефективності використання машин з транспортування грубого корму в рулонах, їх ранжування за важливістю;
- попередня оцінка ступеня впливу одиничних (частинних) показників на ефективність використання машин з транспортування грубого корму в рулонах;
- експериментальні дослідження з оцінки найважливіших одиничних (частинних) показників;
- вибір бажаних і визначення найкращих значень одиничних (частинних) показників ефективності;
- обґрунтування комплексного критерію ефективності використання машин з транспортування грубого корму в рулонах, що включає всі вибрані одиничні (частинні) показники ефективності і їх відносну важливість;
- розрахунок комплексного критерію ефективності використання машин з транспортування грубого корму в рулонах і аналіз результатів виконаного розрахунку;
- розробка практичних рекомендацій як технічних, так технологічних і організаційних, щодо підвищення ефективності використання машин з транспортування грубого корму в рулонах.

При оцінці ефективності використання машин з транспортування грубого корму в рулонах найбільш прийнятним видом функції агрегування, як показав огляд досліджень, може бути функція відносини одних одиничних (частинних) показників до інших. Із залежності слід:

1) чисельник функції агрегування являє собою цільовий ефект, а знаменник - витрати для досягнення даного цільового ефекту;

2) функція агрегування є векторною величину;

3) використання даної функції агрегування можливе за умови однорідності приватних показників першої та другої груп.

Отже, продуктивність транспортного засобу необхідно збільшувати з метою мінімізації собівартості транспортних операцій. При цьому слід враховувати обмеження по використанню вантажопідйомності. Коефіцієнт використання вантажопідйомності транспортного засобу не повинен перевищувати одиниці. При виборі бажаного значення даного коефіцієнта слід врахувати, що обмежувальними факторами є максимально можливі, за вимогами правил дорожнього руху, габаритні розміри, можливість втрати керованості і перекидання транспортного засобу. Тоді функція агрегування має вид:

$$\varphi(W) = \frac{K_\gamma}{K_{\text{С}}\, K_{\text{Т}}\, K_{\text{М}}\, K_{\text{П}}}$$

Таким чином, отримано математичний вираз комплексного критерію ефективності використання машин з транспортування грубого корму в рулонах.

Висновки

1. Розроблено схему поетапної оцінки ефективності використання машин на транспортуванні грубого корму в рулонах.

2. Запропоновано класифікацію факторів, що впливають на ефективність використання машин на транспортуванні грубого корму в рулонах, по двом групам: конструктивно-технологічним і експлуатаційно-організаційним.

3. Обґрунтовано одиничні (частинні) показники ефективності експлуатації автомобілів на транспортуванні грубого корму в рулонах. До них віднесені: собівартість транспортування одного рулону сіна на відстань один кілометр, використання вантажопідйомності транспортного засобу, трудомісткість розвантаження одного рулону сіна з транспортного засобу, питома металоємність транспортного засобу і пошкоджуваність рулонів.

4. Розроблено на основі обраної функції агрегування когось комплексний критерій оцінки ефективності використання машин по транспортування грубого корму в рулонах, що враховує сукупність обраних одиничних (частинних) показників і їх відносну значимість.

Список використаних джерел

1. Parmenter, D. Key Performance Indicators: Developing, Implementing, and Using Winning KPIs; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2015.

2. Çemberci, M.; Civelek, M.E.; Canbolat, N. The moderator effect of global competitiveness index on dimensions of logistics performance index. Procedia Soc. Behav. Sci. 2015, 195, 1514–1524.

3. Podgórski, D. Measuring operational performance of osh management system-a demonstration of ahp-based selection of leading key performance indicators. Saf. Sci. 2015, 73, 146–166.

4. Stević, Ž. Izbor i merenje ključnih indikatora performansi u skladišnom sistemu. In Proceedings of the Internacionalni Naučni Skup SM 2015 Strategijski Menadžment i Sistemi Podrške Odlučivanju u Strategijskom Menadžmentu, Subotica-Palić, Serbia, 21 May 2015; pp. 931–938.

5. Riste, R.; Slobodan, O.; Zlatko, Z.; Vasko, G.; Ivona, N.; Vlatka, K. Road safety inspection in the function of determining unsafe road locations. In Proceedings of the 9th International Conference "Civil Engineering–Science and Practice", Kolašin, Montenegro, 5–9 March 2024.

6. Banjanin, M.K.; Bjelošević, R.; Vasiljević, M.; Stojčić, M.; Đukić, A. The Method of the Research Loop of Teletraffic in the Structure of the System of Public Urban Passenger Transport. In Proceedings of the XIX International Symposium New Horizons 2023 of Transport and Communication, Doboj, Bosnia and Herzegovina, 24–25 November 2023; pp. 4–15.

7. Andjelković, D.; Antić, B.; Lipovac, K.; Tanackov, I. Identification of hotspots on roads using continual variance analysis. Transport 2018, 33, 478–488.

8. Banjanin, M.K.; Stojčić, M.; Danilović, D.; Ćurguz, Z.; Vasiljević, M.; Puzić, G. Classification and Prediction of Sustainable Quality of Experience of Telecommunication Service Users Using Machine Learning Models. Sustainability 2022, 14, 17053.

9. 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, 1(3 (127), 37–46. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298567.

10. Hrynkiv A., Rogovskii I., Aulin V., Lysenko S., Titova L., Zagurskiy O., Kolosok I. Development of a system for determining the informativeness of the diagnosing parameters of the cylinder-piston group of the diesel engines in operation. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Vol. 3 (5 (105)). P. 19–29. doi: 10.15587/1729-4061.2020.206073.

11. Aulin V., Hrynkiv A., Lysenko S., Rohovskii I., Chernovol M., Lyashuk O.,

Zamota T. Studying truck transmission oils using the method of thermal-oxidative stability during vehicle operation. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Vol. 1. № 1/6 (97). P. 6−12. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.156150.

12. Rogovskii, I., Lyubarets, B., Borek, K. Analyticity of non-stationary processes of change in diagnostic parameters of hydrostatic transmissions of harvesters. Machinery and Energetics, 2022, 13(1), pp. 67–76

13. Rogovskii, I.L. Models of formation of engineering management alternatives in methods of increasing grain production in agricultural enterprises. Machinery and Energetics, 2021, 12(1), pp. 137–146.

14. Rogovskii, I.L. Resource of removal expenses for strong agricultural period of volume of operations. Machinery and Energetics, 2021, 12(2), pp. 123–131.

References

1. Parmenter, D. (2015). Key Performance Indicators: Developing, Implementing, and Using Winning KPIs; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2015.

2. Çemberci, M.; Civelek, M.E.; Canbolat, N. (2015). The moderator effect of global competitiveness index on dimensions of logistics performance index. Procedia Soc. Behav. Sci., 195, 1514–1524.

3. Podgórski, D. (2015). Measuring operational performance of osh management system-a demonstration of ahp-based selection of leading key performance indicators. Saf. Sci., 73, 146–166.

4. Stević, Ž. (2015). Izbor i merenje ključnih indikatora performansi u skladišnom sistemu. In Proceedings of the Internacionalni Naučni Skup SM 2015 Strategijski Menadžment i Sistemi Podrške Odlučivanju u Strategijskom Menadžmentu, Subotica-Palić, Serbia, 21 May 2015; pp. 931–938.

5. Riste, R.; Slobodan, O.; Zlatko, Z.; Vasko, G.; Ivona, N.; Vlatka, K. (2024). Road safety inspection in the function of determining unsafe road locations. In Proceedings of the 9th International Conference "Civil Engineering–Science and Practice", Kolašin, Montenegro, 5–9 March 2024.

6. Banjanin, M.K.; Bjelošević, R.; Vasiljević, M.; Stojčić, M.; Đukić, A. (2023). The Method of the Research Loop of Teletraffic in the Structure of the System of Public Urban Passenger Transport. In Proceedings of the XIX International Symposium New Horizons 2023 of Transport and Communication, Doboj, Bosnia and Herzegovina, 24–25 November; pp. 4–15.

7. Andjelković, D.; Antić, B.; Lipovac, K.; Tanackov, I. (2018). Identification of hotspots on roads using continual variance analysis. Transport, 33, 478–488.

8. Banjanin, M.K.; Stojčić, M.; Danilović, D.; Ćurguz, Z.; Vasiljević, M.; Puzić, G. (2022). Classification and Prediction of Sustainable Quality of Experience of Telecommunication Service Users Using Machine Learning Models. Sustainability, 14, 17053.

9. 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, 1(3 (127), 37–46. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298567.

10. Hrynkiv A., Rogovskii I., Aulin V., Lysenko S., Titova L., Zagurskiy O., Kolosok I. (2020). Development of a system for determining the informativeness of the diagnosing parameters of the cylinder-piston group of the diesel engines in operation. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Vol. 3 (5 (105)). P. 19−29. doi:

10.15587/1729-4061.2020.206073.

11. Aulin V., Hrynkiv A., Lysenko S., Rohovskii I., Chernovol M., Lyashuk O., Zamota T. (2019). Studying truck transmission oils using the method of thermal-oxidative stability during vehicle operation. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 1. № 1/6 (97). P. 6−12. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.156150.

12. Rogovskii, I., Lyubarets, B., Borek, K. (2022). Analyticity of non-stationary processes of change in diagnostic parameters of hydrostatic transmissions of harvesters. Machinery and Energetics, 2022, 13(1), pp. 67–76.

13. Rogovskii, I.L.(2021). Models of formation of engineering management alternatives in methods of increasing grain production in agricultural enterprises. Machinery and Energetics, 12(1), pp. 137–146.

14. Rogovskii, I.L. (2021). Resource of removal expenses for strong agricultural period of volume of operations. Machinery and Energetics, 12(2), pp. 123–131.

Umanskiy M.O.
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
E-mail:
umanskiy@nubip.edu.ua

FEATURES OF USE OF AGRICULTURAL DRONES IN CROP PRODUCTION TECHNOLOGIES

https://doi.org/10.37700/ts.2024.25.187-194

УДК 631.4.001

Umanskiy M.O. ***Features of use of agricultural drones in crop production technologies.***

Abstract. *The article presents a generalization of the production cycle regarding the features of the machine use of agricultural drones in crop production technologies. Applied methods and initial data of agricultural drone technologies in agriculture have been developed taking into account the diversity of technological operations. In the course of the research, fourteen tasks are presented that modern agricultural drone technologies solve. The author outlines a six-level full cycle of agricultural drone monitoring of crops. At the same time, accounting for the initial data allows for the process of forming a visualization of field surveys from agricultural drones. The author recreates the features of video and photography from a height, the functionality of thermal imaging cameras of agricultural drones for agriculture, which allows monitoring to be brought as close as possible to the real cycle of crop production.*

Key words: *agricultural drone, technology, machine use, method.*

Уманський М.О. ***Особливості машиновикористання агродронів в технологіях виробництва сільськогосподарських культур.***

Анотація. *У статті представлено узагальнення виробничого циклу щодо особливостей машиновикористання агродронів в технологіях виробництва сільськогосподарських культур. Розроблено прикладні методи та вихідні дані агродронових технологій в сільському господарстві з огляду на різноманітність технологічних операцій. У ході досліджень представлені чотирнадцять завдань, які вирішують сучасні агродронові технології. Автором окреслено шестирівневий повний цикл агродронового моніторинргу посівів. При цьому облік вихідних даних дозволяє провести процес формування візуалізації обстеження полів з агродронів. Автором відтворено особливості відео та фотозйомка з висоти, функціонал тепловізійних камер агродронів для сільського господарства, що дозволяє моніторинг максимально наблизити до реального циклу виробництва сільськогосподарських культур.*

Ключові слова: *агродрон, технологія, машиновикорстання, метод.*

Introduction

While precision farming technologies have revolutionized agriculture in recent years, the use of drones has made it possible to further increase efficiency. They take aerial photos, monitor fields, create 3D maps, sow seeds, apply fertilizers and chemicals, monitor crops, assist with irrigation, and help control animals in agriculture.

Analysis of recent researches

Unmanned technologies in agriculture can perform a variety of operations:

- aerial photography – to detect bald spots, crop losses after exposure to natural factors, and other defects that require timely elimination. Aerial photography from a drone is much better than satellite photography in terms of detail, due to the low flight altitude;
- video filming – the performance of the aircraft during video filming reaches 30 km per hour, which significantly reduces time and financial costs compared to using ground equipment;
- 3D modeling – allows you to identify overmoistened or arid areas, soil excavation, and expertly create plans and maps for soil moistening or draining, site reclamation, or land reclamation;
- thermal imaging – is carried out using the entire spectrum of infrared radiation: near, medium and far range. The study makes it possible to determine the timing of differentiation of growth points, which directly affects the yield and preservation of productive properties of plants while preserving the hereditary capabilities of the variety;
- laser scanning – used for terrain analysis in hard-to-reach or inaccessible areas. This method provides an accurate high-density model with detailed relief even when working in conditions of high density of plantings;
- Spraying – thanks to the possibility of retrofitting, drones are used for spot spraying of plants and fruit trees. This approach allowed farmers to treat only diseased plants, eliminating the possibility of chemicals getting on the rest of the crop;
- Seed planting – is a relatively recent practice and has not yet become widespread, but some companies are experimenting with planting seeds using drones. In essence, manufacturers are experimenting with specific systems that are programmed to scatter seeds into prepared soil;
- This technology helps minimize the need for personal presence to plant plants in a selected area, which can sometimes be a costly and energy-consuming task. The same drone technology can be adapted and applied to many types of farms, reducing planting time and labor costs.

Modern unmanned systems solve the following tasks [1]:

1. Assessing crop quality and identifying damage or death of crops.
2. Determining the exact area of lost crops.
3. Land audit and inventory.
4. Identification of sowing defects and problem areas.
5. Analysis of the effectiveness of measures aimed at plant protection.
6. Monitoring compliance with crop rotation structure and plans.
7. Identification of deviations and violations made during agricultural work.
8. Relief analysis and creation of a map of vegetation indices PVI, NDVI.
9. Gathering information for the security service, including identifying the fact of illegal grazing of livestock in the fields.
10. Support for the construction of land reclamation systems.
11. Monitoring the storage of root crops in cagatas.
12. Introducing Trichogramma.
13. Creating maps for differentiated fertilizer and field spraying.
14. Calculation of seedlings and biological yield.

The aim and objectives of research

The aim is to generalize the production cycle regarding the features of the machine use of agricultural drones in crop production technologies.

Research results

Let's considerabout the possibilities and advantages of drones for agriculture.

Obtaining an orthophoto plan, which allows you to accurately measure the geometric dimensions of the field and determine its geometric area in projection (Fig. 1). This will be the area for which the farmer pays land tax and rent. In addition, the orthophoto plan obtained with the help of a drone will provide a lot of additional information for an experienced agronomist: you can see areas of sifting, reseeding, where plants died, traces of trampling the field by people and machinery.

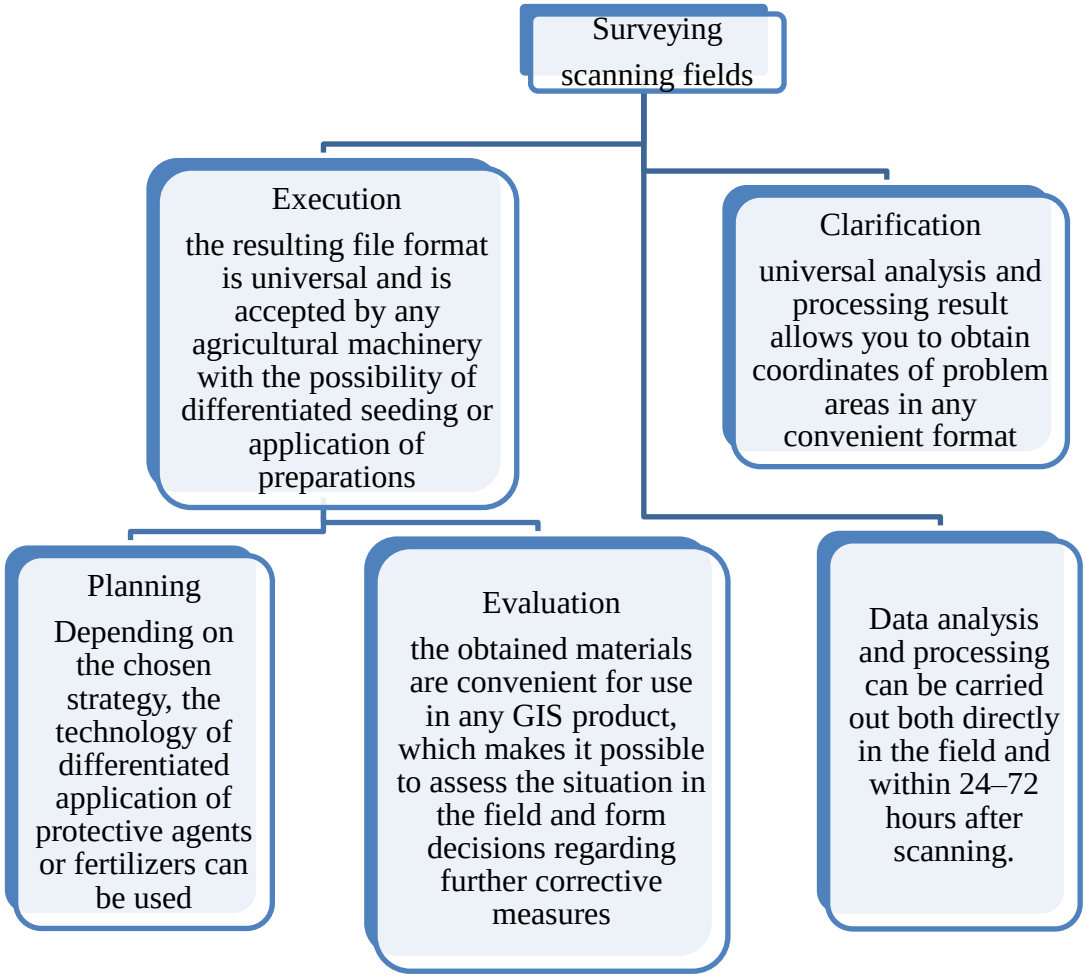


Fig. 1. Full cycle of unmanned crop monitoring.

Moreover, on the orthophoto map, they can be counted, the area measured, and vector contours of interesting and problematic areas can be obtained for further work with them. For example, for compiling tasks for ground-based unmanned aerial vehicles, which also work using vector contours and GPS coordinates (Fig. 2).

Obtaining a height map – a flat map that shows the relief of the field.

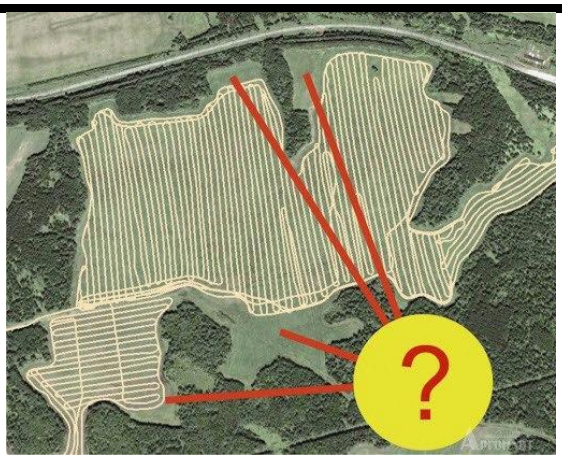


Fig. 2. Vector contour and GPS coordinates.

On this map, the surface level differences are color-coded as on a familiar geophysical school map, where mountains are brown and lowlands are green. In addition to color coding, contour lines are drawn on the relief map connecting points that lie on the same level. For working with relief, it is convenient when heights in meters are plotted together with contour lines. Such marking helps to identify problem areas in the fields.

Multispectral survey (Fig. 3). Fields are different and heterogeneous. Even within one field, there are areas where the yield always differs from the average. In some areas, it is noticeably higher, in others, lower. Moreover, for different crops, these differences can be diametrically opposed. This depends on many factors:

- the relief of the field (some slopes of the hill face the sun more, others are shaded);
- mineral composition;
- different soil moisture;
- various levels of weed contamination;
- susceptibility to pests, etc.

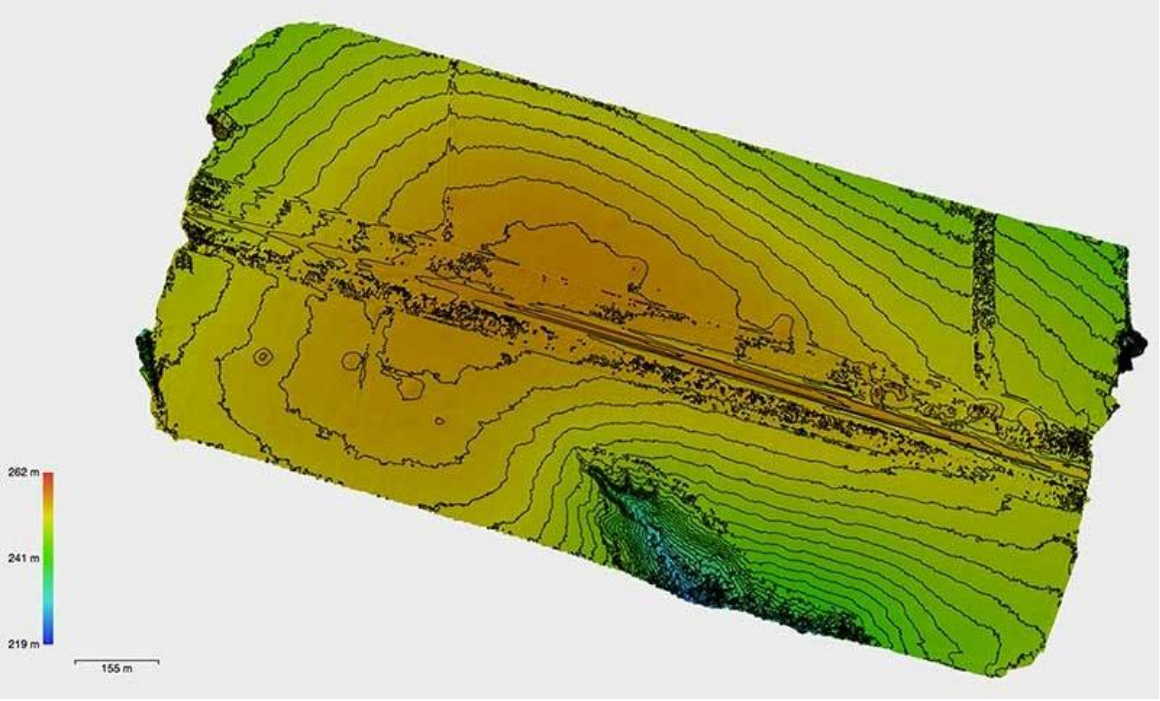


Fig. 3. Multispectral imaging.

There are so many factors that even an experienced agronomist cannot always predict their impact on a specific crop at a certain stage of vegetation, and even take into account the influence of weather.

Even knowing about such mosaicism, the agronomist still has questions about field management. There are also different approaches here. For example, you can ignore mosaicism, hoping for an average harvest. You can additionally feed the plants in weak areas to a greater extent.

You can, on the contrary, spend less expensive fertilizers and seeds on potentially weak and unpromising areas and, at the same time, increase their dosage on potentially strong areas to reduce the total financial costs of the field and increase the overall yield (Fig. 4). And, finally, you can simply re-disc the field in whole or in part if the prospects for the future harvest do not cover the expected investments.

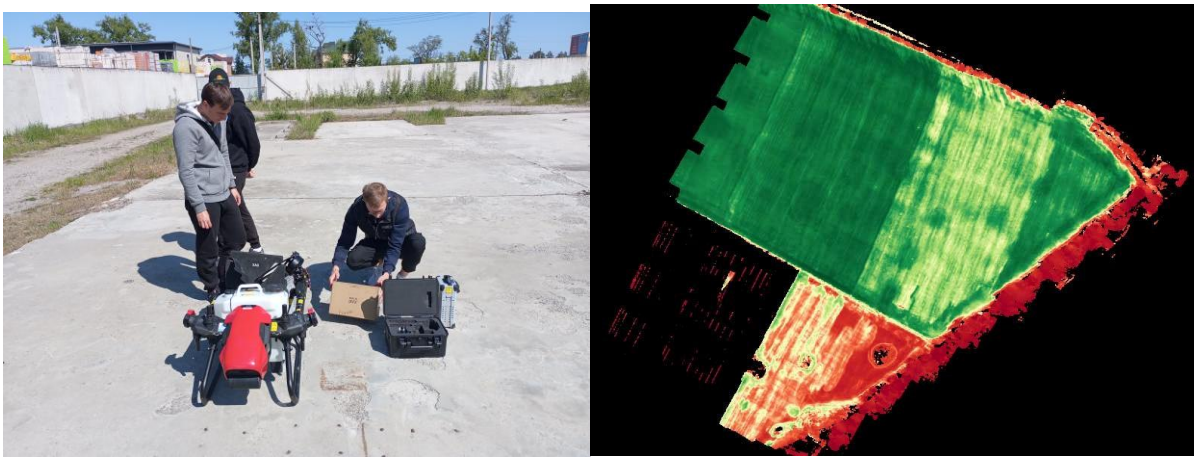


Fig. 4. Field and increase the overall yield

Decisions are ambiguous, difficult, and responsible. In these conditions, an objective decision support system will be very useful for the agronomist and farmer. Such a system will provide quantitative indicators on the basis of which it is possible to make a conscious and least risky decision for a given situation.

The input data for the system can be information obtained as a result of processing multispectral drone imagery.

Creating tasks for parallel driving systems. By obtaining information about the zoning of a field based on various indicators – the level of stress in plants, vegetative mass, distribution of specific chlorophyll content in the field, the level of weed infestation and their localization, a farmer or agronomist will be able to develop the right driving strategies as a result of multispectral field surveying.

As a result, using the materials obtained from the drone, the agronomist makes a decision on treating the field with herbicides (Fig. 5). It is possible to apply it to the field evenly with a wheeled sprayer, which is expensive in terms of the cost of the drug and the costs of application. Or you can use a more expensive but "smart" wheeled sprayer to apply the herbicide differentially, which is cheaper in terms of the drug consumption, but more expensive in terms of the cost of application. Or you can use an unmanned agricultural drone, which was not only originally designed for differential application of liquids, but also does not trample the field, does not add stress to the plants from mechanical contact with parts of the sprayer and the heat from its engine.

Drone application of substances. Liquids, granules, trichogramma, fumigation. In the case of tall crops such as sunflower and corn, it is not always possible to send a sprayer to the field. Unlike wheeled sprayers, a sprayer on an agricultural drone can apply substances to the

leaf with great precision, and even with a consumption of only a few liters per hectare. Given the fact that the drone literally blows agrochemicals into the ground with its propellers, applying liquids with drones is becoming perhaps the most effective today.

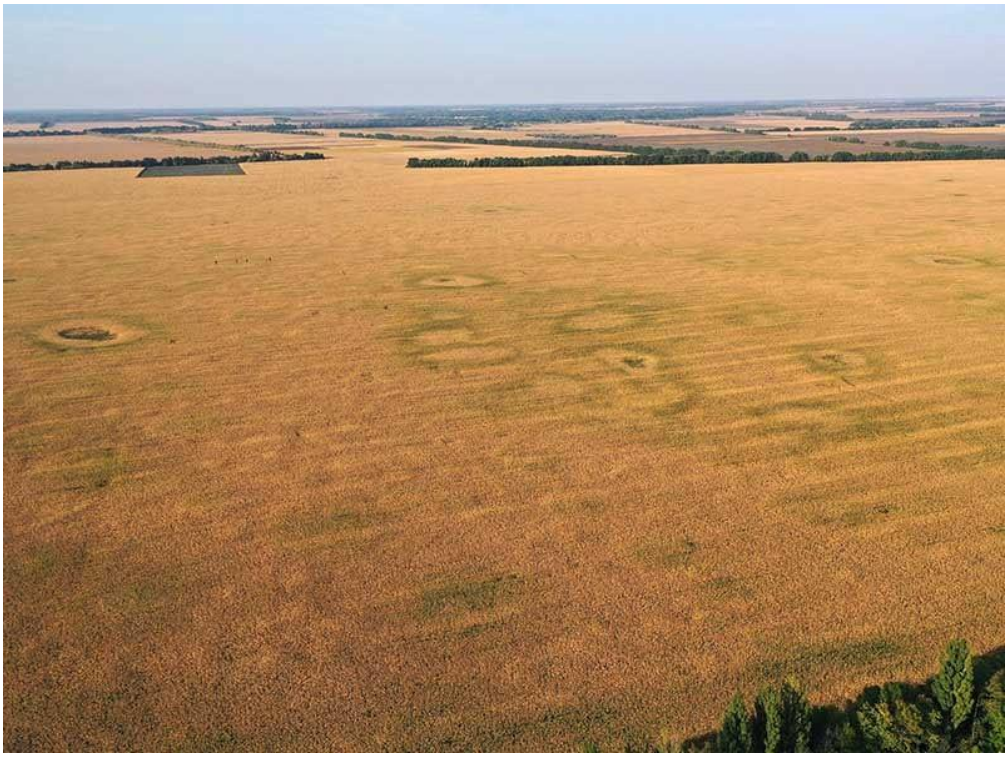


Fig. 5. Visual inspection of fields from drones.

In addition to liquids, the drone is able to disperse granular preparations on the field (Fig. 6). And, of course, a drone can also apply trichogramma as a means of safe biological plant protection.

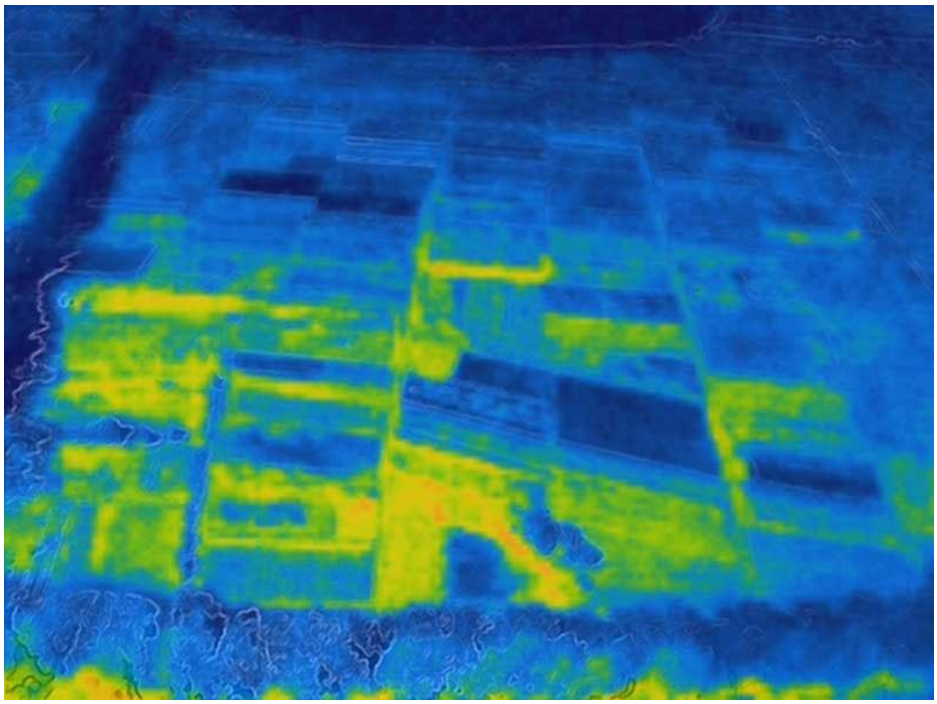


Fig. 6. Thermal imaging cameras on drones for agriculture.

Another unusual type of application of the active substance is fumigation. During fumigation, a special installation on a drone creates a powerful stream of hot air. A mixture of liquid and biologically neutral steam generator and active substance is fed into the hot air. Microdroplets of the active substance (AS) attach to the steam particles, then the biologically active steam is forcefully ejected from the fumigator nozzle.

Drones with thermal imaging cameras can see at night. In addition to being able to detect foreign equipment, people, and animals in the field, a drone with a thermal imaging camera can remotely measure soil temperature and detect fire outbreaks in a timely manner.

Conclusions

Unmanned technologies are increasingly being used in agriculture, as they are very promising for use in precision agriculture. They are becoming common for monitoring the condition of crops, detecting weeds, clarifying the boundaries of land plots, applying plant protection products, especially if this needs to be done on a limited area, etc. In addition, their operation does not require large costs or lengthy personnel training.

References

1. Silver B., Mazur M., Wiśniewski A., Babicz A. (2017). Welcome to the era of drone-powered solutions: a valuable source of new revenue streams for telecoms operators: Communications Review. URL: https://www.pwc.com/gx/en/communications/pdf/ communicationsreview-july-2017.pdf 28.01.2023

2. Lysenko V., Bolbot I., Romasevych Y., Loveykin V., VoytiukV. (2018). Algorithms of Robotic Electrotechnical Complex Control inAgricultural Production. In Control Systems: Theory and Applications. pp. 271–289.

3. Miller J. O., Adkins J. (2018). Types of drones for field crop production. University of Delaware: Fact sheets and publications. URL: https://www.udel.edu/academics/ colleges/canr/cooperative-extension/fact-sheets/types-of-drones-for-field-crop-production 15.01.2023.

4. Rogovskii I., Titova L., Sivak I., Berezova L., Vyhovskyi 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. Kuzmich I.M., Rogovskii I.L., Titova L.L., Nadtochiy O.V. (2021). Research of passage capacity of combine harvesters depending on agrobiological state of bread mass. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 677. P. 052002. https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/5/052002.

Список використаних джерел

1. Silver B., Mazur M., Wiśniewski A., Babicz A. Welcome to the era of drone-powered solutions: a valuable source of new revenue streams for telecoms operators: Communications 2017. Review. URL: https://www.pwc.com/gx/en/communications/pdf/ communicationsreview-july-2017.pdf 28.01.2023

2. Lysenko V., Bolbot I., Romasevych Y., Loveykin V., VoytiukV. Algorithms of Robotic Electrotechnical Complex Control inAgricultural Production. In Control Systems: Theory and Applications. 2018. P. 271–289.

3. Miller J. O., Adkins J. Types of drones for field crop production. University of Delaware: Fact sheets and publications. 2018. URL: https://www.udel.edu/academics/colleges/canr/cooperative-extension/fact-sheets/types-of-drones-for-field-crop-production 15.01.2023.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. Kuzmich I.M., Rogovskii I.L., Titova L.L., Nadtochiy O.V. Research of passage capacity of combine harvesters depending on agrobiological state of bread mass. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 677. P. 052002. https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/5/052002.

Євтушенко В.Д.,
Войтюк В.Д.
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна
E-mail: yevtush@ukr.net

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИВАНТАЖЕННЯ КОРЕНЕПЛОДІВ З КУЗОВА АВТОТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

https://doi.org/10.37700/ts.2024.25.195-206

УДК 629.3.016:629.3.018.7

Євтушенко В.Д., Войтюк В.Д. ***Імітаційне моделювання вивантаження коренеплодів з кузова автотранспортного засобу.***

Анотація. *В статті розкрито особливості методичного обґрунтування імітаційного моделювання вивантаження коренеплодів з кузова автотранспортного засобу. Розроблена модель дозволяє врахувати велику кількість параметрів коренеклубнеплодів, кузова транспортного засобу, еластичних трубок, параметрів процесу вивантаження, а також розрахувати основні показники ефективності вивантаження коренеклубнеплодів. Раціональний просвіт між еластичними перегородками та дном кузова транспортного засобу становить 2 см, а коефіцієнт жорсткості еластичних трубок на вигин становить 0,9 кН/м^2. При цьому час вивантаження складе менше 11,5 с, відстань розкочування коренеклубнеплодів складе менше 1,50 м, частка пошкоджених коренеклубнеплодів складе менше 4,0%.*

Ключові слова: *автомобіль, кузов, експлуатація, коренеплід.*

Yevtushenko V.D., Voytyuk V.D. ***Simulation modeling of root crop unloading from body of vehicle.***

Abstract. *The article describes the features of methodological justification of simulation modeling of unloading of root crops from the body of the vehicle. The developed model allows you to consider the large number of parameters of roots, body body, elastic tubes, unloading parameters, as well as calculate the main indicators of the efficiency of unloading of roots. The rational lumen between the elastic septum and the bottom of the body of the vehicle is 2 cm, and the rigidity of the elastic tubes for bending is 0.9 kN/m^2. The unloading time will be less than 11.5 C, the rolling distance of the roots will be less than 1.50 m, the proportion of damaged roots will be less than 4.0%.*

Key words: *vehicle, body, operation, root.*

Постановка проблеми

Збирання картоплі є важливою операцією технології вирощування. Розрізняють кілька збиральних технологій: збирання картоплі копачем, роздільне, комбіноване і потокове (рисунки 1, 2, 3). При збиранні картоплекопувачем бульби, частково відокремлені від ґрунту та рослинних залишків, укладаються на поверхню прибраних грядок. Недоліками роботи копачів є звантажування бульбоносного пласта при підкопуванні, недостатня сепарація та втрати бульб присипаних ґрунтом, пошкодження бульб при підборі.

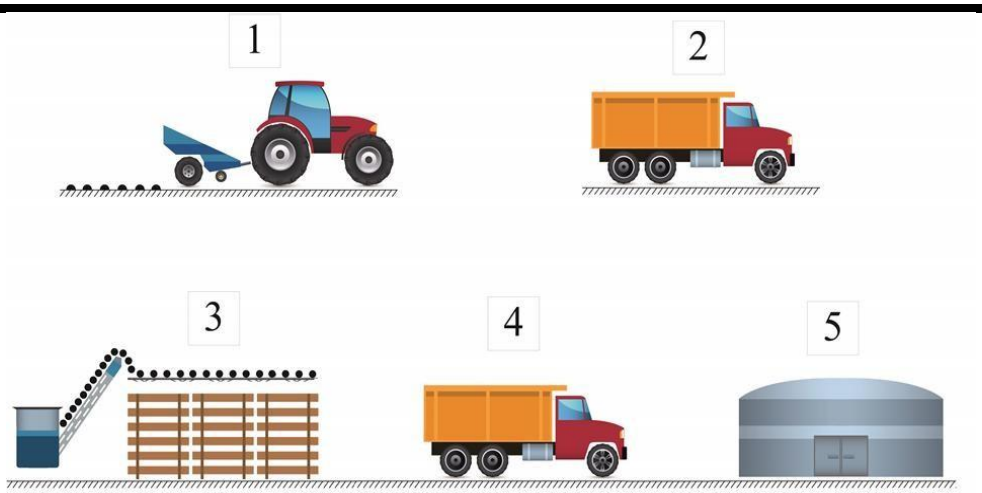


Рис. 1. Схема збирального процесу картоплі з використанням картоплекопувача: 1 – картоплекопувач; 2 – завантажений автомобіль; 3 – сортувальний пункт; 4 – завантажений автомобіль; 5 – сховище

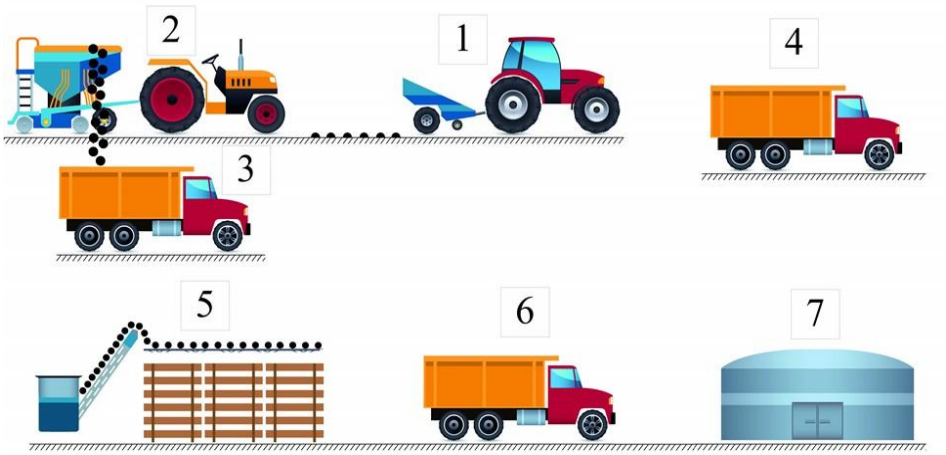


Рис. 2. Схема збирального процесу картоплі двофазним способом:
1 – картоплекопувач; 2 – комбайн підбирач; 3 – супроводжуючий автомобіль;
4 – завантажений автомобіль; 5 – сортувальний пункт; 6 – завантажений автомобіль; 7 – сховище.

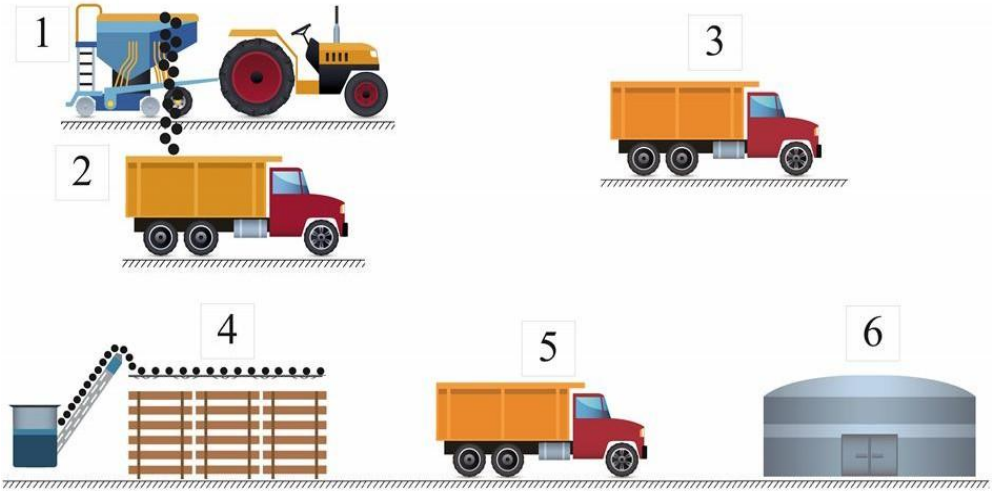


Рис. 3. Схема збирання картоплі прямим комбайнуванням (потокова технологія): 1 – картоплезбиральний комбайн; 2 – супроводжуючий автомобіль; 3 – завантажений автомобіль; 4

Двофазний спосіб збирання передбачає утворення валка бульб за допомогою картоплекопувача-валкоукладача з наступним підбором комбайном через деякий час. Цей спосіб може бути реалізований за тривалого періоду збирання в м'якому кліматі (Європейські країни). Особливістю комбінованого способу (різновид двофазного способу) є прибирання комбайном чотирьох або шести рядків одночасно, які попередньо прибрані картоплекопувачем-валкоукладачем і укладені в міжряддя сусідніх грядок. Прибирання валка комбайном дозволяє збільшити співвідношення бульб до ґрунту, що підвищує чистоту бульб у бункері та знижує їх пошкодження. Крім того, як і в роздільному способі, бульби валка підсихають, зміцнюється їхня шкірка, що знижує обдирання шкірки, особливо при комбайновому збиранні ранньої картоплі. Недоліком цих способів Особливістю комбінованого способу (різновид двофазного способу) є прибирання комбайном чотирьох або шести рядків одночасно, які попередньо прибрані картоплекопувачем-валкоукладачем і укладені в міжряддя сусідніх грядок. Прибирання валка комбайном дозволяє збільшити співвідношення бульб до ґрунту, що підвищує чистоту бульб у бункері та знижує їх пошкодження. Крім того, як і в роздільному способі, бульби валка підсихають, зміцнюється їхня шкірка, що знижує обдирання шкірки, особливо при комбайновому збиранні ранньої картоплі. Недоліком цих способів Особливістю комбінованого способу (різновид двофазного способу) є прибирання комбайном чотирьох або шести рядків одночасно, які попередньо прибрані картоплекопувачем-валкоукладачем і укладені в міжряддя сусідніх грядок. Прибирання валка комбайном дозволяє збільшити співвідношення бульб до ґрунту, що підвищує чистоту бульб у бункері та знижує їх пошкодження. Крім того, як і в роздільному способі, бульби валка підсихають, зміцнюється їхня шкірка, що знижує обдирання шкірки, особливо при комбайновому збиранні ранньої картоплі. Недоліком цих способів Крім того, як і в роздільному способі, бульби валка підсихають, зміцнюється їхня шкірка, що знижує обдирання шкірки, особливо при комбайновому збиранні ранньої картоплі. Недоліком цих способів Крім того, як і в роздільному способі, бульби валка підсихають, зміцнюється їхня шкірка, що знижує обдирання шкірки, особливо при комбайновому збиранні ранньої картоплі. Недоліком цих способів є збільшення періоду прибирання та необхідність використання вузькоспеціалізованих машин здатних виконувати лише одну операцію. Поточний спосіб передбачає комбайнове прибирання і є найменш праце- та енерговитратним.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Сучасні технології збирання картоплі вимагають застосування високопродуктивних транспортних засобів, тому підприємства найчастіше використовують універсальні самоскиди [1]. Також перевагу отримують ефективніші транспортні засоби підвищеної місткості [2].

Поточний спосіб збирання картоплі передбачає застосування автомашин-самоскидів, автомашин з напівпричепами, тракторних самоскидних причепів, напівпричепів. Основними вимогами до транспортних засобів для картоплі при збиранні є збільшення продуктивності за рахунок збільшення місткості, зниження простоїв при розвантаженні та мінімізація пошкоджень бульб [3].

Розвантаження самоскидних транспортних засобів великої місткості супроводжується підняттям кузова, при цьому слід враховувати висоту сховищ або навісів, а також пошкоджень бульб картоплі при розвантаженні [4].

Для підвищення прохідності та зниження тиску на ґрунт знижують тиск у шинах машин та причепів. З цією метою у ходових системах транспортних засобів використовують широкопрофільні шини [5].

У США для перевезення картоплі застосовують спеціальні транспортні засоби, обладнані конічними бункерами з рухомим дном та з вивантажним транспортером [6].

Причому дуже часто застосовують різного типу гасителі падіння, зокрема, покривають дно прогумованим полотном (фірми Dalman, Lockwood) [7] або встановлюють спеціальні гасники [8].

В Україні її для перевезення картоплі застосовують самоскиди і тракторні причепи. Вивантаження картоплі здійснюють перекиданням кузова через задній борт через особливості приймальних бункерів картоплесортувальних пунктів, що викликає додаткові механічні пошкодження бульб, особливо при використанні універсальних самоскидних транспортних [9].

Формулювання мети досліджень

Метою дослідження є методичне обґрунтування імітаційного моделювання вивантаження коренеплодів з кузова автотранспортного засобу.

Методичний підхід в проведенні досліджень

Розроблена модель дозволяє врахувати велику кількість параметрів коренеклубнеплодів, кузова транспортного засобу, еластичних трубок, параметрів процесу вивантаження, а також розрахувати основні показники ефективності вивантаження коренеклубнеплодів.

Змінні, що стосуються розробленої моделі, можна поділити на три групи: дві групи вхідних змінних та одну групу показників ефективності.

До першої групи вхідних змінних відносяться конструктивні та технологічні параметри пристрою:

φm - максимальний кут нахилу кузова транспортного засобу;

tн – час нахилу кузова транспортного засобу із постійною кутовою швидкістю на максимальний кут φm;

cта – коефіцієнт жорсткості еластичних трубок на вигин;

nрт - кількість еластичних перегородок у кузові транспортного засобу.

Друга група змінних визначає властивості системи:

коренеклубнеплодів:

hз – висота завантаження кузова транспортного засобу;

dдо - діаметр коренеклубнеплодів (у варіанті моделі з коренеклубнеплодами одного і того ж діаметру);

kв - коефіцієнт в'язкого тертя між коренеклубнеплодами, що дозволяє не явно задавати рівні забруднення і липкості коренеклубнеплодів.

До показників ефективності пристрою для транспортування та вивантаження коренеклубнеплодів відносяться:

tв - час повного вивантаження коренеклубнеплодів;

Lр - середня відстань розкочування коренеклубнеплодів;

nп – частка пошкоджених коренеклубнеплодів.

Подальше теоретичне дослідження полягає у варіюванні параметрів моделі та вивченні відгуку показників ефективності пристрою для транспортування та вивантаження коренеклубнеплодів.

Результати досліджень

Вплив максимального кута нахилу кузова транспортного засобу. Зі збільшенням

граничного кута нахилу кузова транспортного засобу φm істотно збільшується інтенсивність вивантаження, що сприятливо впливає швидкість вивантаження, але несприятливо впливає на ушкоджуваність коренеклубнеплодів та їх розкочування. Для дослідження впливу кута на ефективність процесу вивантаження провели п'ять комп'ютерних експериментів зі зміною від 15 до 35° з кроком 5° (рис. 4, рис. 5). Для порівняння комп'ютерні експерименти провели як для кузова транспортного засобу, оснащеного двома еластичними перегородками, так стандартного кузова транспортного засобу без еластичних перегородок.

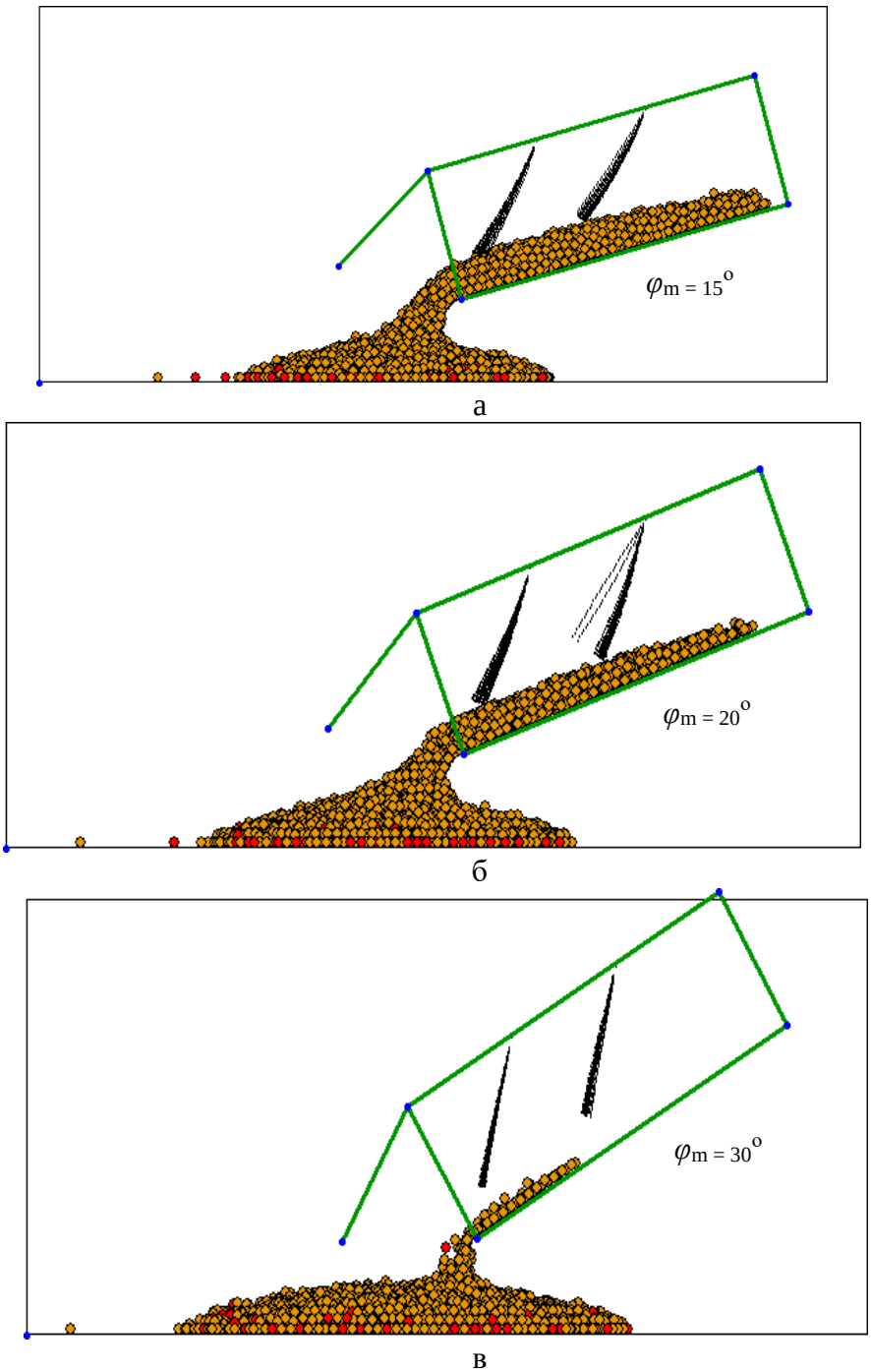


Рис. 4. Стан системи коренеклубнеплодів у момент досягнення максимального кута φm нахилу кузова транспортного засобу (при постійної кутової швидкості нахилу кузова транспортного засобу 4 градуси в секунду): а – 15°, б – 20°, в – 30°

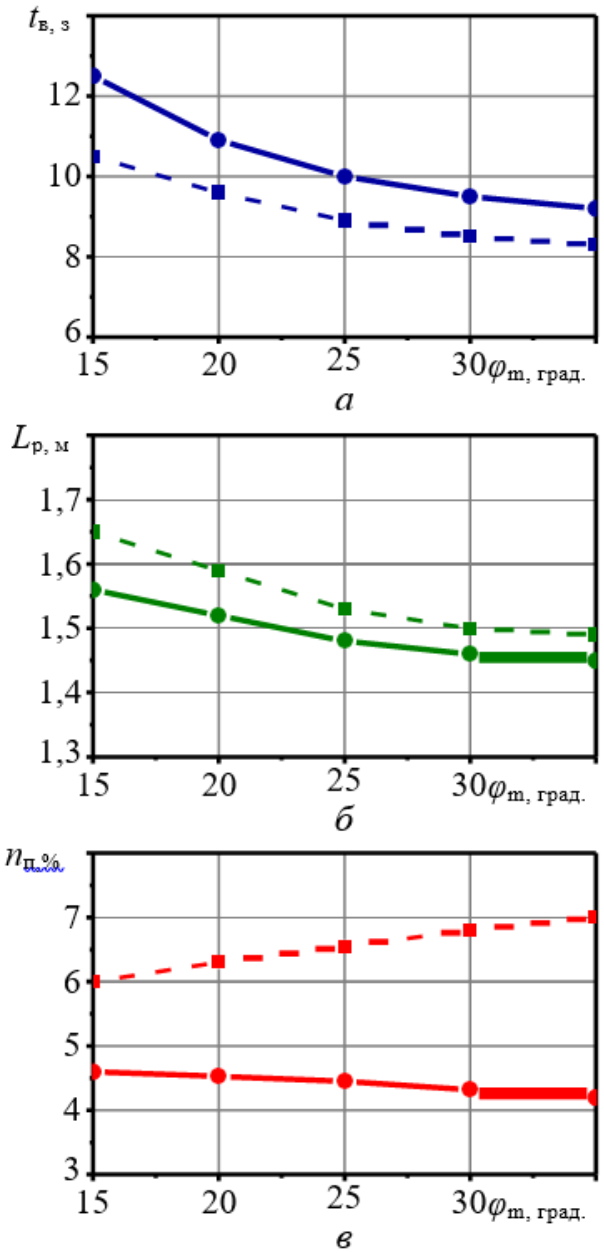


Рис. 5. Вплив максимального кута нахилу кузова транспортного засобу φm (при постійній кутовій швидкості нахилу кузова транспортного засобу 4 градуси за секунду) на час вивантаження tв(а), середня відстань розкочування Lp (б) та частку пошкоджених коренеклубнеплодівnп (в). Суцільна та штрихова лінії – відповідно оснащений та не оснащений еластичними перегородками.

Визначення параметрів еластичних трубок. Еластичні трубки характеризуються двома основними параметрами: довжиною Lт та коефіцієнтом жорсткості на вигин сі. Досліджуємо спільний вплив параметрів еластичних трубок Lт та сі на показники ефективності та виконаємо двофакторну оптимізацію параметрів Lт (рис. 6).

Для вирішення двофакторної задачі оптимізації провели дев'ять комп'ютерних експериментів, в яких задавали довжину трубки Lт рівної 1,40, 1,52, 1,64 м (висота кузова транспортного засобу становить 1,60 м) при одночасному зміні коефіцієнта жорсткості трубки на вигин рівнях 0,6, 1,0, 1,4 кН/м^2.

Коефіцієнт жорсткості на вигин має фізичний сенс сили, яку необхідно

докласти, щоб забезпечити стрілу прогину в 1 м трубки, що спирається на два упори з відстанню між упорами 1 м. Зокрема коефіцієнт 1,0 кН/м^2 означає, що при додатку сили 10 Н (від маси умовного вантажу приблизно 1 кг) стріла прогину трубки становитиме 1 см, якщо еластична трубка спирається на упори з відстанню між ними 1 м.

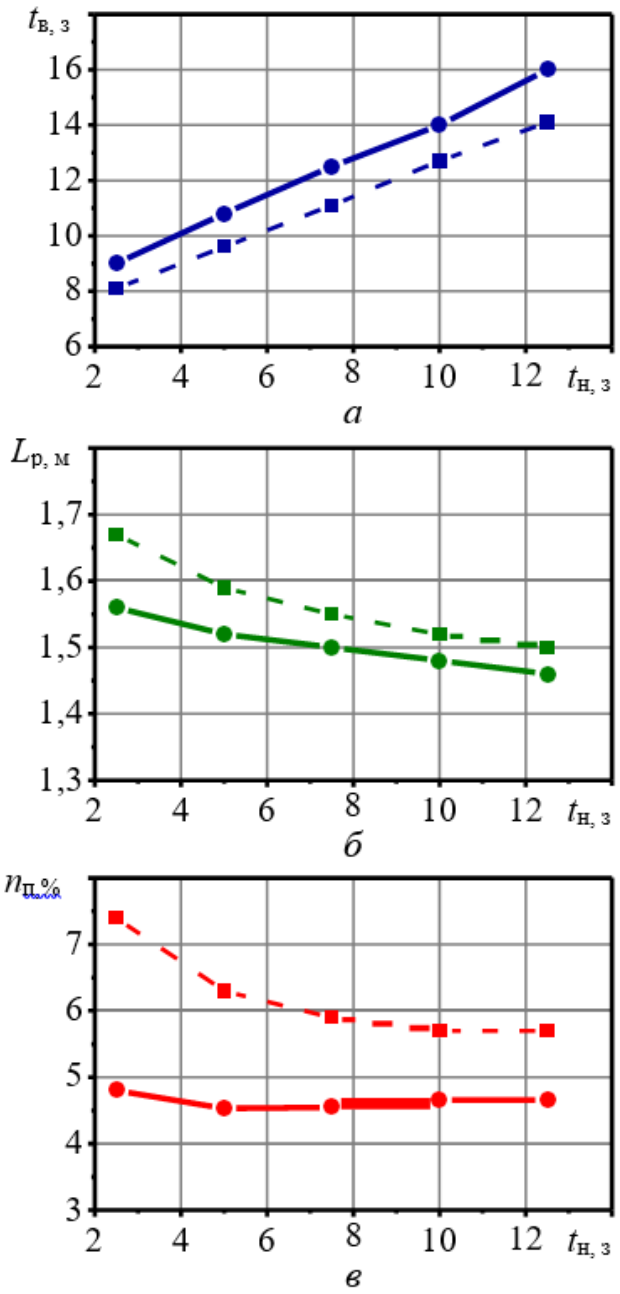
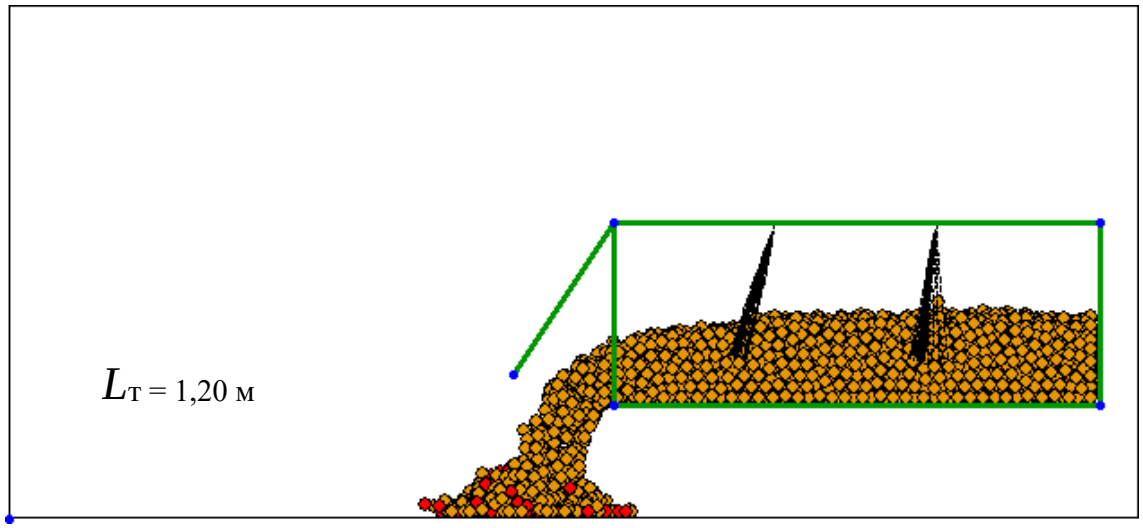


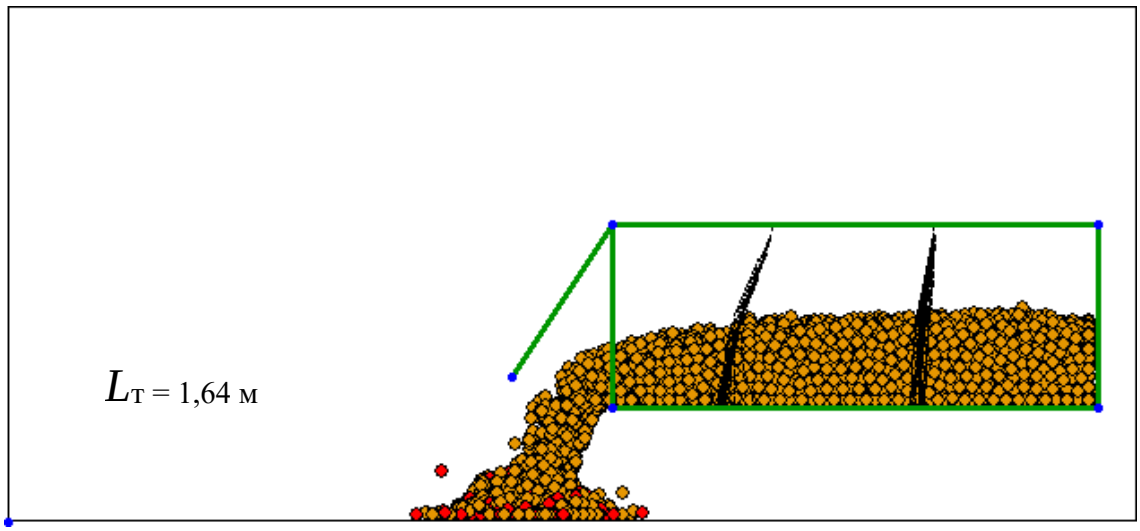
Рис. 6. Вплив часу tн нахилу кузова транспортного засобу на кут 20^O на час вивантаження tв(а), середня відстань розкочування Lр(б) та частку пошкоджених коренеклубнеплодів nп(в). Суцільна та штрихова лінії – відповідно оснащений та не оснащений рядами еластичних трубок

На рис. 7 показано стан системи двох різних довжин Lт еластичних трубок в останній момент часу 2,2 з початку комп'ютерного експерименту. Як можна судити за даними проекціям, при занадто низькій довжині еластичних трубок вони захоплюються

верхніми шарами коренеклубнеплодів, і надають слабкий вплив на вивантаження, що гальмує (рисунок 7, а). При занадто великій довжині еластичних трубок, вони мають хороший вплив на уповільнення вивантаження, проте можуть травмувати коренеклубнеплоди біля дна кузова транспортного засобу за рахунок значних сил на них (рисунок 7, б).



а



б

Рис. 7. Процес вивантаження коренеклубнеплодів при різній довжині еластичних трубок Lт: а - 1,20 м, б - 1,64 м

На основі набору даних, отриманого в результаті проведення дев'яти комп'ютерних оптимізаційних експериментів, отримані аналітичні формули для функцій тв(Lт, сі), Lp(Lт, сі) і nп(Lт, сі). Для узагальнення та згладжування результатів кожну функцію апроксимували поліномами другого порядку у вигляді:

$$K(L_T, c_i) = k_1 L_T^2 + k_2 c_i^2 + k_3 L_T c_i + k_4 L_T + k_5 c_i + k_6$$

де K-критерій оптимізації (тв, Lp або nп); k1...k6 – параметри полінома.

Отримані формули можуть бути використані для швидкої оцінки (без виконання

реальних або комп'ютерних експериментів) показників ефективності пристрою в залежності від параметрів еластичних трубок.

Для подальшого аналізу функції tв(Lт, сі), Lр(Lт, сі) та nп(Lт, сі) представлені у вигляді графіків (рисунок 8) та картограм (рисунок 9).

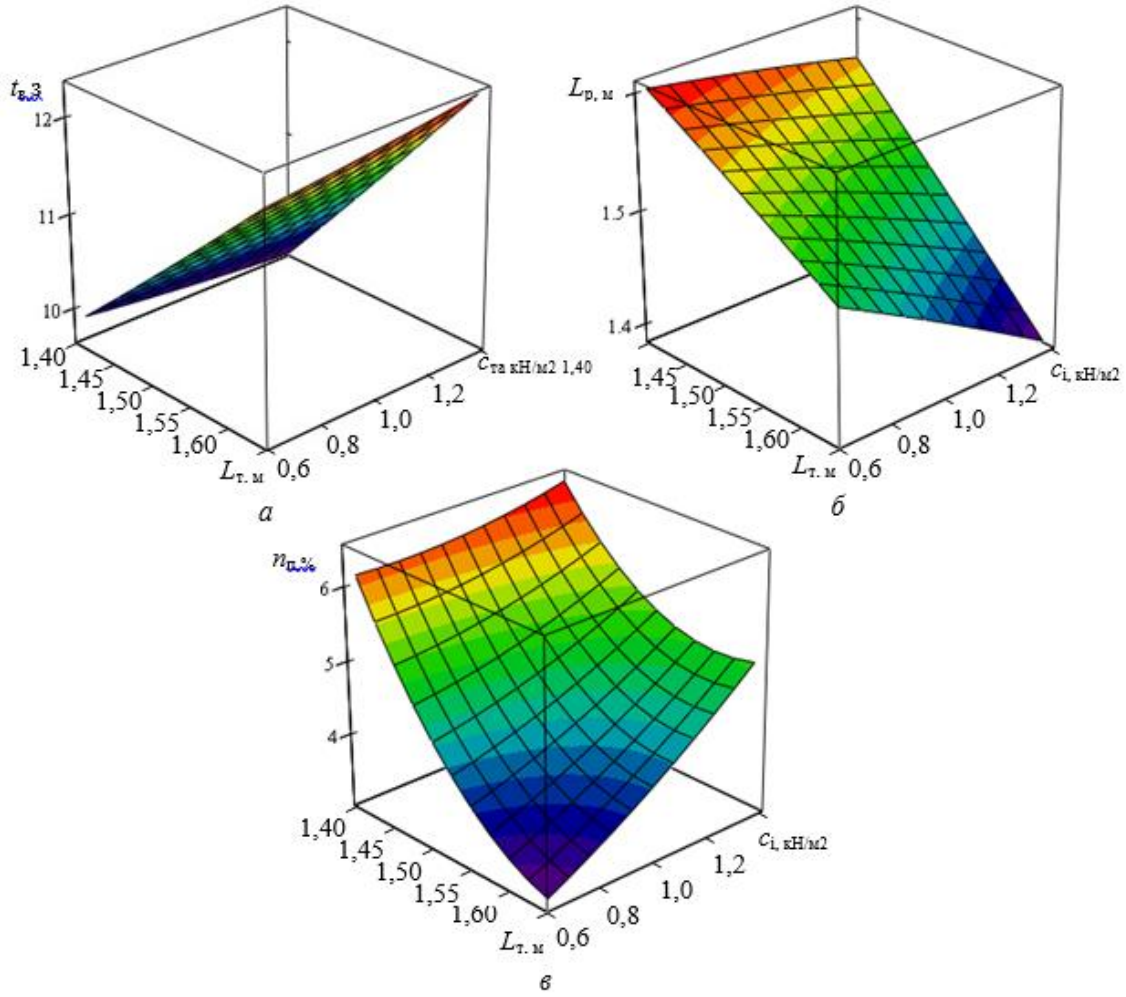


Рис. 8. Графіки впливу довжини Lт та коефіцієнта жорсткості на вигин сі еластичних трубок на час вивантаження tв(а), відстань розкочування Lр(б) та частку пошкоджених коренеклубнеплодів nп(в)

Графіки дозволяють візуально проаналізувати характер поверхонь відгуку: залежності tв(Lт, сі), Lр(Lт, сі) близькі до лінійних, тоді як залежність nп(Lт, сі) істотно нелінійна і має увігнутий характер. Картограми призначені для кількісного аналізу та видом на графіки зверху, із зображенням поверхні відгуку лініями рівня.

Приклад використання картограм показаний малюнку 2.17, а. Якщо довжина еластичної трубки становить 1,45 м (точка А) і коефіцієнт жорсткості на вигин становить 1,0 кН/м^2 (точка В), то відповідна точка факторного простору С потрапляє приблизно посередині між лініями рівня tв = 10,0 с та tв = 10,5 с. Тобто час вивантаження складе близько 10,25с. На картограмах затемнені області сприятливого (мінімального) значення показників. Порогові значення для поділу на сприятливу та несприятливу області вибрано tв = 11,5 с (рисунок 8, а), Lр = 1.50 м (рисунок 8, б) та nп = 4 % (рисунок 8, в). Вибір зроблений, виходячи з умов, що сприятлива область

займатиме значну часткуфакторного простору, включати найменші значення критерію, і кордон області буде лінією рівня на картограмі.

Перетин сприятливих областей (рисунок 9, г) являє собою оптимальну область, в якій одночасно враховуються вимоги низьких значень часу вивантаження, відстані розкочування та частки пошкоджених коренеклубнеплодів [10].

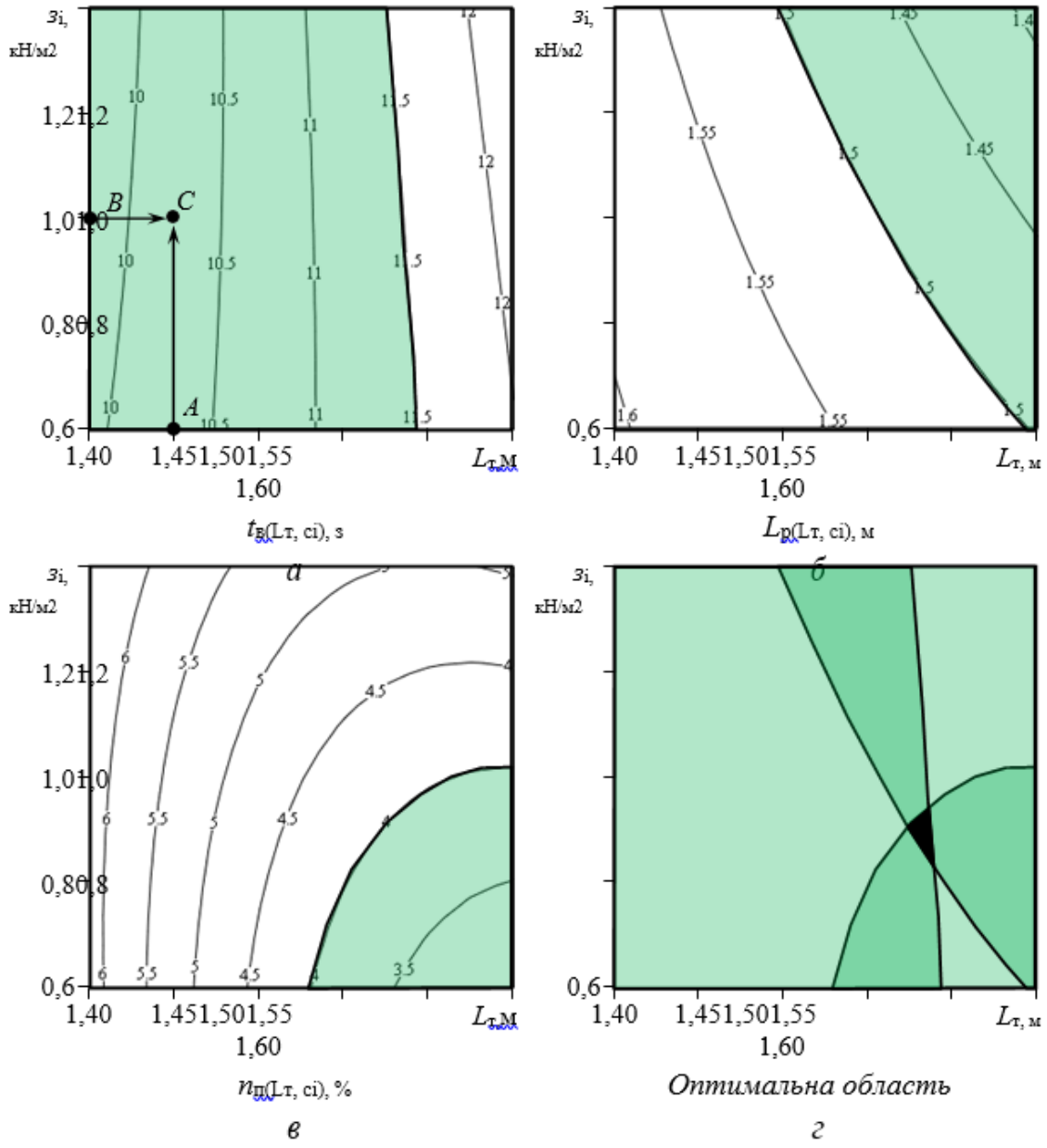


Рис. 9. Картограми оптимізації параметрів еластичних трубок (Затемнені сприятливі області факторного простору. Чорним виділено загальну оптимальну область)

За розташуванням оптимальної області в факторному просторі (рисунок 9, г) можна зробити наступний висновок. Оптимальна довжина еластичної трубки становить 1,58 м (при висоті кузова транспортного засобу 1,60 м, тобто просвіт між трубкою та дном кузова транспортного засобу має становити 2 см), оптимальний коефіцієнт жорсткості трубки на вигин становить 0,9 кН/м2. При цьому час вивантаження складе менше 11,5 с, відстань розкочування коренеклубнеплодів складе менше 1,50 м, частка

пошкоджених коренеклубнеплодів складе менше 4,0%. Для оптимальних параметрів проведено окремий комп'ютерний експеримент, який підтвердив, що показники ефективності пристрою не перевищують зазначених значень.

Висновки

1. Розроблено математичну модель пристрою для транспортування та вивантаження коренеклубнеплодів, що враховує фізичні властивості коренеклубнеплодів, фізичні та геометричні характеристики кузова транспортного засобу та еластичних перегородок, а також параметрів процесу вивантаження. Модель дозволяє оцінити ефект від оснащення кузова транспортного засобу рядами еластичних перегородок та визначити їх оптимальні параметри.
2. Розроблено комп'ютерну програму, що дозволяє на основі комп'ютерних експериментів з моделлю вивчати ефективність пристрою для транспортування та вивантаження коренеклубнеплодів.
3. Раціональний просвіт між еластичними перегородками та дном кузова транспортного засобу становить 2 см, а коефіцієнт жорсткості еластичних трубок на вигин становить 0,9 кН/м^2. При цьому час вивантаження складе менше 11,5 с, відстань розкочування коренеклубнеплодів складе менше 1,50 м, частка пошкоджених коренеклубнеплодів складе менше 4,0%.

Список використаних джерел

1. Stroud, G., Peters, J. and Cunnington, A. 2020. Effects of condensation on development of storage diseases. British Potato Council, online access 23rd March 2019 at www.potato.org.uk
2. https://www.lsu.edu/agriculture/plant/extension/hcpl-publications/2_Pub.3442-TransportationofFreshProduce-BestPracticestoEnsureOn-FarmFoodSafety.pdf
3. Hashemi S. M. Strength of Super-Structure UN-ECE R66 Rollover Approval of Coaches based on Thin-Walled Framework Structures. Vehicle Structures & Systems. 2019. № 1(4). P. 78-84.
4. He Y., McPhee J. A design methodology for mechatronic vehicles: Application of multidisciplinary optimization, multibody dynamics and genetic algorithms. Vehicle System Dynamics. 2019. Vol. 43. Issue 10. P. 697-733. doi:10.1080/00423110500151077.
5. Nazarenko I., Dedov O., Bernyk I., Rogovskii I., Bondarenko A., Zapryvoda A., Titova L. Study of stability of modes and parameters of motion of vibrating machines for technological purpose. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Vol. 6 (7-108). P. 71-79. doi:10.15587/1729-4061.2020.217747.
6. Kresan T., Pylypaka S., Ruzhylo Z., Rogovskii I., Trokhaniak O. External rolling of a polygon on a closed curvilinear profile. Acta Polytechnica. 2020. Vol. 60. No 4. P. 313-317. doi:10.14311/AP.2020.60.0313.
7. Hrynkiv A., Rogovskii I., Aulin V., Lysenko S., Titova L., Zagurskiy O., Kolosok I. Development of a system for determining the informativeness of the diagnosing parameters of the cylinder-piston group of the diesel engines in operation. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Vol. 3 (5(105)). P. 19-29. doi:10. 15587/1729-4061.2020.206073.
8. Voinalovych O., Hnatiuk O., Rogovskii I., Pokutnii O. Probability of traumatic situations in mechanized processes in agriculture using mathematical apparatus of Markov chain method. Engineering for Rural Development. 2019. Vol. 18. P. 563-269.

doi:10.22616/ERDev2019.18. N245.

9. Aulin V., Hrynkiv A., Lysenko S., Rohovskii I., Chernovol M., Lyashuk O., Zamota T. Studying truck transmission oils using the method of thermal-oxidative stability during vehicle operation. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Vol. 1 (1/6(97)). P. 6-12. doi:10.15587/1729-4061.2019.156150.

References

1. Stroud, G., Peters, J. and Cunnington, A. (2020). Effects of condensation on development of storage diseases. British Potato Council, online access 23rd March 2019 at www.potato.org.uk

2. https://www.lsu.edu/agriculture/plant/extension/hcpl-publications/2_Pub.3442-TransportationofFreshProduce-BestPracticestoEnsureOn-FarmFoodSafety.pdf

3. Hashemi S. M. (2019). Strength of Super-Structure UN-ECE R66 Rollover Approval of Coaches based on Thin-Walled Framework Structures. Vehicle Structures & Systems. 2019. № 1(4). P. 78-84.

4. He Y., McPhee J. (2019). A design methodology for mechatronic vehicles: Application of multidisciplinary optimization, multibody dynamics and genetic algorithms. Vehicle System Dynamics. Vol. 43. Issue 10. P. 697-733. doi:10.1080/00423110500151077.

5. Nazarenko I., Dedov O., Bernyk I., Rogovskii I., Bondarenko A., Zapryvoda A., Titova L. (2020). Study of stability of modes and parameters of motion of vibrating machines for technological purpose. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 6 (7-108). P. 71-79. doi:10.15587/1729-4061.2020.217747.

6. Kresan T., Pylypaka S., Ruzhylo Z., Rogovskii I., Trokhaniak O. (2020). External rolling of a polygon on a closed curvilinear profile. Acta Polytechnica. 2020. Vol. 60. No 4. P. 313-317. doi:10.14311/AP.2020.60.0313.

7. Hrynkiv A., Rogovskii I., Aulin V., Lysenko S., Titova L., Zagurskiy O., Kolosok I. (2020). Development of a system for determining the informativeness of the diagnosing parameters of the cylinder-piston group of the diesel engines in operation. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 3 (5(105)). P. 19-29. doi:10. 15587/1729-4061.2020.206073.

8. Voinalovych O., Hnatiuk O., Rogovskii I., Pokutnii O. Probability of traumatic situations in mechanized processes in agriculture using mathematical apparatus of Markov chain method. Engineering for Rural Development. Vol. 18. P. 563-269. doi:10.22616/ERDev2019.18. N245.

9. Aulin V., Hrynkiv A., Lysenko S., Rohovskii I., Chernovol M., Lyashuk O., Zamota T. (2019). Studying truck transmission oils using the method of thermal-oxidative stability during vehicle operation. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 1 (1/6(97)). P. 6-12. doi:10.15587/1729-4061.2019.156150.

Загурський А.О.
Національний університет біоресурсів і природокористування України.,
м. Київ, Україна
E-mail:
andreyzagurskiy1@gmail.com

КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ ГАЛЬМІВНИХ КОЛОДОК СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ ЗДАТНИХ ВПЛИВАТИ НА ЇХ ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗА РІЗНИХ РЕЖИМІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

https://doi.org/10.37700/ts.2024.25.207-218

УДК 629.4

Загурський А.О. ***Конструктивні особливості гальмівних колодок сільськогосподарської техніки здатних впливати на їх ефективність за різних режимів експлуатації.***

Анотація. *Гальмівна колодка є одним з ключових компонентом безпеки як пасажирів так і вантажів. Вона відіграє вирішальну роль в управлінні автотранспортними засобами та обладнанням машин, а її конструктивні особливості визначають ефективність гальмування, довговічність, екологічність та безпеку транспортного засобу. Трибологічні характеристики дискових гальм значною мірою залежать від конструкції та матеріалів з яких виготовлені гальмівні диски й колодки та коефіцієнту тертя, що виникає між ними. Останній суттєво залежить від температури та стану поверхні тертя. При надмірному нагріванні (наприклад, при інтенсивному гальмуванні) виникає ефект вигоряння фрикційного матеріалу, що призводить до втрати коефіцієнта тертя та зниження ефективності гальмування. В роботі теоретично обґрунтовано залежність гальмувань від температурних режимів експлуатації гальмівної системи автотранспортних засобів. Досліджено ефективність роботи удосконаленої гальмівної колодки 2ТР-114 Тр108 R3 за різних температурних режимів та проведено порівняння її показників із трьома іншими зразками гальмівних колодок, які використовуються у автотранспортних засобах України. Результати тестів проведених на інерційному динамометричному стенді TecSA TTR2600 ТОВ «БЦЗ «Трібо» згідно ISO 26866:2009 засвідчили, що запропонований зразок гальмівної колодки успішно пройшов випробування і у порівнянні із іншими трьома зразками показав гарні результати (у тестах на ефективність гальмування зі зміною температур та швидкості показав стабільне 2 місце) поступаючись за окремими показниками лише зразку «2». Причому у тесті на припрацювання для виходу на стабільний гальмівний момент йому знадобилося найменша кількість гальмувань, що свідчить про його переваги при притиранні нових колодок до диску при їх заміні, що може бути використано при сервісному обслуговуванні автотранспортних засобів.*

Ключові слова: *зносні гальмування, коефіцієнт тертя, притирання, температурні режими, трибологічні характеристики, фрикційні матеріали.*

Zagurskiy A.O. ***Design features of brake pads of agricultural machinery that can affect their efficiency under different operating conditions.***

Abstract. *The brake pad is one of the key components of the safety of both passengers and cargo. It plays a crucial role in the management of motor vehicles and machine*

equipment, and its design features determine the braking efficiency, durability, environmental friendliness and safety of the vehicle. The tribological characteristics of disc brakes largely depend on the design and materials from which the brake discs and pads are made and the friction coefficient that occurs between them. The latter significantly depends on the temperature and condition of the friction surface. With excessive heating (for example, during intensive braking), the effect of burnout of the friction material occurs, which leads to a loss of the friction coefficient and a decrease in braking efficiency. The work theoretically substantiates the dependence of braking on the temperature conditions of operation of the brake system of motor vehicles. The efficiency of the improved brake pad 2TP-114 Tp108 R3 under different temperature conditions was investigated and its performance was compared with three other brake pad samples used in Ukrainian vehicles.The results of tests conducted on the TecSA TTR2600 inertial dynamometer of LLC "BCZ "Tribo" according to ISO 26866:2009 showed that the proposed brake pad sample successfully passed the test and, in comparison with the other three samples, showed good results (in tests for braking efficiency with changes in temperature and speed, it showed a stable 2nd place), inferior in individual indicators only to sample "2". Moreover, in the running-in test, it required the least number of braking operations to reach a stable braking torque, which indicates its advantages when lapping new pads to the disc when replacing them, which can be used in vehicle service.

Key words: *wear braking, friction coefficient, lapping, temperature regimes, tribological characteristics, friction materials.*

Постановка проблеми

Гальмівна система є одним з найбільш важливих компонентів сучасних автомобілів з точки зору безпеки. При гальмуванні складові гальмівної системи (колодки та дискове гальмо) входять у трибологічний або ковзний фрикційний контакт через який автомобіль уповільнює рух, а зрештою і зупиняється. У наслідок тертя та перетворення кінетичної енергії генерується тепло, яке сприяє підвищенню температури до критичних значень дозволених для експлуатації матеріалів гальмівних механізмів. Це може призвести до небажаних наслідків, таких як вицвітання гальм, локальних задирів, термоеластичної нестабільності, термічних тріщин та відповідно передчасного зношування або руйнування компонентів гальмівної системи.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Результати нагрівання пар тертя у процесі експлуатації автотранспортних засобів та їх вплив на ефективність гальмування відображені як у вітчизняних так і зарубіжних дослідженнях. Зносостійкість гальмівних механізмів та ефективність гальмувань за підвищених температур розглянуто у роботах О.В. Бевза, С.О. Магопця та О.О. Матвієнко [1], А. Белхочін, та М. Бушетари [3], М. Кіндрачука, Д. Волченко, Н. Фідровської, О. Духоти, Д. Журавльова, М. Осташук, Ю. Пороховського та В. Харченко [10], Д. Карлевариса, М. Леонарді, Дж. Страффеліні, С. Джаланелла [5] та інших науковців.

Вплив різних інгредієнтів композицій фрикційного матеріалу гальмівних колодок на ефективність процесу гальмування досліджують Ж. Готье ді Контьенго та М.Г. Фага [7], А.Р. Іраван, Д.Ф. Фітріяна, К. Тезара, Дж.Р. Сірегар, Д. Лакшмідеві, Г.Д. Баскара, М.З. Абдулла, Р. Джунід, А.Е. Хаді, та М.Х.М. Хамдан [9], А. Сінха., Г. Іскья, К. Менапейс, і С. Джаланелла [17] та інші дослідники.

А зважуючи на те, що завжди існує потреба в застосуванні нових матеріалів з покращеними властивостями, ніж у існуючих, сучасні гальмівні колодки продовжують

удосконалювати як з погляду матеріалів так і конструкції. Тому все більше науковців та практиків [6, 15, 19] для підвищення стійкості гальмівних колодок пропонують при їх виробництві застосовувати так званий скорчинг (короткочасне нагрівання поверхні гальмівних колодок до 600-800 °С). Такий підхід дає можливість запобігати падінню ефективності гальмівної системи за високих температур та сприяти проведенню нових досліджень з пошуку більш досконалих конструкцій та матеріалів для підвищення ефективності гальмівних систем.

Формулювання мети досліджень

Метою дослідження є теоретичне обґрунтування та практичне дослідження впливу конструкції та складу гальмівної колодки на ефективність гальмівних моментів за різних режимів експлуатації гальмівної системи автотранспортних засобів.

Методичний підхід в проведенні досліджень

Як основний компонент гальмівної системи автомобіля, гальмівні колодки мають складну структуру та високу частоту відмов. Вони зазвичай вирішують низку практичних проблеми, таких як ефективність гальмування, шум гальмування, розсіювання тепла тощо [16]. Точний та ефективний моніторинг їх стану може допомогти оцінити безпеку та уникнути аварій, спричинених відмовою гальм. Проте процес зносу автомобільних гальмівних колодок є поступовою, нелінійною і нестаціонарною системою, що змінюється в часі, і не має фіксованого життєвого циклу, до того ж його особливості важко передбачити. У багатьох випадках він залежить від конструктивних особливостей та матеріалів з яких вироблені гальмівні колодки.

Конструктивно гальмівні колодки складаються з декількох шарів: адгезив, який утримує фрикційний матеріал на інших шарах, забезпечується підшаром, який розміщується між фрикційним матеріалом та задньою пластиною; задня пластина надає гальмівним колодкам необхідну жорсткість і дозволяє їм продовжувати рухатися напрямним супортом; фрикційний матеріал, що знаходиться у безпосередньому контакті з диском під час процесу гальмування.

Основним компонентом, що відповідає за тертя колодки з гальмівним диском є фрикційний матеріал. Він суттєво впливає на ефективність гальмування автомобіля, особливо в умовах жорсткого гальмування, за якого температура гальмівної системи піднімається вище за критичне значення. [14]. Фрикційний матеріал складається з різних інгредієнтів, кожен з яких розроблений для певних застосувань [2;8;12] і може мати різні комбінації цих компонентів, залежно від їх призначення та вимог до експлуатації. Зазвичай фрикційні матеріали для виготовлення гальмівних накладок являють собою композитиви, що утворені шляхом гарячого пресування грубих порошків, які включають багато різних компонентів (10 і більше), а саме: сполучну речовину, яка утримує інші компоненти разом і утворює термостабільну матрицю (використовуються термореактивні фенольні смоли, часто з додаванням каучуку для поліпшення демпфуючих властивостей); конструкційні матеріали, що забезпечують механічну міцність (металеві, мінеральні і керамічні волокна, скляні та/або кевларові волокна, рідше різні вуглецеві волокна); наповнювачі, в основному для зниження вартості, але також і для покращення технологічності (часто використовуються різні мінерали, такі як слюда та вермікуліт); фрикційні добавки, що додаються для забезпечення стабільних фрикційних властивостей та контролю швидкості зносу як колодки, так і диска (тверді мастильні матеріали, такі як графіт та різні сульфіди металів). Трибологічні та емісійні характеристики дискових гальм значною мірою

залежать від характеристик контактної поверхні дисків і колодок та коефіцієнту тертя, що виникає між ними.

Причому до останніх висувається ціла низка вимог:

– високий динамічний коефіцієнт тертя, який має залишатися стабільним не залежно від температури, тиску та швидкості ковзання;

– висока зносостійкість і міцність (повинні витримувати кутову швидкість, що вдвічі перевищує максимальну кутову швидкість двигуна без руйнування);

– плавне та пропорційне стиснення;

– збільшення сили тертя;

– достатня термостійкість і теплопровідність (температура колодок не має перевищувати 200°С при тривалій експлуатації та 350°С при короткочасній експлуатації) [10].

Разом тим за визначенням Г. Страффеліні [18] сила є функцією часу або відстані ковзання. Вона демонструє початковий перехідний режим з лінійною поведінкою до досягнення піку. За ним слідує режим стійкого стану, що відповідає стабілізації сили тертя. Пік наприкінці перехідного режиму відповідає коефіцієнту статичного тертя, тоді як режим сталого стану пов'язані з коефіцієнтом динамічного тертя [4]. І як зазначають М. Мотта, Л. Федрицци та Ф. Андреатта «синергетичний ефект, що існує між різними інгредієнтами та їх впливом на властивості тертя, надзвичайно складний» [13]. Тому у трибологічних системах сила тертя між гальмівним диском та колодкою суттєво залежить від коефіцієнту тертя та силою притискання між ними і визначається за формулою:

$$F_{\text{тертя}} = \mu \times F_{\text{н}}, \quad (1)$$

де: μ – коефіцієнт тертя між матеріалом гальмівного диска та колодки (безрозмірна величина, що залежить від матеріалів гальмівного диска і колодки. Зазвичай μ для гальмівних систем знаходиться у діапазоні 0,3-0,70). Причому коефіцієнт тертя та питома швидкість зносу зменшуються зі збільшенням контактного тиску та швидкості ковзання [21];

$F_н$ – нормальна сила (сила притискання колодки до диска, яка створюватися за рахунок гідравлічного або механічного приводу в системі гальм), Н.

Сила тертя також залежить від температури (під час роботи коефіцієнт тертя може змінюватися через нагрівання) та стану поверхні (наявність пошкоджень, бруду, води, масла тощо). І практично не залежить від площі контакту гальмівної пари (якщо нормальна сила $F_н$ і коефіцієнт тертя залишаються незмінними), зміна площі контакту більшою мірою впливає на схильність до шуму [11]. Це пояснюється тим, що зі зменшенням площі контакту, тиск (сила на одиницю площі) зростає, але загальна сила тертя залишається сталою. Проте, зменшення площі контакту може призвести до швидшого нагрівання і зношування матеріалів, оскільки тепло і механічне навантаження концентруються на меншій площі. Це може впливати на коефіцієнт тертя (μ) через перегрівання або зміну стану поверхні та знос гальмівної колодки.

До факторів, що найбільше впливають на знос гальмівної колодки С. Ван, З. Ю, Дж. Ван, С. Чен [20] відносять: стиль водіння (агресивне гальмування призводить до швидшого зносу), тип покриття доріг (їзда по гірських дорогах чи нерівностях збільшує навантаження на гальмівну систему), тягові характеристики автомобіля (важчі автомобілі зношують колодки та диски швидше), матеріали з яких виготовлені колодки (якісні матеріали зазвичай служать довше), стан гальмівної системи (нерівномірний знос може свідчити про проблеми з супортами чи іншими компонентами) тощо.

Результати досліджень

Відповідно нерівномірний розподіл навантаження може викликати нерівномірне зношування гальмівної колодки чи диска, що у свою чергу вплине на ефективність та довговічність гальмівної системи. За таких обставин на диску утворюються борозди (рис. 1 а), які призводять до менш щільного контакту колодки з диском у разі заміни останньої (адже середній час експлуатації гальмівної колодки практично у двічі менший ніж у диска) та прискореного руйнування країв нової гальмівної колодки під час експлуатації гальмівної системи (рис. 1 б).



а б

Рис. 1. Зношування гальмівної колодки та диска: а) борозди на диску; б) руйнування країв гальмівної колодки

Джерело: складено автором

Для подолання цих недоліків пропонується використовувати колодку, що має більш досконалу геометрію у вигляді скошеного (краю-конуса), який гасить вібрації та попереджає можливе руйнування фрикціону на початку робочого циклу й додатковий адаптаційний шар, що сприяє швидкому припрацюванню колодки до гальмівного диска (рис. 2).



Рис. 2. Зразок удосконаленої гальмівної колодки 2ТР-114 Тр108 R3

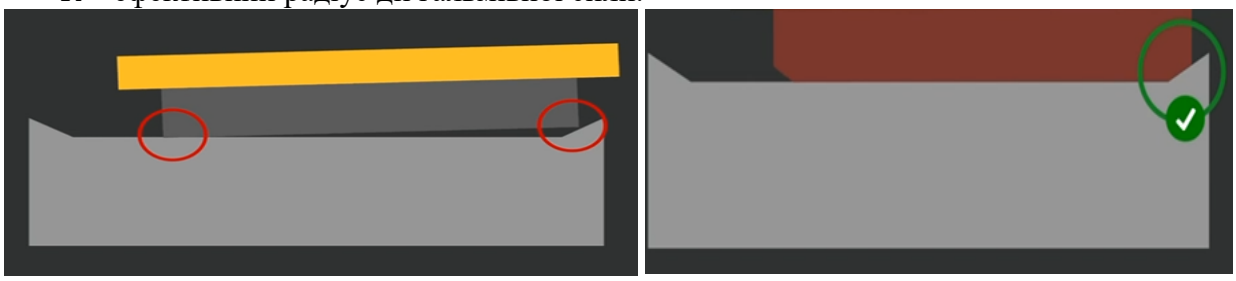
Джерело: ТОВ «БЦЗ«Трібо» UR. https://www.tribo.ua

Тепер при технічному регламенті та заміні таких колодок у гальмівній системі, що перебуває у експлуатації між колодкою та гальмівним диском не виникає зазору, як при застосуванні традиційних гальмівних колодок (рис 3 а) і утворюється більш щільний контакт (рис 3 б), а відповідно і вищий гальмовий момент, який розраховується за формулою:

$$M=F\times R, \quad (2)$$

де: F – гальмівна сила з якою колодки притискаються до диска (визначається гідравлічним тиском в системі, Н),

R – ефективний радіус дії гальмівної сили.



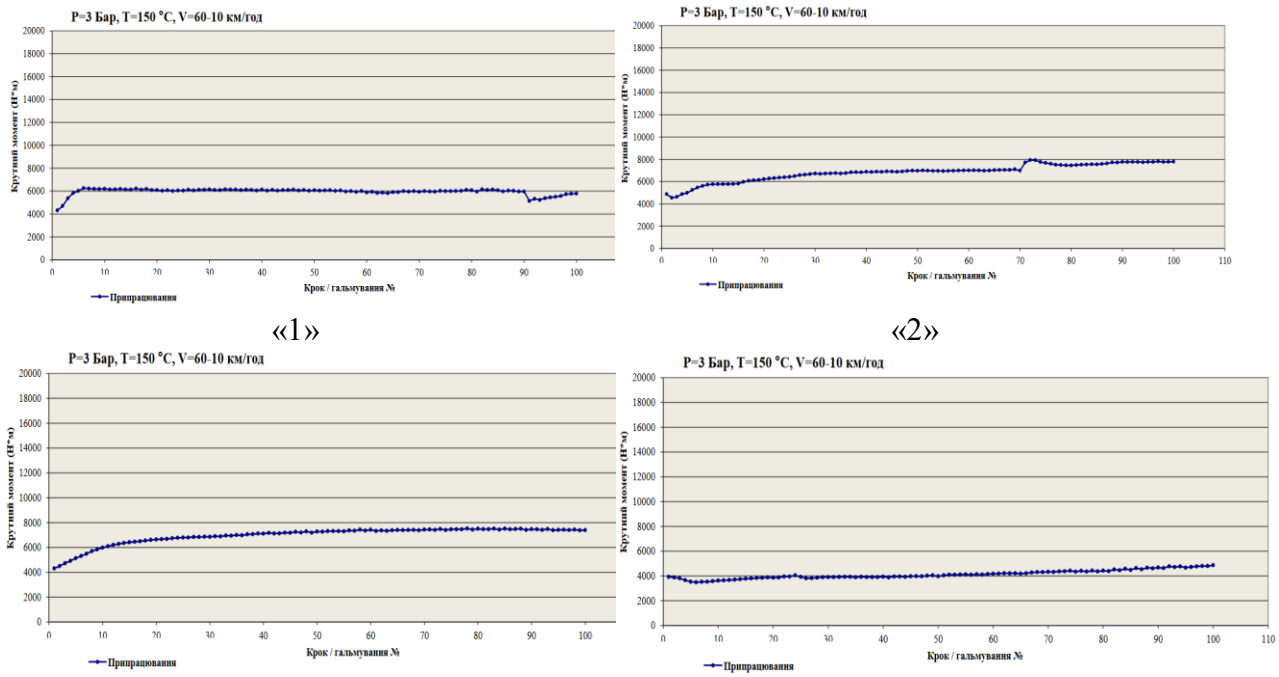
а б

Рис. 3. Контакт нової удосконаленої колодки та зношеного диска: а) контакт традиційної колодки та зношеного диска б) контакт удосконаленої колодки та зношеного диска

Джерело: складено автором

Таким чином гальмівні колодки з покрашеною геометрією у вигляді скошеного (краю-конуса) можуть стати ідеальним варіантом для встановлення на гальмівні диски що були у використанні.

Для перевірки ефективності роботи гальмівної колодки 2ТР-114 Тр108 R3 було проведено низку тестів запропонованого зразка «1» та трьох інших («2», «3» та «4») зразків гальмівних колодок. Випробування проводилося на інерційному динамометричному стенді TecSA TTR2600 ТОВ «БЦЗ«Трібо» згідно ISO 26866:2009 і складалося з низки тестів (на припрацювання, на залежність ефективності гальмувань при зміні температур та швидкості руху)



«1» «2»

«3» «4»

Рис. 4. Результати тестування, у фазі припрацювання

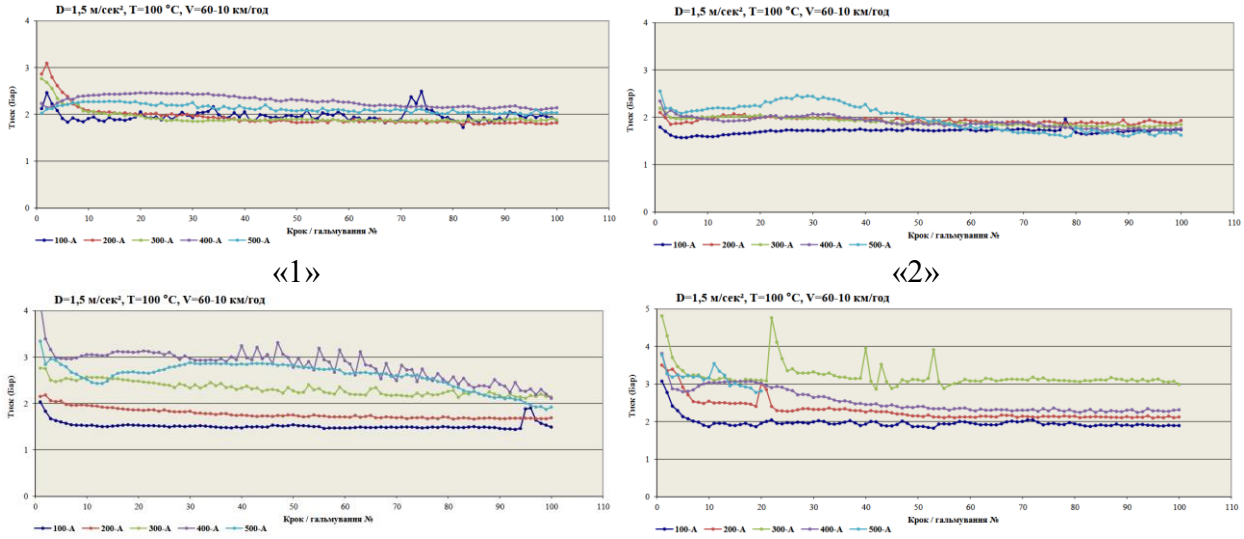
Джерело: складено автором на основі протоколів випробувань

Тест на припрацювання колодок до диску. Під час припрацювання колодки не тільки набувають форми поверхні гальмівного диска, але й іншої хімічної структури, яка дуже важлива для її нормальної роботи. При неправильному притиранні колодки до диску можливе утворення глянсового шару або руйнування фрикційної маси через перегрівання.

За результатами тестування, у фазі припрацювання (рис. 4) найвищий гальмівний момент показав зразок «2» (700-800 н×м). Зразки «1» та «3» теж показали хороший результат – гальмівний момент 600 і 700 н×м відповідно. Стосовно показників зразка «4» то гальмівний момент низький і лише після 80 гальмування долає позначку 400 н×м. Щодо виходу на стабільний гальмівний момент то тут слід відзначити, що зразок «4» досягає свого невисокого гальмівного моменту одразу з першого гальмування. Зразку «1» для виходу на стабільне «плато» знадобилося 6-8 гальмувань. Зразки «2» та «3» притираються повільно, їм для виходу на стабільний гальмівний момент потрібно близько 20 гальмувань. Це може свідчить про переваги зразка «1», у вигляді скошеного (краю-конуса)), що сприяють бистрому притиранню нових колодок до диску при їх заміні.

2. Тест на залежність ефективності гальмувань при зміні температур та швидкості руху.

а) зносні гальмування на швидкості 10-60 км/год (рис. 5) показують, що збільшення температури погіршує ефективність гальмівних колодок через зменшення тертя та підвищення зносу.



«1» «2»

«3» «4»

Рис. 5. Результати зносних гальмувань на швидкості 10-60 км/год
Джерело: складено автором на основі протоколів випробувань

За результатами тестування зразок «1» показав помірну стійкість системи до підвищення температури, але з втратами ефективності на початку роботи (перші 10 гальмувань спостерігається різке зниження ефективності, особливо за високих температур). Далі ефективність стабілізується і залежить від температури (за високих температур 300-400° ефективність знову погіршується).

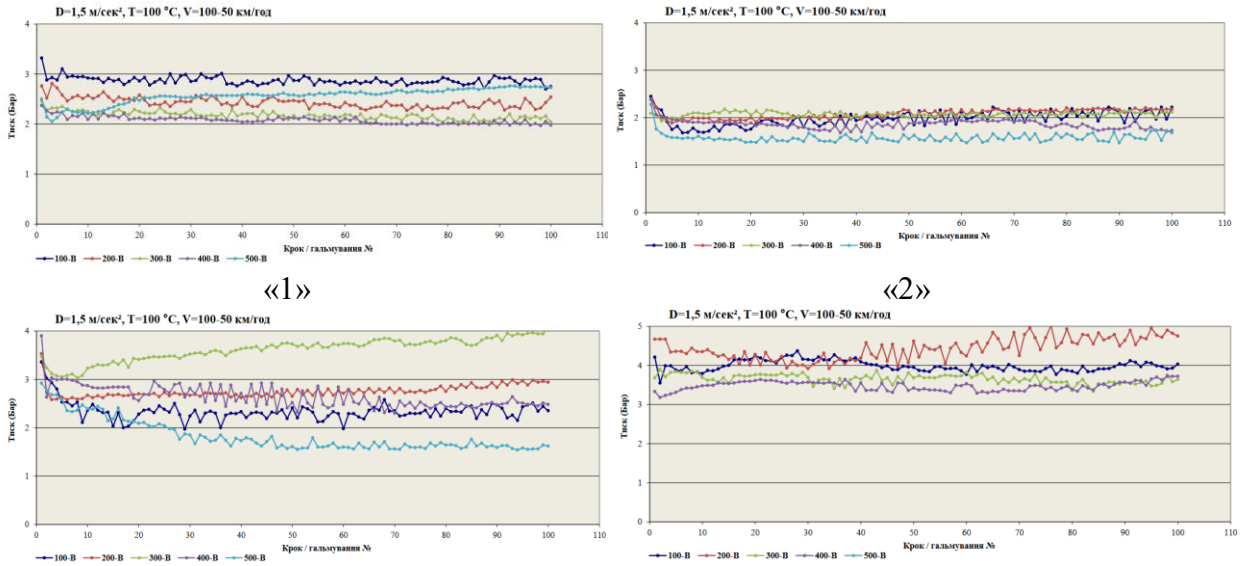
Ефективність зразка «2» виявилася найкращою. Знос колодок, а отже, і втрата ефективності, зростає повільніше ніж у інших зразків, навіть за високих температур. Температура в цьому випадку не так сильно впливає на деградацію матеріалу колодки, що вказує на високу термостійкість зразка.

Для зразка «3» характерні помітні коливання ефективності при високих температурах, особливо ближче до середини та кінця експлуатації. Втрата ефективності посилюється з часом, що може бути наслідком зношування матеріалу через нагрівання. За низьких температур ефективність більш стабільна, що свідчить про чутливість зразка до нагріву та швидкості.

У зразка «4» вже на початкових етапах спостерігається суттєва втрата ефективності, особливо за високих температур. Ефективність зразка нестабільна і зменшується до кінця випробувань. Висока температура сильно впливає на матеріал, що знижує його стійкість і ефективність.

Отже тест на зносні гальмування при швидкості 10-60 км/год засвідчив, що найкращі показники спостерігаються у зразка «2», а найбільш негативно підвищення температури вплинуло на зразки «3» та «4», які демонструють нестабільність і високі втрати ефективності. Зразок «1» показав середні значення.

б) зносні гальмування на швидкості 50-100 км/год (рис. 6) засвідчують, що температура нагрівання у поєднанні із зростанням швидкості суттєво впливає на характеристики колодок, викликаючи термічну деградацію менш стійких матеріалів.



«1» «2»

«3» «4»

Рис. 6. Результати зносних гальмувань на швидкості 10-60 км/год
Джерело: складено автором на основі протоколів випробувань

За результатами випробувань при збільшенні швидкості зразок «1» показав стабільні результати у всіх температурних діапазонах. За температури 400 °С спостерігається ріст гальмівного моменту, який пов'язаний з окисненям сульфідів, що використовувалися при виготовленні колодки. Просадка гальмівного моменту після 500 °С, в порівнянні з початковими фазами не суттєва, що свідчить про те що колодку можна безпечно використовувати навіть за таких високих температур.

Зразок «2» теж підтвердив свою високу ефективність. Він має досить стабільний гальмівний момент протягом всього тесту. Добре витримав вплив температури 500°С і не втратив ефективності.

Зразок «3» показав хороші результати за невисоких температур – 100-200°С та добре витримав вплив найбільшої температури 500°С за яких не втратив ефективності. При температурах 300-400°С з'являються варіації, ріст і падіння ефективності.

Зразок «4» показав найнижчі, найбільш нестабільні результати. Колодка не витримує підвищення температур. Відсутній гальмівний момент після підвищення

температури до 500°С, бо на фазі 500°С колодка зносилася остаточно. Таку колодку використовувати може бути небезпечно.

Отже тест на зносні гальмування при підвищенні швидкості до 50-100 км/год підтвердив попередні висновки. Найкращі показники та стабільні демонструють зразки «2» та «1», а найбільш негативно підвищення температури вплинуло на зразок «4», які не тільки втратив ефективність, але й був зруйнований при температурі 500°С.

Загалом зазначаємо, що запропонований зразок удосконаленої гальмівної колодки 2ТР-114 Тр108 R3, що має більш досконалу геометрію у вигляді скошеного (краю-конуса) й додатковий адаптаційний шар успішно пройшов випробування і у порівнянні із іншими трьома зразками показав гарні результати.

Такі колодки рекомендуються для встановлення на вантажні автомобілі з підвищеним тоннажем та на ті автомобілі, що активно експлуатуються в місцевості з із пересіченим рельєфом, а також при заміні колодок при сервісному обслуговуванні.

Висновки

1. Гальмівні системи є важливими механізмами, що забезпечують безпеку руху автотранспортних засобів. Вони мають складну структуру та підпорядковані силам тертя, які виникають між гальмівним диском та колодкою при гальмуванні, що призводять до їх передчасного зносу. Процес зносу гальмівних колодок є поступовою, нелінійною і нестаціонарною системою, що змінюється в часі та не має фіксованого життєвого циклу і який важко передбачити. У багатьох випадках він залежить від конструктивних особливостей та матеріалів з яких вироблені гальмівні колодки.

2. В роботі досліджено ефективність роботи удосконаленої гальмівної колодки 2ТР-114 Тр108 R3 за різних температурних режимів та проведено порівняння її показників із трьома іншими зразками гальмівних колодок, які використовуються у автотранспортних засобах України.

3. Результати тестів засвідчили, що запропонований зразок гальмівної колодки 2ТР-114 Тр108 R3, що має більш досконалу геометрію у вигляді скошеного (краю-конуса), який гасить вібрації та попереджає можливе руйнування фрикціону на початку робочого циклу й додатковий адаптаційний шар, що сприяє швидкому припрацюванню колодки до гальмівного диска успішно пройшов випробування і у порівнянні із іншими трьома зразками показав гарні результати (у тестах на ефективність гальмування зі зміною температур та швидкості показав стабільне 2 місце) поступаючись за окремими показниками лише зразку «2». Причому у тесті на припрацювання для виходу на стабільний гальмівний момент йому знадобилося найменша кількість (близько 20) гальмувань, що свідчить про переваги запропонованого зразка у бистрому притиранні нових колодок до диску при їх заміні, що може бути використано при сервісному обслуговуванні автотранспортних засобів.

Список використаних джерел

1. Бевз О. В., Магопець С. О., Матвієнко О. О. Дослідження характеристик гальмівного механізму автомобіля Hyundai Accent. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. Кропивницький. ЦНТУ. 2019. Вип. 1 (32). С. 68–78.

2. Arman M., Singhal S., Chopra P., Sarkar M. A review on material and wear analysis of automotive Break Pad. Materials Today Proceedings. 2018. Vol. 5(14-2). P. 28305–28312. Doi: 10.1016/j.matpr.2018.10.114.

3. Belhocine A., Bouchetara M. Temperature and thermal stresses of vehicles gray cast brake. Journal of applied research and technology. 2013. Vol. 11. P. 674–682. 10.1016/S1665-6423(13)71575-X.

4. Blau P.J. Compositions, functions, and testing of friction brake materials and their additives. Energy. 2001. Vol. 27. P. 38.

5. Carlevaris D., Leonardi M., Straffelini G., Gialanella S. Design of a friction material for brake pads based on rice husk and its derivatives. Wear. 2023. Vol. 526-527. P. 204893. Doi: 10.1016/j.wear.2023.204893.

6. Deng P., Li P., Xiao P., Li Z., Li J., Chen P., Liu P., Li F. Oxidation behaviour of C/C–SiC brake discs tested on full-scale bench rig, Ceramics International. 2021. Vol. 47. Issue 24. P. 34783–34793.

7. Gautier di Confiengo G., Faga M.G. Ecological transition in the field of brake pad manufacturing: an overview of the potential green constituents. Sustainability. 2022. Vol. 14. P. 2508. doi: 10.3390/su14052508.

8. Ige O.E., Freddie I.L., Adewumi G. Biomass-based composites for brake pads: a review. International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2019. Vol. 10(3). P. 920–943. http://www.iaeme.com/IJMET/issues.asp?JType=IJMET&VType=10&IType=3.

9. Irawan A.P., Fitriyana D.F., Tezara C., Siregar J.P., Laksmidewi D., Baskara G.D., Abdullah M.Z., Junid R., Had A.E., Hamdan M.H.M. Overview of the important factors influencing the performance of eco-friendly brake pads. Polymers. 2022. Vol. 14. P. 1180. doi: 10.3390/polym14061180.

10. Kindrachuk M., Volchenko D., Fidrovska N., Dukhota O., Zhuravlev D., Ostashuk M., Porokhovskyi Y., Kharchenko V. Wear-friction properties of friction pairs in disc-pad brakes. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2023. Vol. 4(12 (124). P. 56–61. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.285699.

11. Kim J. W., Joo B. S., Jang H. The effect of contact area on velocity weakening of the friction coefficient and friction instability: A case study on brake friction materials, Tribology International. 2019. Vol. 135. P. 38–45.

12. Kumar V.V., Selvaraj S.K. Friction material composite: types of brake friction material formulations and effects of various ingredients on brake performance-a review. Materials Research Express. 2019. Vol. 6. P. 2404. doi: 10.1088/2053-1591/ab2404.

13. Motta M., Fedrizzi L., Andreatta F. Corrosion Stiction in Automotive Braking Systems. Materials. 2023. Vol. 16. P. 3710. https://doi.org/10.3390/ma16103710.

14. Mulani S.M., Kumar A., Shaikh H.N.A., Saurabh A., Singh P. K., Piyush Verma C. A review on recent development and challenges in automotive brake pad-disc system, Materials Today: Proceedings. 2022. Vol. 56. Part 1. P. 447–454.

15. Nogueira A.P.G., Bagolan P., Leonardi M., Gialanella S., Straffelini G. The role of scorching treatment on the wear and emission behavior of friction materials with and without copper. Wear. 2020. Vol. 460-461. P. 203480.

16. Soundarrajan K., Varthanan P. A., Devanand A., Balaji M. V., Nandha P.S., Sivaraman S. Automotive brake pad by using functionally graded hybrid composites and their behaviour. International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2018. Vol. 9. P. 318–328.

17. Sinha A., Ischia G., Menapace C., Gialanella S. Experimental characterization protocols for wear products from disc brake materials. Atmosphere. 2020. Vol. 11. P. 1102. doi: 10.3390/atmos11101102.

18. Straffelini G. Friction and wear, methodologies for design and control. Springer International Publishing: Berlin/Heidelberg, Germany. 2015. 296 p.

19. Wahlström J., Leonardi M., Tu M., Lyu Y., Perricone G., Gialanella S., Olofsson U. A study of the effect of brake pad scorching on tribology and airborne particle emissions. Atmosphere. 2020. Vol. 11. P. 488. https://doi.org/10.3390/atmos11050488.

20. Wang S., Yu Z., Wang J., Chen S. Research on CNN-LSTM brake pad wear condition monitoring based on gto multi-objective optimization. Actuators. 2023. Vol. 12. P. 301. https://doi.org/10.3390/act12070301.

21. Wei L., Choy Y.S., Cheung C.S. A study of brake contact pairs under different friction conditions with respect to characteristics of brake pad surfaces, Tribology International. 2019. Vol. 138. P. 99–110.

References

1. Bevz O. V., Magopets S. O., Matvienko O. O. (2019). Research on the characteristics of the braking mechanism of the Hyundai Accent car. Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences: scientific collection. Kropyvnytskyi: TsNTU. Issue 1 (32). P. 68–78.

2. Arman M., Singhal S., Chopra P., Sarkar M. (2018). A review on material and wear analysis of automotive Break Pad. Materials Today Proceedings. Vol. 5(14-2). P. 28305–28312. Doi: 10.1016/j.matpr.2018.10.114.

3. Belhocine A., Bouchetara M. (2013). Temperature and thermal stresses of vehicles gray cast brake. Journal of applied research and technology. Vol. 11. P. 674–682. 10.1016/S1665-6423(13)71575-X.

4. Blau P.J. (2001). Compositions, functions, and testing of friction brake materials and their additives. Energy. Vol. 27. P. 38.

5. Carlevaris D., Leonardi M., Straffelini G., Gialanella S. (2023). Design of a friction material for brake pads based on rice husk and its derivatives. Wear. Vol. 526-527. P. 204893. Doi: 10.1016/j.wear.2023.204893.

6. Deng P., Li P., Xiao P., Li Z., Li J., Chen P., Liu P., Li F. (2021). Oxidation behaviour of C/C–SiC brake discs tested on full-scale bench rig, Ceramics International. Vol. 47. Issue 24. P. 34783–34793.

7. Gautier di Confiengo G., Faga M.G. (2022). Ecological transition in the field of brake pad manufacturing: an overview of the potential green constituents. Sustainability. Vol. 14. P. 2508. doi: 10.3390/su14052508.

8. Ige O.E., Freddie I.L., Adewumi G. (2019). Biomass-based composites for brake pads: a review. International Journal of Mechanical Engineering and Technology. Vol. 10(3). P. 920–943. http://www.iaeme.com/IJMET/issues.asp?JType=IJMET&VType=10&IType=3.

9. Irawan A.P., Fitriyana D.F., Tezara C., Siregar J.P., Laksmidewi D., Baskara G.D., Abdullah M.Z., Junid R., Had A.E., Hamdan M.H.M. (2022). Overview of the important factors influencing the performance of eco-friendly brake pads. Polymers. Vol. 14. P. 1180. doi: 10.3390/polym14061180.

10. Kindrachuk M., Volchenko D., Fidrovska N., Dukhota O., Zhuravlev D., Ostashuk M., Porokhovskyi Y., Kharchenko V. (2023). Wear-friction properties of friction pairs in disc-pad brakes. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 4(12 (124). P. 56–61. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.285699.

11. Kim J. W., Joo B. S., Jang H. (2019). The effect of contact area on velocity weakening of the friction coefficient and friction instability: A case study on brake friction materials, Tribology International. Vol. 135. P. 38–45.

12. Kumar V.V., Selvaraj S.K. (2019). Friction material composite: types of brake friction material formulations and effects of various ingredients on brake performance-a review. Materials Research Express. Vol. 6. P. 2404. doi: 10.1088/2053-1591/ab2404.

13. Motta M., Fedrizzi L., Andreatta F. Corrosion Stiction in Automotive Braking Systems. Materials. 2023. Vol. 16. P. 3710. https://doi.org/10.3390/ma16103710.

14. Mulani S.M., Kumar A., Shaikh H.N.A., Saurabh A., Singh P. K., Piyush Verma C. (2022). A review on recent development and challenges in automotive brake pad-disc system, Materials Today: Proceedings. Vol. 56. Part 1. P. 447–454.

15. Nogueira A.P.G., Bagolan P., Leonardi M., Gialanella S., Straffelini G. (2020). The role of scorching treatment on the wear and emission behavior of friction materials with and without copper. Wear. Vol. 460-461. P. 203480.

16. Soundarrajan K., Varthanan P. A., Devanand A., Balaji M. V., Nandha P.S., Sivaraman S. (2018). Automotive brake pad by using functionally graded hybrid composites and their behaviour. International Journal of Mechanical Engineering and Technology. Vol. 9. P. 318–328.

17. Sinha A., Ischia G., Menapace C., Gialanella S. (2020). Experimental characterization protocols for wear products from disc brake materials. Atmosphere. Vol. 11. P. 1102. doi: 10.3390/atmos11101102.

18. Straffelini G. (2015). Friction and wear, methodologies for design and control. Springer International Publishing: Berlin/Heidelberg, Germany. 296 p.

19. Wahlström J., Leonardi M., Tu M., Lyu Y., Perricone G., Gialanella S., Olofsson U. (2020). A study of the effect of brake pad scorching on tribology and airborne particle emissions. Atmosphere. Vol. 11. P. 488. https://doi.org/10.3390/atmos11050488.

20. 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.

21. 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.

Шатров Р.В.,
Войтюк В.Д.
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна
E-mail: ruslanshatrov@ukr.net

ТЕСТОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ СХЕМ РОЗТАШУВАННЯ ТАРИ З ЯБЛУКАМИ В КУЗОВІ АВТОМОБІЛЯ

https://doi.org/10.37700/ts.2024.25.219-228

УДК 629.3.016:629.3.018.7

Шатров Р.В., Войтюк В.Д. ***Тестові дослідження схем розташування тари з яблуками в кузові автомобіля.***

Анотація. *В статті розкрито особливості методичного обґрунтування тестових досліджень схем розташування тари з яблуками в кузові автомобіля. В результаті теоретичного дослідження були встановлені фактори зовнішнього та внутрішнього оточення, що впливають на параметри тривалості перевезення та ушкодження сільськогосподарського вантажу. Запропоновано математичну модель, яка описує перевезення вантажів від кількох постачальників до кількох споживачів з урахуванням погодних та дорожніх умов. Для практичної перевірки висновків теоретичного дослідження були застосовані загальна та приватні методики дослідження. Загальна методика дослідження базується на національних та міжнародних стандартах та технічних умовах щодо правил приймання, методів визначення якості, упаковки, транспортування, які поширюються на плодоовочеву продукцію загалом та яблука зокрема.*

Ключові слова: *автомобіль, кузов, експлуатація, яблуко, тара.*

Shatrov R.V., Voytyuk V.D. ***Test studies of layout of container with apples in body of car.***

Abstract. *The article reveals the features of methodological substantiation of analytical studies of the layout of the container with apples in the body of the car. The theoretical study established factors of the external and internal environment that affect the parameters of the duration of transportation and damage to agricultural cargo. A mathematical model is proposed that describes the carriage of goods from several suppliers to several consumers, taking into account weather and road conditions. General and private research methods were applied to practically verify the conclusions of the theoretical research. The general methodology of research is based on national and international standards and technical conditions on acceptance rules, methods of determination of quality, packaging, transportation, which apply to fruit and vegetable products in general and apples in particular.*

Key words: *car, body, operation, apple, container.*

Постановка проблеми

Продовольча безпека, яка полягає у можливості та здатності держави забезпечити населення у продуктах харчування, є одним із основних індикаторів економічної безпеки країни. Забезпечується продовольча безпека виключно у вигляді

розвитку сільськогосподарського виробництва – основний галузі економіки [1].

Сільськогосподарське виробництво є складним агропромисловим процесом. Сучасний розвиток сільського господарства дозволяє віднести його до складної соціально-економічної системи, що складається з багатьох підсистем, ключовою підсистемою якої є матеріально-технічна база. Основу цієї підсистеми становлять транспортні засоби та транспортна інфраструктура.

Технічний прогрес у сільському господарстві за останні роки все більше призводить до об'єднання транспортних засобів та інших сільськогосподарських машин у єдиний виробничий процес. Чим вище рівень розвитку, тим більше можливостей для розробки та впровадження досконалих машин та знарядь праці, а, отже, і для підвищення ефективності сільськогосподарського виробництва. Процес виробництва сільськогосподарської продукції протікає в різних природно-економічних умовах, що впливають на технологію та організацію виробництва. Все це викликає необхідність наявності в сільському господарстві кілька різнорідних типів і систем машин, до однієї з них належить вантажний автотранспорт.

Постійне і неухильне зростання обсягу виробленої в нашій країні сільськогосподарської продукції, що спостерігається (при цьому обсяг продукції тваринництва збільшився майже вдвічі, а рослинництва – втричі), вимагає нових підходів до вирішення транспортних проблем, а саме тих, що стосуються перевезення сільськогосподарської продукції [2].

Питання безпеки дорожнього руху в частині транспортування сільськогосподарської продукції, у тому числі плодоовочевої продукції, що легко ушкоджується, та використання технологій GPS в управлінні автомобільним транспортом, а також підвищення ефективності експлуатації автотранспорту та мобільної сільськогосподарської техніки відображені в роботах.

Енергетичний аналіз циклу коливань, ефективності, вибору оптимальних параметрів підвіски автомобіля, що забезпечують його активну безпеку за різних умов руху, а також алгоритми вибору технологічної доставки різних вантажів розглянуті на роботах.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Зміни фізико-механічних властивостей плодоовочевої продукції, що виникають у процесі транспортування, присвячені роботи вітчизняних та зарубіжних дослідників, таких як [3].

Однією з детермінант, які впливають пошкодження сільськогосподарської продукції, є прискорення, що виникає під час руху автотранспортного засобу.

У роботі [4] були запропоновані емпіричні коефіцієнти, що визначають допустимі величини прискорень, що виникають при коливаннях по відношенню до різних культур плодоовочевої продукції (таблиця 1).

У багатьох дослідженнях розглядається створення оптимального парку машин та розробки методів ефективного їх використання, проте практично не порушуються питання оцінки ушкоджуваності сільськогосподарських вантажів при перевезенні дорогами з різним покриттям та формування тарифів перевезень з урахуванням погодних умов та дорожнього покриття [5].

До матеріально-технічної бази відносять транспортні засоби та дороги. Ринок капітального блага та послуг капітального блага, до якого належить і автомобільна техніка, перебуває у стані спаду.

Зростаючі ціни на ПММ, запасні частини, автотранспорт, низька якість доріг значно впливають на збільшення собівартості перевезень. Питома вага (загалом)

транспортних витрат збільшується. Транспорт стає визначальним детермінантом конкуренції у сільськогосподарській галузі.

Таблиця 1

Коефіцієнти, що визначають допустиму амплітуду коливань ТЗ

Культура та стан її зрілості	Емпіричні коефіцієнти	
	H, м/с^2	P, м/с
Яблука	0,3 ... 1,42	5,03 ... 5,22
Помідори червоні	2,83 ... 4,3	5,46 ... 5,70
Помідори зелені	4,24 ... 7,0	5,70 ... 6,16
Картопля свіжоприбрана	5,62 ... 7,0	5,93 ... 6,16
Дині та гарбузи	5,62 ... 8,38	5,93 ... 6,38
Слива	5,62 ... 11,14	5,93 ... 6,83

У таких умовах раціональне використання автомобільного транспорту відіграє визначальну роль і набуває особливої значущості [6].

Розглянемо деякі із цих проблем докладніше. Ефективність використання автотранспорту. Витрати на переміщення вантажів повинні визначатися за всіма етапами переміщення від затарювання до розвантаження та складування. Основа визначення ефективності базується на фундаментальних дослідженнях у галузі визначення ефективності виробництва. Ефективність використання автомобільного транспорту визначатиметься співвідношеннями ефекту із витратами матеріально-технічних засобів і праці, тобто. обсягу перевезень вантажів та витрат на їх переміщення. Ключовими показниками у разі є собівартість перевезення одиниці вантажу чи одиниці вантажообігу [7].

Особливості організації транспортних работ. У процесі організації сільськогосподарського виробництва необхідно враховувати особливості організації транспортних робіт, які є досить різноманітними і специфічними. Крім особливостей сільськогосподарських вантажів та нерівномірності (сезонності) перевезень протягом року вони включають необхідну взаємодію транспортних засобів з іншою, спеціальною, технікою; багаторазовість перевезень у процесі виробництва; різний діапазон відстаней перевезень та ін.

Проблема оперативного управління транспортним парком знайома всім самостійним суб'єктам господарювання. Відсутність грамотних планів призводить до простою автомобільної та спеціальної техніки, людських ресурсів і, як наслідок, значних втрат урожаю. Для її вирішення необхідно розробляти заходи щодо складання планів, де будуть відображені основні складові всього виробничого процесу від роботи індивідуально кожної одиниці техніки, кожного водія до роботи збиральної та транспортної техніки у злагодженому механізмі [8].

Викладені проблеми та їх вирішення є основою для формування комплексного міжгалузевого підходу для підвищення ефективності якості роботи автомобільного транспорту в сільському господарстві.

Формулювання мети досліджень

Метою дослідження є методичне обґрунтування аналітичних досліджень схем розташування тари з яблуками в кузові автомобіля.

Методичний підхід в проведенні досліджень

В результаті теоретичного дослідження були встановлені фактори зовнішнього та внутрішнього оточення, що впливають на параметри тривалості перевезення та ушкодження сільськогосподарського вантажу. Запропоновано математичну модель, яка описує перевезення вантажів від кількох постачальників до кількох споживачів з урахуванням погодних та дорожніх умов.

Для практичної перевірки висновків теоретичного дослідження були застосовані загальна та приватні методики дослідження.

Яблука, що відносяться до кожного товарного сорта повинні мати такі властивості: цілісність; розвиненість; чистота; відсутність зайвої вологості; відсутність стороннього запаху та присмаку.

Яблука кожного сорту повинні відповідати нормам і вимогам, регламентованим, за показниками: зовнішній вигляд, розмір плодів по найбільшому поперечному діаметру, зрілість, відхилення, що допускаються: механічні пошкодження в місцях заготівлі, в місцях призначення; пошкодження шкідниками та хворобами [24].

Правила приймання визначають партії – кількість яблук одного товарного та помологічного сорту. Партія упакована у певну тару, яка має бути одного виду та типу розміру. Партія оформляється одним документом за формою, затвердженою в установленому порядку. Допускається оформлення одним документом кількох партій за умови їх доставки одним транспортним засобом.

При прийманні яблук допускаються такі нормативи: у першому сорті не більше 5% плодів другого товарного сорту, у другому сорті - не більше 5% плодів, що не відповідають вимогам цього сорту, але придатні для споживання у свіжому вигляді.

Методи визначення якості. За допомогою вибіркового спостереження відбираються на перевірку із ящиків точкові проби (знизу, зверху, із середини). Вибіркова сукупність не повинна бути меншою за 25% маси яблук у вибірці, при цьому маса кожної точкової проби не повинна бути меншою за 1 кг. При зважуванні допускається похибка трохи більше 0,1 кг.

До упаковки, транспортування, маркування та зберігання також висуваються особливі вимоги. Для транспортування плодоовочеву продукцію, зокрема яблука, упаковують у ящики. визначає вимоги до дощатих, гратчастих, а також з листових та деревних матеріалів нерозбірним ящикам.

Відповідно до технічних вимог яблука перевозять усіма видами критих транспортних засобів (допускається перевезення у відкритих транспортних засобах, виняток становлять вагони, за умови дотримання температурного режиму - температура не повинна опускатися нижче 0°С). При транспортуванні необхідне дотримання вимог і правил перевезення вантажів, що швидко псуються, які діють на кожному виді транспорту. Допускається транспортування яблук транспортними пакетами.

В рамках вищеописаного підходу було проведено експериментальні дослідження оцінки прискорень при перевезеннях сільськогосподарських вантажів на різних типах доріг. Для чого використовувався автомобіль «Форд Транзит» (рисунок 1), який часто використовується у фермерських господарствах для перевезення невеликих партій вантажів.

Ящик з яблуками встановлювався у трьох позиціях – по діагоналі кузова автомобіля – для оцінки впливу коливань, що передаються з дорожнього полотна через підвіску автомобіля, на розташування вантажу у кузові (рис. 2).

Для проведення дослідів обрано дороги з трьома типами покриття – асфальт, щебінь та ґрунт (рисунок 3).

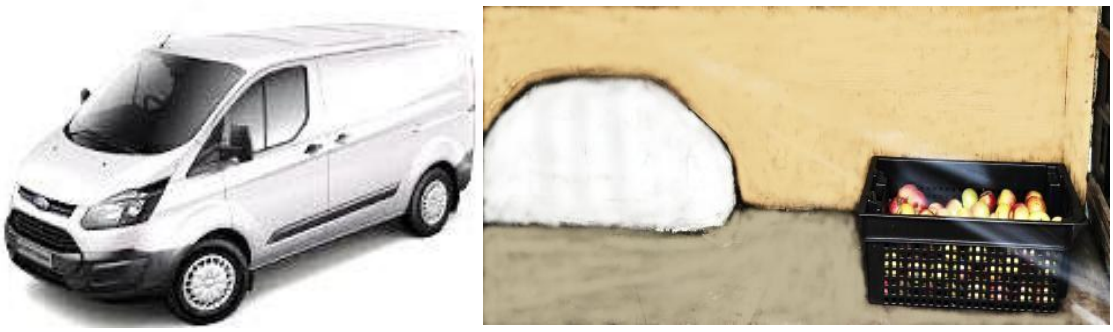


Рис. 1. Автомобіль із встановленим у його кузові ящиками з яблуками.

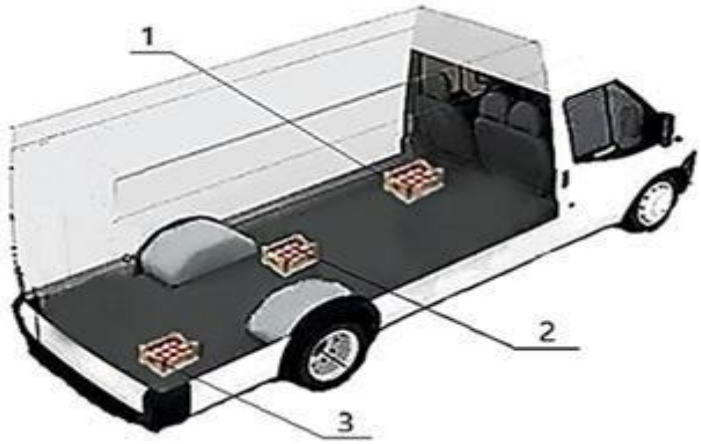


Рис. 2. Варіанти розташування ящика з яблуками у кузові автомобіля



Рис. 3. Дороги, що використовуються при проведенні експериментів: а – асфальт; б - ґрунт; в – щебінь

Швидкість автомобіля була встановлена в діапазоні 10...50 км/год (для асфальту – максимум, для двох інших покриттів – мінімум). Час проведення експериментів – березень, котрим характерна порівняно висока «розбитість» дорожнього покриття.

Для реєстрації коливань використовувалося програмне забезпечення: "Вимірювач вібрації 1.3.6 APK for Android" для смартфона. "Вимірник вібрації VibSensor Apk" Версія: 2.1.1 для смартфона. Акселерометр програми Dynamic Signal Analyzer – VR Mobile. Додаток «Вимірювач вібрації 1.3.6 APK for Android» для смартфону дозволяє вимірювати вібрацію, у тому числі землетрусу, вібрацію людського тіла або будь-яких інших об'єктів (рисунок 4), при цьому для запису та аналізу результатів вимірювань використовується акселерометр смартфона. Графік представляє запис прискорення у вигляді функції часу за трьома декартовими осями, де вісь z перпендикулярна поверхні Землі, а осі x і y паралельні поверхні.

Результати досліджень

За допомогою програмного продукту "Вимірник вібрації 1.3.6 APK for Android" для смартфона були проведені вимірювання вібрації при перевезенні яблук по дорогах з покриттями ґрунт, асфальт, щебінь. Швидкість автомобіля становила 10-15 км/год. На рисунках 4 – 6 послідовно представлені фото екрану вимірювача вібрації під час руху дорогою з покриттям «щебінь», «асфальт» та «грунт».

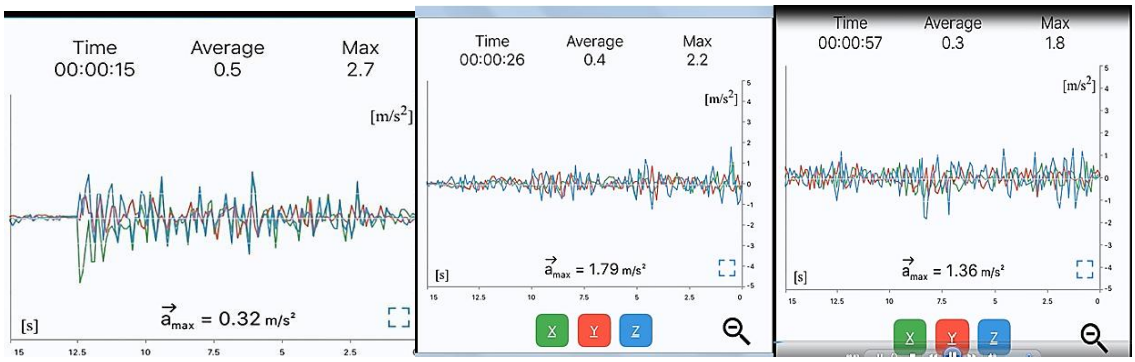


Рис. 4. Фото екрану вимірювача вібрації під час руху по дорозі з покриттям «щебінь» зі швидкістю 10-15 км/год

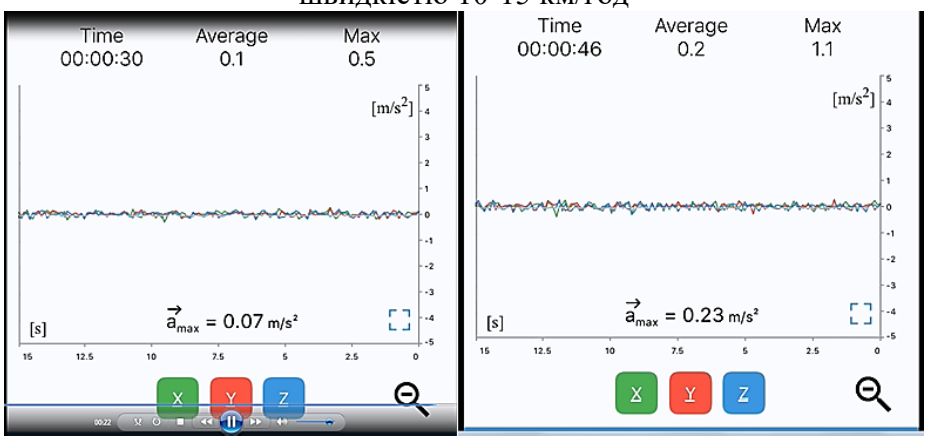


Рис. 5. Фото екрану вимірювача вібрації під час руху по дорозі з покриттям «асфальт» зі швидкістю 10-15 км/год

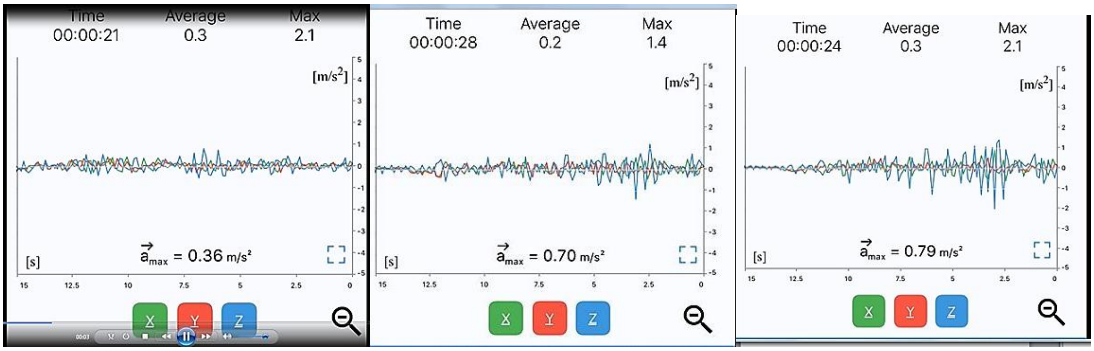


Рис. 6. Фото екрану вимірювача вібрації під час руху по дорозі з покриттям «грунт» зі швидкістю 10-15 км/год.

Результати вимірювань прискорення для типових ділянок трьох доріг по кожній осі координат x,y,z (послідовно) представлені на рисунку 7.

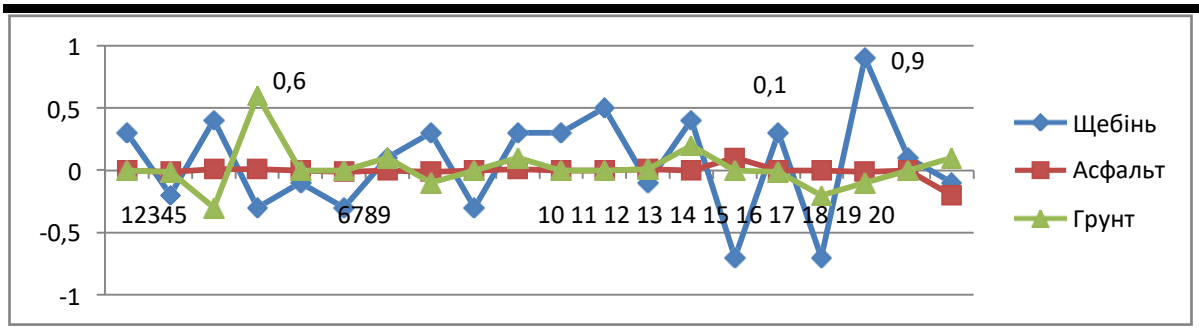


Рис. 7. Значення прискорень по осі x (вздовж поздовжньої осі автомобіля)

Аналіз значень отриманих результатів дозволяє зробити такі висновки.

Найбільші значення прискорень характерні для дороги, покритої щебенем, причому по всіх трьох осях координат. Ймовірно, це пов'язано з великими фракціями щебеню, які періодично потрапляють під колеса автомобіля. При цьому найбільші прискорення (до 1,2 м/с^2) вантажу зареєстровані у вертикальній площині, що найбільш несприятливо з точки зору псування плодів при їх транспортуванні.

Близькі значення прискорень демонструє дорога з ґрунтовим покриттям – до 83% від максимальних значень для дороги із щебеневим покриттям, що може бути пов'язане з досить великими нерівностями (ями та вибоїни).

Асфальтоване покриття дозволяє рухатися автомобілю з більшою швидкістю, при цьому з нижчими значеннями прискорень – до 11% від максимальних значень дороги зі щебеневим покриттям.

Для всіх трьох типів покриттів характерні асинхронні коливання вантажу за всіма трьома координатами, причому для ґрунтової дороги – прискорення по осях не мають яскраво вираженого превалювання; для щебеневого покриття максимальні прискорення, переважно, відповідають вертикальної осі; для асфальта зустрічаються "стрибки" вздовж поздовжньої осі автомобіля. Використовуючи отримані результати, слід скоригувати допустимі значення прискорень, у разі для яблук, знизивши їх із 1,42 м/с^2 (таблиця 1) до 0,7…1,0 м/с^2, беручи до уваги коливання вантажу за всіма трьома координатами, і ввести заборону на їх транспортування ґрунтовими дорогами в період дощів і осінньо-весняного бездоріжжя, а також дорогами з щебеневим покриттям, перебувають у незадовільному стані. Максимальні значення прискорення (0,2 м/с^2) для асфальту дозволяють рекомендувати його «всепогодно» та з вищою швидкістю транспортного засобу.



Рис. 8. Облік зміни тарифу вантажоперевезення залежно від типу та стану покриття дороги

Таким чином, можна встановити обмеження на тариф під час руху транспортних засобів з урахуванням стану покриття дороги (рис. 8).

У процесі руху водій транспортного засобу повинен мати цілісну картину того, що відбувається для прийняття іноді єдиного правильного рішення у разі виникнення позаштатної ситуації. Сучасні вантажні автомобілі оснащуються виробниками різними датчиками та сенсорами, а також використовують пристрої супутникової навігації. Наявність спеціалізованих програм для смартфонів, а також ряду спеціалізованих пристроїв для визначення рівня вібрації може вчасно вплинути на прийняття рішення водієм, а також скоригувати маршрут перевезення та швидкісний режим.

Програмний продукт «Вимірник вібрації 1.3.6 АРК» дозволяє фіксувати зміну прискорення у трьох взаємно перпендикулярних площинах – приклад характерної зміни вимірювання прискорення осі «х» наведено на рисунку 9. Площа кожної фігури – твір прискорення на якийсь час – дозволяє обчислити швидкість v на конкретній ділянці руху (реєстрації прискорення). Середня швидкість на ділянках вимірювання, отримаємо середню швидкість руху яблука за весь час вимірювання.

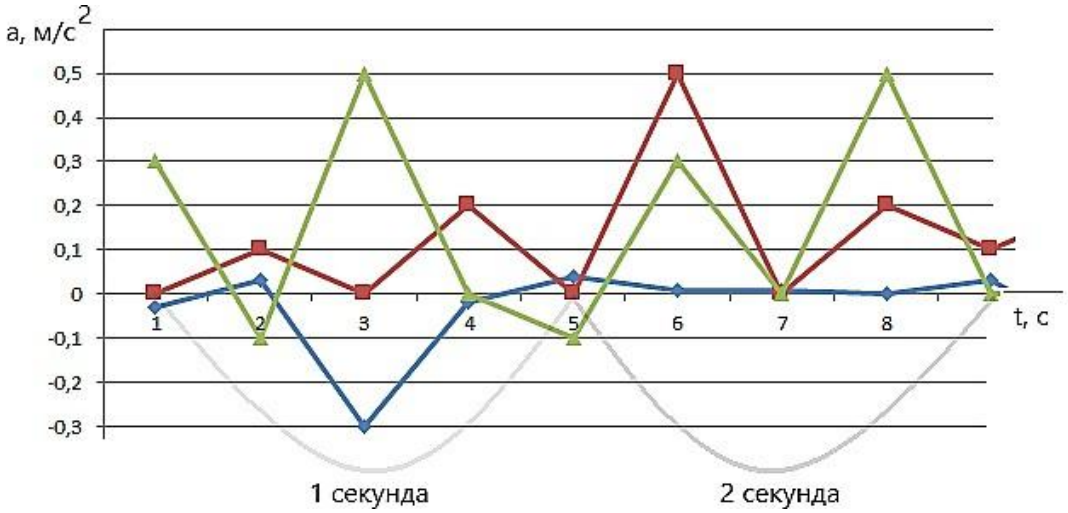


Рис. 9. Зміна прискорення яблука по осі «х» у положенні 4 ящики в кузові автомобіля при його русі різними дорожніми покриттями.

Аналіз наведених даних дозволяє зробити такі висновки:

- при русі автомобіля по асфальту зі швидкістю 50 км/год становище ящика несуттєво впливає на коливання яблук вздовж поздовжньої осі автомобіля (вісь х) – максимальне абсолютне відхилення становить 0,09 м/с;
- положення ящика над задньою віссю підвищує рівень коливань вертикальної осі (вісь z) на 44%;
- положення ящика на задній консолі кузова (за задньою віссю) збільшує амплітуду коливань ящика вздовж поперечної осі автомобіля (вісь у).

Висновки

1. Кінетична енергія буде переходити у внутрішню енергію при зіткненні яблук один з одним і стінками ящика, що призведе до прискореного їх псування як рахунок виділення тепла, так і підвищення вологості при пошкодженнях.

2. Для порівняння - енергія, необхідна для нагрівання 1 л води від 20^0С до 100^0С, дорівнює 335 кДж. Сім яблук, кожне вагою 0,143 кг (загальною вагою 1,001 кг),

будуть володіти при годинному транспортуванні щебеневою дорогою в положенні 5 ящика кінетичною енергією 32 кДж, а при 10-годинної - 320 кДж, що майже дорівнює енергії, рідини до кипіння у наведеному вище прикладі.

3. Таким чином, крім виявлених залежностей переміщень (коливань) плодів від положень ящиків у кузові, існує і залежність від типу, характеристик та технічного стану підвіски автомобіля, яка веде себе по-різному на різних дорожніх покриттях та завантаженості кузова автомобіля.

4. На підставі результатів досліджень можна рекомендувати уникати доріг з ґрунтовим і щебеневим покриттям у період їх незадовільного стану, а при неможливості уникнути таких ділянок, використовувати низьку швидкість руху (не вище 20 км/год), маючи ящики між осями автомобіля.

Список використаних джерел

1. Nazarenko I., Dedov O., Bernyk I., Rogovskii I., Bondarenko A., Zapryvoda A., Titova L. Study of stability of modes and parameters of motion of vibrating machines for technological purpose. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Vol. 6 (7-108). P. 71-79. doi:10.15587/1729-4061.2020.217747.

2. Kresan T., Pylypaka S., Ruzhylo Z., Rogovskii I., Trokhaniak O. External rolling of a polygon on a closed curvilinear profile. Acta Polytechnica. 2020. Vol. 60. No 4. P. 313-317. doi:10.14311/AP.2020.60.0313.

3. Hrynkiv A., Rogovskii I., Aulin V., Lysenko S., Titova L., Zagurskiy O., Kolosok I. Development of a system for determining the informativeness of the diagnosing parameters of the cylinder-piston group of the diesel engines in operation. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Vol. 3 (5(105)). P. 19-29. doi:10. 15587/1729-4061.2020.206073.

4. Voinalovych O., Hnatiuk O., Rogovskii I., Pokutnii O. Probability of traumatic situations in mechanized processes in agriculture using mathematical apparatus of Markov chain method. Engineering for Rural Development. 2019. Vol. 18. P. 563-269. doi:10.22616/ERDev2019.18. N245.

5. Aulin V., Hrynkiv A., Lysenko S., Rohovskii I., Chernovol M., Lyashuk O., Zamota T. Studying truck transmission oils using the method of thermal-oxidative stability during vehicle operation. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Vol. 1 (1/6(97)). P. 6-12. doi:10.15587/1729-4061.2019.156150.

6. Rogovskii I. L. Models of formation of engineering management alternatives in methods of increasing grain production in agricultural enterprises. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. 2021. Vol. 12. No 1. P. 137-146. http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2021.01.137.

7. Zagurskiy O., Ohiienko M., Pokusa T., Zagurska S., Pokusa F., Titova L., Rogovskii I. Study of efficiency of transport processes of supply chains management under uncertainty. Monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole. 2020. 162 p.

8. Zagurskiy O., Rogach S., Titova L., Rogovskii I., Pokusa T. «Green» supply chain as a path to sustainable development. Mechanisms of stimulation of socio-economic development of regions in conditions of transformation. Monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole. 2019. P. 199-213.

References

1. Nazarenko I., Dedov O., Bernyk I., Rogovskii I., Bondarenko A., Zapryvoda A.,

Titova L. (2020). Study of stability of modes and parameters of motion of vibrating machines for technological purpose. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 6 (7-108). P. 71-79. doi:10.15587/1729-4061.2020.217747.

2. Kresan T., Pylypaka S., Ruzhylo Z., Rogovskii I., Trokhaniak O. (2020). External rolling of a polygon on a closed curvilinear profile. Acta Polytechnica. Vol. 60. No 4. P. 313-317. doi:10.14311/AP.2020.60.0313.

3. Hrynkiv A., Rogovskii I., Aulin V., Lysenko S., Titova L., Zagurskiy O., Kolosok I. (2020). Development of a system for determining the informativeness of the diagnosing parameters of the cylinder-piston group of the diesel engines in operation. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 3 (5(105)). P. 19-29. doi:10. 15587/1729-4061.2020.206073.

4. Voinalovych O., Hnatiuk O., Rogovskii I., Pokutnii O. (2019). Probability of traumatic situations in mechanized processes in agriculture using mathematical apparatus of Markov chain method. Engineering for Rural Development. Vol. 18. P. 563-269. doi:10.22616/ERDev2019.18. N245.

5. Aulin V., Hrynkiv A., Lysenko S., Rohovskii I., Chernovol M., Lyashuk O., Zamota T. (2019). Studying truck transmission oils using the method of thermal-oxidative stability during vehicle operation. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 1 (1/6(97)). P. 6-12. doi:10.15587/1729-4061.2019.156150.

6. Rogovskii I. L. (2021). Models of formation of engineering management alternatives in methods of increasing grain production in agricultural enterprises. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. 2021. Vol. 12. No 1. P. 137-146. http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2021.01.137.

7. Zagurskiy O., Ohiienko M., Pokusa T., Zagurska S., Pokusa F., Titova L., Rogovskii I. (2020). Study of efficiency of transport processes of supply chains management under uncertainty. Monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole. 162 p.

8. Zagurskiy O., Rogach S., Titova L., Rogovskii I., Pokusa T. (2019). «Green» supply chain as a path to sustainable development. Mechanisms of stimulation of socio-economic development of regions in conditions of transformation. Monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole. P. 199-213.

Ничай І.М.
Національний університет біоресурсів і природокористування України.,
м. Київ, Україна
E-mail:
nichay@nubip.edu.ua

БАГАТОАТРИБУТИВНА ДЕКОМПОЗИЦІЯ НЕОБХІДНОГО РІВНЯ МАШИНОВИКОРИСТАННЯ ЗЕРНОЗБИРАЛЬНИХ КОМБАЙНІВ

https://doi.org/10.37700/ts.2024.25.229-241

УДК 629.4

Ничай І.М. ***Багатоатрибутивна декомпозиція необхідного рівня машиновикористання зернозбиральних комбайнів.***

Анотація. *У багатоатрибутивну декомпозицію включається декомпозиція компонентна, функціональна, декомпозиція за атрибутом тип компонента і декомпозиція за атрибутом явище, яке виникає в системі машиновикористання зернозбиральних комбайнів. Функціональна декомпозиція важлива, оскільки дослідження системи машиновикористання зернозбиральних комбайнів має обмежуватися розглядом надійності окремих модулів. Розгляд має охоплювати систему цілком. Надійність роботи системи машиновикористання зернозбиральних комбайнів визначається поєднанням надійності роботи окремих її елементів. Виникає питання характері цього поєднання. Зазвичай, одна система машиновикористання зернозбиральних комбайнів виконує кілька функцій. Поряд із функцією контролю параметрів об'єкта машиновикористання зернозбиральних комбайнів може виконувати й інші функції. Для визначення надійності системи машиновикористання зернозбиральних комбайнів необхідно визначати, які елементи беруть участь у виконанні якихось функцій. Врахування показників важливості модулів системи машиновикористання зернозбиральних комбайнів дозволяє, по-перше, модифікувати порядок резервування модулів, забезпечивши більш високу надійність важливих функцій, а по-друге, отримати більш точну оцінку ймовірності безвідмовної роботи, виводячи дані про безвідмовність не тільки всієї системи, а й окремо головної функції. Ця методика забезпечує підвищення безвідмовності обраних функцій системи, але з цим показником для формування системи слід враховувати й інші параметри, зокрема, небезпека відмов.*

Ключові слова: *комбайн, машиновикористання, методика, декомпозиція.*

Nichay I.M. ***Multi-attribute decomposition of required level of machine utilization of combine harvesters.***

Abstract. *Multi-attribute decomposition includes component decomposition, functional decomposition, decomposition by the attribute of the type of component and decomposition by the attribute of the phenomenon that occurs in the system of machine utilization of combine harvesters. Functional decomposition is important, since the study of the system of machine utilization of combine harvesters should be limited to considering the reliability of individual modules. The consideration should cover the system as a whole. The reliability of the system of machine utilization of combine harvesters is determined by the combination of the reliability of its individual elements. The question arises of the nature of this combination.*

Usually, one system of machine utilization of combine harvesters performs several functions. Along with the function of controlling the parameters of the object of machine utilization of combine harvesters, it can also perform other functions. To determine the reliability of the system of machine utilization of combine harvesters, it is necessary to determine which elements participate in the performance of certain functions. Taking into account the indicators of the importance of the modules of the machine utilization system of grain harvesters allows, firstly, to modify the order of module reservation, ensuring higher reliability of important functions, and secondly, to obtain a more accurate assessment of the probability of failure-free operation, deriving data on the failure-free operation not only of the entire system, but also of the main function separately. This technique provides an increase in the failure-free operation of selected system functions, but with this indicator, other parameters should also be taken into account for the formation of the system, in particular, the risk of failures.

Key words: *combine harvester, machine use, methodology, decomposition.*

Постановка проблеми

Для забезпечення необхідного рівня машиновикористання зернозбиральних комбайнів слід використовувати методику багатоатрибутивної декомпозиції, тобто декомпозиції різних атрибутів [1].

У багатоатрибутивну декомпозицію включається декомпозиція компонентна, функціональна, декомпозиція за атрибутом тип компонента і декомпозиція за атрибутом явище, яке виникає в системі машиновикористання зернозбиральних комбайнів. Функціональна декомпозиція важлива, оскільки дослідження системи машиновикористання зернозбиральних комбайнів має обмежуватися розглядом надійності окремих модулів. Розгляд має охоплювати систему цілком [2].

Надійність роботи системи машиновикористання зернозбиральних комбайнів визначається поєднанням надійності роботи окремих її елементів. Виникає питання характері цього поєднання. Зазвичай, одна система машиновикористання зернозбиральних комбайнів виконує кілька функцій. Поряд із функцією контролю параметрів об'єкта машиновикористання зернозбиральних комбайнів може виконувати й інші функції. Для визначення надійності системи машиновикористання зернозбиральних комбайнів необхідно визначати, які елементи беруть участь у виконанні якихось функцій [3].

Необхідно визначати послідовності елементів, що виконують ту чи іншу функціональну задачу. Ця процедура поділу наявної системи на підсистеми та компоненти називається декомпозицією [4].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Декомпозиція як процес розчленування дозволяє розглядати будь-яку систему, що досліджується, як складну, що складається з окремих взаємопов'язаних підсистем, які, у свою чергу, також можуть бути розчленовані на частини [5]. У разі декомпозиції кожне розчленування утворює свій рівень (рис. 1).

Вихідна система розташовується на нульовому рівні [6]. Після її розчленування виходять підсистеми першого рівня [7]. Розчленування цих підсистем чи деяких їх призводить до появи підсистем другого рівня тощо.

Спрощене графічне уявлення декомпозованої системи машиновикористання зернозбиральних комбайнів називається її ієрархічною структурою [8].

Ієрархічна структура може бути зображена у вигляді схеми, що гілкується, на

кшталт представленої на рисунку 1. Тут на нульовому рівні розташовується вихідна система, на наступних рівнях – її підсистеми (кількість рівнів і кількість підсистем, показаних на рисунку, вибрано довільно) [9]. З метою отримання більш повного уявлення про систему машиновикористання зернозбиральних комбайнів та її зв'язки до структури включають надсистему та складові її частини (системи нульового рівня, наприклад, друга система [10].

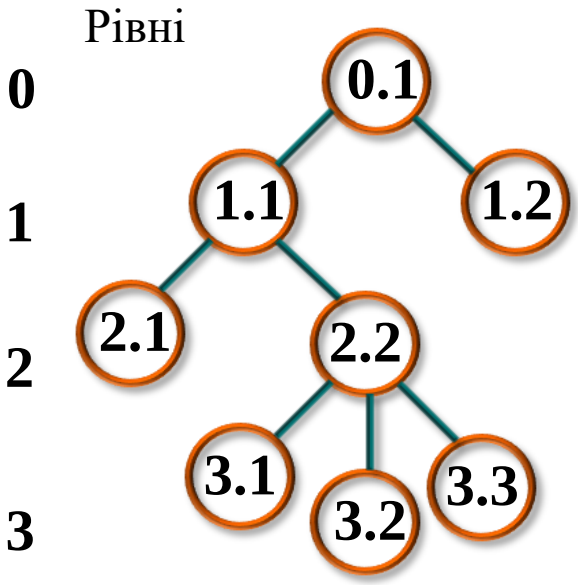


Рис. 1. Приклад ієрархічної структури.

Загальний підхід вирішення проблем може бути представлений як цикл [11]. При цьому в процесі функціонування реальної системи машиновикористання зернозбиральних комбайнів виявляється проблема практики як невідповідність існуючого стану справ необхідному [12]. Для вирішення проблеми проводиться системне дослідження (декомпозиція, аналіз та синтез) системи, що знімає проблему. У ході синтезу здійснюється оцінка аналізованої та синтезованої систем машиновикористання зернозбиральних комбайнів [13]. Реалізація синтезованої системи машиновикористання зернозбиральних комбайнів у вигляді пропонованої фізичної системи дозволяє провести оцінку ступеня зняття проблеми практики та ухвалити рішення на функціонування модернізованої (нової) реальної системи [14].

За такої думки стає очевидним ще один аспект визначення системи машиновикористання зернозбиральних комбайнів: система є засіб вирішення проблем.

Формулювання мети досліджень

Метою дослідження є методичне обґрунтування та практичне дослідження багатоатрибутивної декомпозиції необхідного рівня машиновикористання зернозбиральних комбайнів.

Методичний підхід в проведенні досліджень

Основні завдання системного аналізу машиновикористання зернозбиральних комбайнів можуть бути у вигляді трирівневого дерева функцій (рис. 2).

На етапі декомпозиції, що забезпечує загальне уявлення системи

машиновикористання зернозбиральних комбайнів, здійснюються визначення та декомпозиція загальної мети дослідження та основної функції системи як обмеження траєкторії у просторі станів системи або в області допустимих ситуацій [15]. Найчастіше декомпозиція проводиться шляхом побудови дерева цілей та дерева функцій [16].



Рис. 2. Основні завдання системного аналізу машиновикористання зернозбиральних комбайнів.

Глибина декомпозиції обмежується. Декомпозиція повинна припинятись, якщо необхідно змінити рівень абстракції – подати елемент як підсистему. Якщо декомпозиції з'ясовується, що модель починає описувати внутрішній алгоритм функціонування елемента замість закону його функціонування у вигляді чорної скриньки, то в цьому випадку відбулася зміна рівня абстракції. Це означає вихід межі мети дослідження системи машиновикористання зернозбиральних комбайнів і, отже, викликає припинення декомпозиції.

Декомпозиція за компонентами виділяє окремі складові машиновикористання зернозбиральних комбайнів – її модулі.

У випадку компонент не є принципово неподільним. Таким чином, постає завдання постановки межі декомпозиції. Декомпозиція обмежується шляхом встановлення ознаки виділення. Ознака виділення окремих компонентів – сильний зв'язок між їхніми деталями за одним із типів відносин (зв'язків), що існують у системі машиновикористання зернозбиральних комбайнів (інформаційних, логічних, ієрархічних, енергетичних тощо). Силу зв'язку, наприклад, за інформацією можна

оцінити коефіцієнтом інформаційного взаємозв'язку $k = N/N_0$, де N - кількість інформаційних масивів, що взаємовикористовуються, N_0 - загальна кількість інформаційних масивів. Для опису всієї системи машиновикористання зернозбиральних комбайнів має бути побудована складова модель, що поєднує всі окремі моделі. Рекомендується використовувати розкладання на підсистеми лише тоді, коли такий поділ на основні частини системи не змінюється. Нестабільність границь підсистем швидко знецінить як окремі моделі, і їх об'єднання.

Тобто межі окремих компонентів задаватимуться зв'язками між їхніми частинами.

Функціональна декомпозиція виходить з аналізу функцій системи машиновикористання зернозбиральних комбайнів. При цьому порушується питання, що робить система машиновикористання зернозбиральних комбайнів, незалежно від того, як вона працює. Підставою розбиття на функціональні підсистеми є спільність функцій, виконуваних групами елементів.

У базовому методі передбачається декомпозиція рівня одиничних резервованих функціональних модулів.

Запропонована глибина декомпозиції машиновикористання зернозбиральних комбайнів обмежується рівнем функціональних послідовностей. Дані послідовності є безліччю модулів, чия працездатність необхідна для виконання певної функції системи.

І кожна така послідовність, забезпечуючи виконання своєї частини загальної функції системи, вносить свою частку W_n до загального кінцевого продукту W.

$$W = W_1 + W_2 + \cdots + W_n \quad (1)$$

Отже, дослідження можливих станів послідовностей показує, наскільки повно виконується функція системи машиновикористання зернозбиральних комбайнів.

Задля більшої виконання виявлених функцій застосовуються методи підвищення надійності. Показником, що визначає здатність технічного пристрою, споруди, засоби чи системи виконувати основні свої функції, незважаючи на отримані ушкодження, є живучість. Це властивість системи, що полягає у її здатності протистояти великим обуренням поза, встановленими їхнього штатного функціонування, не допускаючи подальшого каскадного розвитку аварійних і катастрофічних ситуацій. Жива система при виникненні відмови у певній послідовності елементів продовжує виконувати відповідну функцію. Збереження функціональних можливостей системи забезпечується широкою розгалуженістю її первинної мережі, організацією обхідних напрямів та резервних каналів зв'язку, використанням резервних засобів.

До кожної окремої послідовності функції належать елементи, при несправності яких виконання порушується. У цьому зовсім необов'язково, щоб ці елементи розташовувалися послідовно у структурі передачі.

У першу чергу функцією системи машиновикористання зернозбиральних комбайнів управління технологічного процесу можна назвати отримання будь-якого матеріального результату, вихідного продукту, але також функцією машиновикористання зернозбиральних комбайнів може бути контроль над певним параметром, отримання інформації. Отже, кількість виконуваних машиновикористання зернозбиральних комбайнів функцій визначається сумою кількості виходів та кількості елементів, що виконують контроль параметрів.

З погляду наслідків відмови важливішою є функція управління технологічним процесом. Функція контролю процесу менш важливою.

З огляду на це змінюється підхід до визначення надійних показників системи машиновикористання зернозбиральних комбайнів загалом.

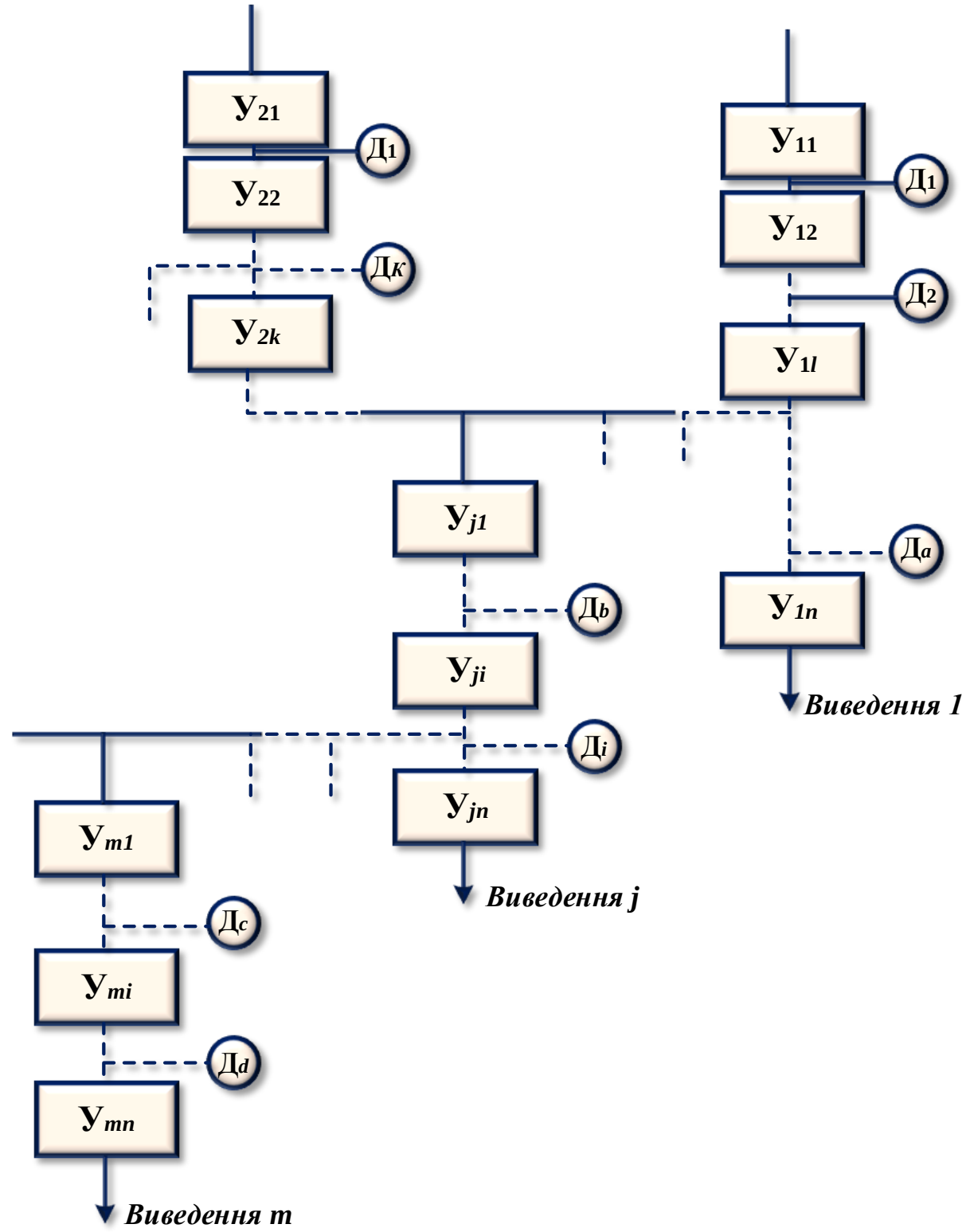


Рис. 3. Загальний вид деревоподібної структури

Стан усієї системи виражається шляхом обчислення логічної формули системи машиновикористання зернозбиральних комбайнів, аргументами якої стану окремих елементів, що входять у функціональні послідовності.

Можливими станами системи машиновикористання зернозбиральних комбайнів

звично називаються працездатне та непрацездатне. Такий дуальний підхід дозволяє застосовувати до розрахунку фактичного стану звичайну булеву логіку. Але такий набір станів не є всеосяжним. Можливо запропонувати розширене уявлення про стан елементів/системи машиновикористання зернозбиральних комбайнів.

Для оперування різноманітними станами, звичайно, потрібно застосовувати особливу систему обчислень, хоча вона багато в чому буде ґрунтуватися на звичній булевій логіці. Відмінністю запропонованої системи машиновикористання зернозбиральних комбайнів буде більше можливих значень змінних стану.

Для ілюстрації універсальності даного підходу розглянемо кілька станів V_1, V_2, V_3, у яких може перебувати як система, і її модулі.

V_1 - непрацездатний стан. В даному стані елемент машиновикористання зернозбиральних комбайнів повністю не виконує своєї функції, і всі його параметри не відповідають необхідним.

V_2 - несправний стан, при якому машиновикористання зернозбиральних комбайнів не відповідає хоча б одній із вимог нормативної технічної та (або) конструкторської документації.

V_3 - стан справний. У ньому машиновикористання зернозбиральних комбайнів відповідає всім вимогам нормативно-технічної та конструкторської документації.

Залежно від справності тієї чи іншої функції визначається економічний ефект, який приносить система машиновикористання зернозбиральних комбайнів.

Згідно з цими визначеннями, система, яка не виконує жодну свою функцію, буде несправна. Несправна система знаходиться у прикордонному стані, який може дозволити виконати її мету.

Опишемо послідовність виконання системою функцій, як наведено вище.

Для виконання будь-яким довільно взятим пристроєм функції збору інформації про параметри об'єкта потрібно, щоб справні всі устрою, управляючі об'єктом.

Кількість послідовностей, що виконують функції, повинна враховуватися при виборі пріоритетного резервування модуля.

У разі представленого рисунку 3 пристрою збору інформації Д; ймовірність того, що їм виконуватиметься його функція, дорівнює добутку ймовірностей безвідмовної роботи всіх елементів, що лежать вище за процесом, враховуючи всі сполуки матеріальних потоків.

Для наведеного елемента формула виглядатиме як

$$P = \prod_{s=1}^{l} Д_{1s} \cdot \prod_{s=1}^{k} Д_{2s} \cdot \ldots \cdot \prod_{s=1}^{i} Д_{js} \quad (2)$$

Аналогічно, у разі пристрою $У_{ji}$

$$P = \prod_{s=1}^{l} У_{1s} \cdot \prod_{s=1}^{k} У_{2s} \cdot \ldots \cdot \prod_{s=1}^{i} У_{js} \quad (3)$$

Кількість послідовностей, що виконують функції, повинна враховуватися при виборі пріоритетного резервування модуля.

Важливість послідовностей, що виконують функції, повинна враховуватись при виборі пріоритетного для резервування модуля. Цей облік може бути здійснений шляхом запровадження коефіцієнта, що відображає важливість кожної функції.

Результати досліджень

Типізація модулів машиновикористання зернозбиральних комбайнів

здійснюється на основі їх властивостей.

У загальному вигляді найчастіше розподілені машиновикористання зернозбиральних комбайнів мають трирівневу структуру.

На верхньому рівні за участю оперативного персоналу вирішуються завдання диспетчеризації процесу, оптимізації режимів, підрахунку техніко-економічних показників виробництва, візуалізації та архівування процесу, діагностики та корекції програмного забезпечення системи. Верхній рівень машиновикористання зернозбиральних комбайнів реалізується на базі серверів, операторських (робітників) та інженерних станцій.

На середньому рівні – завдання інженерного менеджменту та регулювання, пуску та зупинки обладнання, логіко-командного управління, аварійного втручання та моніторингу. Середній рівень реалізується з урахуванням програмованих логічних механізмів.

Нижній (польовий) рівень машиновикористання зернозбиральних комбайнів забезпечує збір даних про параметри технологічного процесу стану устаткування, реалізує управляючі впливу. Основними технічними засобами нижнього рівня є виконавчі машини.

Вхідні сигнали від машин і управляючі на виконавчі механізми можуть подаватися безпосередньо на стан. Однак якщо машиновикористання зернозбиральних комбайнів має значну територіальну протяжність, це вимагатиме довгих інформаційних ліній від кожної машини. Таке технічне рішення може виявитися не раціональним із двох причин:

- висока вартість інфопродукції;
- зростання рівня перешкод із зростанням довжини ліній.

Більш раціональним у такій ситуації є використання станцій розподіленої периферії, що розташовуються у безпосередній близькості до датчиків та виконавчих механізмів. Від типу модуля, від конкретної природи залежать можливі причини його відмови та його наслідки.

Ідентифікація небезпек у процесі виробничої діяльності це процес виявлення, виявлення та розпізнавання небезпечних та шкідливих виробничих факторів та встановлення їх кількісних, тимчасових, просторових та інших характеристик, необхідних та достатніх для розробки профілактичних заходів (запобіжних та коригувальних дій), що забезпечують безпеку праці машиновикористання зернозбиральних комбайнів.

У процесі ідентифікації складається номенклатура небезпеки та шкідливості робочого середовища та трудового процесу, проводиться ранжування негативних факторів, виявляються ймовірність, частота та умови їх прояву, причини, просторова локалізація, можлива шкода здоров'ю людей та навколишньому середовищу та інші параметри, необхідні для вироблення захисних заходів.

Для ідентифікації небезпечних та шкідливих виробничих факторів можна застосовувати такі методи: «Що буде, якщо...?», перевірочний лист, аналіз небезпеки та працездатності, аналіз виду та наслідків відмов, аналіз «дерева відмов», аналіз «дерева подій» та ін.

Джерелами інформації для виявлення небезпек і шкідливостей є:

- нормативні правові акти та нормативні технічні документи, довідкова та наукова технічна література, локальні нормативні акти;
- протоколи, акти, довідки та інші документи органів державного контролю (нагляду);

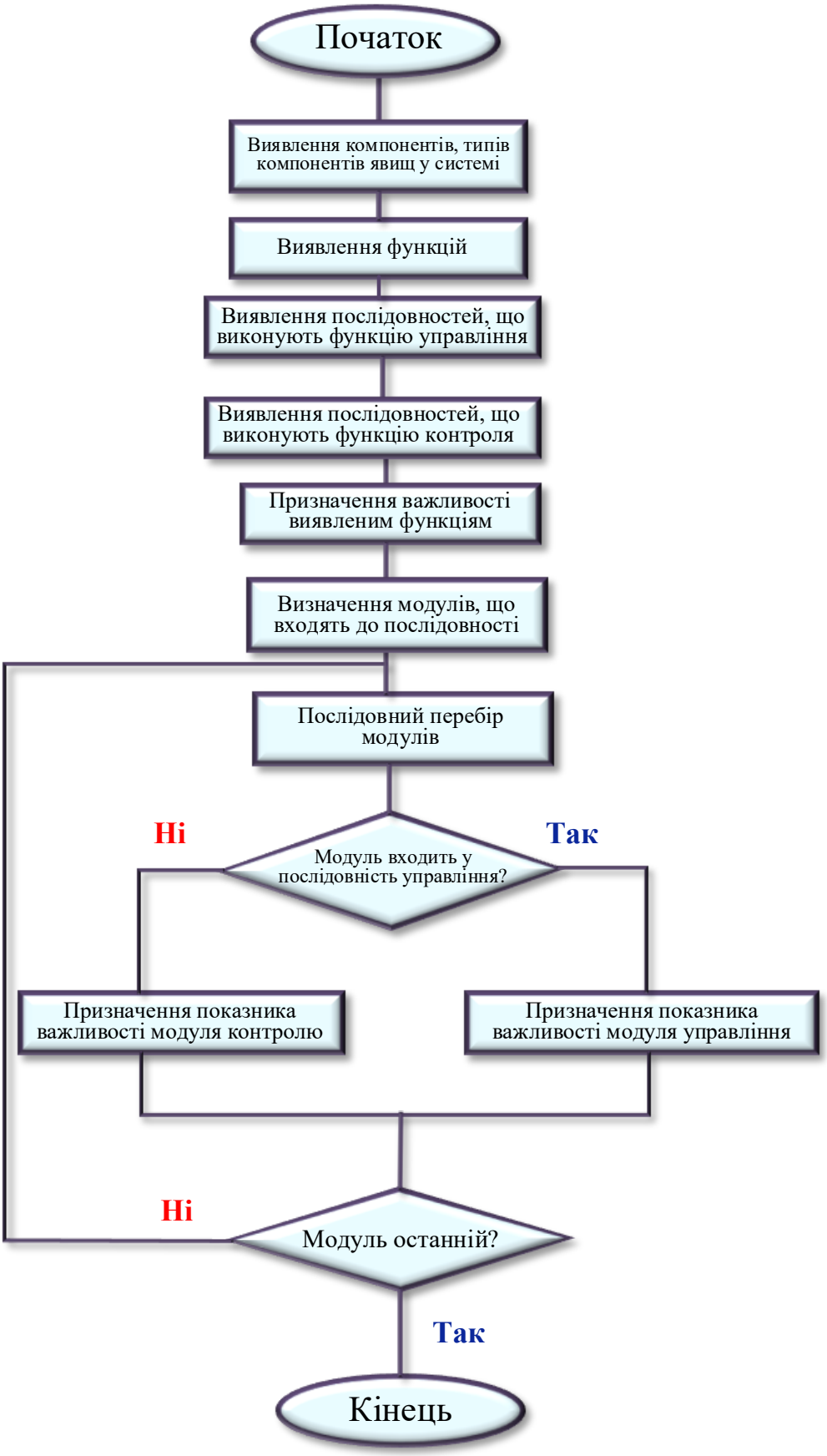


Рис. 4. Структурна схема методики декомпозиції машиновикористання зернозбиральних комбайнів.

- результати виробничого контролю за дотриманням вимог промислової, екологічної безпеки та санітарно-епідеміологічних вимог;
- результати спеціальної оцінки умов праці;
- розпорядження спеціалістів з охорони праці, подання уповноважених осіб з охорони праці, пропозиції комітету (комісії) з охорони праці;
- результати спостереження за технологічним процесом, виробничим середовищем, робочими місцями, роботою підрядних організацій, зовнішніми факторами (дорогами, кліматичними умовами тощо);
- результати аналізу анкет, бланків, опитувальних листів;
- досвід практичної діяльності;
- результати багатоступеневого контролю над умовами та охороною праці.

Кроки методики багатоатрибутивної декомпозиції та призначення важливості мають вигляд:

- Виявлення компонентів машиновикористання зернозбиральних комбайнів.
- Визначення типів компонентів машиновикористання зернозбиральних комбайнів.
- Визначення явищ, які є у машиновикористанні зернозбиральних комбайнів.
- Виявляє послідовності компонентів, справність яких забезпечує керування технологічними параметрами системи для отримання продукту.
- Виявляє послідовності, справність яких забезпечує контроль технологічних параметрів системи.
- Призначення важливості виявленим функцій, виходячи з необхідності їхньої справності та масштабу наслідків, що викликається припиненням виконання цих функцій.
- Послідовний перебір модулів та визначення, у виконанні якої функції бере участь черговий модуль. Якщо модулі закінчилися – завершення.
- Якщо модуль бере участь у виконанні функції керування – перехід до пункту 10.
- Якщо модуль бере участь у виконанні тільки функцій контролю – перехід до пункту 11.
- Призначення модуля важливості відповідної функції управління. Перехід до пункту 7.
- Призначення модуля важливості відповідної функції контролю. Перехід до пункту 7.

Розроблена оригінальна методика декомпозиції машиновикористання зернозбиральних комбайнів на функціональні послідовності з урахуванням важливості дозволяє оцінити ймовірність її перебування у різних станах.

Висновки

1. Врахування показників важливості модулів системи машиновикористання зернозбиральних комбайнів дозволяє, по-перше, модифікувати порядок резервування модулів, забезпечивши більш високу надійність важливих функцій, а по-друге, отримати більш точну оцінку ймовірності безвідмовної роботи, виводячи дані про безвідмовність не тільки всієї системи, а й окремо головної функції. Ця методика забезпечує підвищення безвідмовності обраних функцій системи, але з цим показником для формування системи слід враховувати й інші параметри, зокрема, небезпека відмов.

Список використаних джерел

1. Aulin V., Rogovskii I., Lyashuk O., Tykhyi A., Kuzyk A., Dvornyk A., Derkach O., Lysenko S., Banniy O., Hrynkiv A. Revealing patterns of change in the tribological efficiency of composite materials for machine parts based on phenylone and polyamide reinforced with arimide-T and fullerene. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. Vol. 3 (12 (129)). P. 6–19. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.304719.

2. 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.

3. Yablonskyi P., Rogovskii I., Sobczuk H., Virchenko G., Volokha M., Vorobiov O. Computational approach to geometric modeling of plow bodies. Journal of Engineering Sciences (Ukraine). 2024. Vol. 11(1). P. E9–E18. https://doi.org/10.21272/jes.2024.11(1).e2.

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. Rogovskii I.L., Reznik N.P., Osadchuk N.V., Ivanova T.M., Zinchenko M.M., Melnyk L.Yu., Ryzhakova H. Institutional aspects of development of budget system: theory and practice of Ukraine. Studies in Systems, Decision and Control. 2024. Vol. 489. P. 925–937. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-36895-0_78.

7. Rogovskii I.L., Reznik N.P., Druzhynin M.A., Titova L.L., Nychay I.M., Nikulina O.V. Non-uniform field of concrete deformations of circular cross-section columns under cross bending applying digital image correlation method. Studies in Systems, Decision and Control. 2024. Vol. 489. P. 939–951. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-36895-0_79.

8. 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).f1.

9. Rogovskii I., Lyubarets B., Borek K. Analyticity of non-stationary processes of change in diagnostic parameters of hydrostatic transmissions of harvesters. Machinery and Energetics. 2022. Vol. 13. Issue 1. P. 67–76. https://doi.org/10.31548/machenergy2022.01.067.

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. Issue 1. P. 137–146. https://doi.org/10.31548/machenergy2021.01.137.

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. Issue 3. P. 157–166. https://doi.org/10.31548/machenergy2022.03.157.

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. Issue 4. P. 129–138. https://doi.org/10.31548/machenergy2021.04.129.

14. Nazarenko I., Mishchuk Y., Mishchuk D., Ruchynskyi M., Rogovskii I., Mikhailova L., Titova L., Berezovyi M., Shatrov R. Determiantion 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. Myhailovych Y., Rogovskii I., Korobko M., Berezova L. Experimental studies of vibration load of synchronous threaded connections of grain harvester combines. Engineering for Rural Development. 2023. Vol. 22. P. 908–914. https://doi.org/10.22616/ERDev.2023.22.TF179.

16. Zagurskiy O., Pokusa Z., Pokusa F., Titova L., Rogovskii I. Study of efficiency of transport processes of supply chains management under uncertainty. Monograph. 2020. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole. ISBN 978-83-66567-13-9. 162 p.

References

1. Aulin V., Rogovskii I., Lyashuk O., Tykhyi A., Kuzyk A., Dvornyk A., Derkach O., Lysenko S., Banniy O., Hrynkiv A. (2024). Revealing patterns of change in the tribological efficiency of composite materials for machine parts based on phenylone and polyamide reinforced with arimide-T and fullerene. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 3 (12 (129)). P. 6–19. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.304719.

2. 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.

3. Yablonskyi P., Rogovskii I., Sobczuk H., Virchenko G., Volokha M., Vorobiov O. (2024). Computational approach to geometric modeling of plow bodies. Journal of Engineering Sciences (Ukraine). Vol. 11(1). P. E9–E18. https://doi.org/10.21272/jes.2024.11(1).e2.

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. Rogovskii I.L., Reznik N.P., Osadchuk N.V., Ivanova T.M., Zinchenko M.M., Melnyk L.Yu., Ryzhakova H. (2024). Institutional aspects of development of budget system: theory and practice of Ukraine. Studies in Systems, Decision and Control. Vol. 489. P. 925–937. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-36895-0_78.

7. Rogovskii I.L., Reznik N.P., Druzhynin M.A., Titova L.L., Nychay I.M., Nikulina O.V. (2024). Non-uniform field of concrete deformations of circular cross-section columns under cross bending applying digital image correlation method. Studies in Systems, Decision and Control. Vol. 489. P. 939–951. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-36895-0_79.

8. 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).f1.

9. Rogovskii I., Lyubarets B., Borek K. (2022). Analyticity of non-stationary processes of change in diagnostic parameters of hydrostatic transmissions of harvesters. Machinery and Energetics. Vol. 13. Issue 1. P. 67–76. https://doi.org/10.31548/machenergy2022.01.067.

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. Issue 1. P. 137–146. https://doi.org/10.31548/machenergy2021.01.137.

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. Issue 3. P. 157–166. https://doi.org/10.31548/machenergy2022.03.157.

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. Issue 4. P. 129–138. https://doi.org/10.31548/machenergy2021.04.129.

14. Nazarenko I., Mishchuk Y., Mishchuk D., Ruchynskyi M., Rogovskii I., Mikhailova L., Titova L., Berezovyi M., Shatrov R. (2021). Determiantion 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. Myhailovych Y., Rogovskii I., Korobko M., Berezova L. (2023). Experimental studies of vibration load of synchronous threaded connections of grain harvester combines. Engineering for Rural Development. Vol. 22. P. 908–914. https://doi.org/10.22616/ERDev.2023.22.TF179.

16. Zagurskiy O., Pokusa Z., Pokusa F., Titova L., Rogovskii I. (2020). Study of efficiency of transport processes of supply chains management under uncertainty. Monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole. ISBN 978-83-66567-13-9. 162 p.

Соломка О.В.,
Войтюк В.Д.
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна
E-mail: solomkaov@ukr.net

ПЕРСПЕКТИВНІ ПРИСТРОЇ ДЛЯ ЗАПОБІГАННЯ САМОВІЛЬНОГО ОПУСКАННЯ ПЛАТФОРМИ АВТОМОБІЛЯ

https://doi.org/10.37700/ts.2024.25.242-250

УДК 629.3.016:629.3.018.7

Соломка О.В., Войтюк В.Д. ***Перспективні пристрої для запобігання самовільного опускання платформи автомобіля.***

Анотація. *В статті розкрито перспективні пристрої для запобігання самовільного опускання платформи автомобіля. В результаті теоретичного дослідження були отримані результати дослідження експлуатації сільськогосподарської транспортної техніки з гідравлічним приводом скидного пристрою. Також результати аналізу серійних технічних рішень запобіжних і блокувальних систем платформи сільськогосподарської транспортної техніки. Розроблені запобіжні і блокувальні системи для платформ сільськогосподарської транспортної техніки, оформлені у вигляді чотирьох патентів. Розроблені запобіжні і блокувальні системи підвищення безпеки експлуатації сільськогосподарської транспортної техніки, що забезпечують фіксацію платформи при відмові гідравлічного приводу скидного пристрою.*

Ключові слова: *автомобіль, платформа, експлуатація, гідроциліндр.*

Solomka O.V., Voytyuk V.D. ***Prospective devices to prevent unauthorized lowering of vehicle platform.***

Abstract. *The article reveals promising devices to prevent the vehicle's platform from lowering the vehicle. The theoretical study obtained the results of the study of the operation of agricultural transport equipment with a hydraulic drive of the discharge device. Also the results of the analysis of serial technical solutions of safety and blocking systems of the platform of agricultural transport equipment. Precautionary and blocking systems for agricultural transport vehicles were developed in the form of four patents. Designed safety and blocking systems for the safety of the operation of agricultural transport equipment, which provide the fixation of the platform in the refusal of the hydraulic drive of the discharge device.*

Key words: *vehicle, platform, operation, hydraulic cylinder.*

Постановка проблеми

Проведені дослідження показали, що більшість нещасних випадків, зареєстрованих в сільськогосподарському виробництві, пов'язане з експлуатацією та ремонтом сільськогосподарської техніки. При технічному обслуговуванні і ремонті гідравлічних приводів платформ і робочих органів сільськогосподарських мобільних машин щорічно гинуть від 5 до 30 чоловік, при травматичній ситуації – притискання платформою, що опускається та іншими гідрофікованими частинами і механізмами [1].

Порушення вимог безпеки операторами, у вигляді небезпечних дій потерпілих, стали основною групою причин загибелі в АПК України – 39,2% [2].

Основними причинами нещасних випадків, з летальним результатом постраждалих в АПК працівників, стали:

- виконання технічних операцій під платформою сільськогосподарської транспортної техніки, що знаходиться в піднятому положенні – 30,7% [3];
- застосування несправних або невикористання захисних пристосувань – 3,2% [4];
- оперування з вузлами машин при працюючому двигуні – 10% [5].

Досить висока частка виробничого травматизму – 27,2% пов'язана з технічними несправностями і конструктивно-виробничими недоліками саморозвантажувальної транспортної техніки.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

В даний час в сферу перевезень залучається велика кількість машин. Для сільськогосподарських робіт доцільно застосовувати автотранспортні засоби, обладнані автономним вантажно-розвантажувальним механізмом. До таких автотранспортних засобів відносяться автомобілі-самоскиди, автомобілі-самонавантажувачі і автомобілі з скидним пристроєм платформи [6].

Самоскидні установки встановлюються на шасі вантажних автомобілів, самоскидних причепів і напівпричепів. Найбільш популярним видом техніки, що використовуються для перевезення сільськогосподарських вантажів, стали автомобілі – самоскиди [7]. Самоскиди (напівпричіп з кузовом або причіп) найчастіше застосовують для транспортування сипучих, навалювальних і інших видів вантажів, які придатні для вивантаження за допомогою перекидання з кузова [8].

Проведені дослідження показали, що більшість нещасних випадків, зареєстрованих в сільськогосподарському виробництві, пов'язане з експлуатацією та ремонтом сільськогосподарської техніки [9]. При технічному обслуговуванні і ремонті гідравлічних приводів платформ і робочих органів сільськогосподарських мобільних машин щорічно гинуть від 5 до 30 чоловік [10], при травматичній ситуації – притискання платформою, що опускається та іншими гідрофікованими частинами і механізмами [11]. Порушення вимог безпеки операторами, у вигляді небезпечних дій потерпілих, стали основною групою причин загибелі в АПК України – 39,2% [12].

Розслідуванням причин нещасних випадків виявлено, що найбільш небезпечним джерелом травмування стали самоскиди (58,0% випадках), причепи - самоскиди - 23, 2%, вантажні автомобілі - 10,1% та інші [9].

Формулювання мети досліджень

Метою дослідження є методичне обґрунтування аналітичних досліджень перспективних пристроїв для запобігання самовільного опускання платформи автомобіля.

Методичний підхід в проведенні досліджень

Як показав огляд конструкцій, найбільше застосування в гідравлічному приводі платформи отримали гідроциліндри односторонньої і двосторонньої дії [13].

В гідроциліндрі односторонньої дії робочий хід поршня відбувається під дією тиску робочої рідини, а зворотний хід, під дією ваги порожньої платформи, якщо ж

необхідне зусилля для зворотного ходу недостатньо, додатково встановлюються пружини.

Прямий і зворотний хід поршня в гідравлічних циліндрах двосторонньої дії здійснюються під дією тиску робочої рідини. Гідроциліндри двосторонньої дії можуть мати односторонній або ж двосторонній штоки.

При необхідності, застосовують телескопічні гідроциліндри, тобто циліндри з декількома штоками, в яких робочий хід поршня перевищує довжину корпусу,

До основних технічних показників гідравлічних циліндрів відносять: коефіцієнт корисної дії, витрата робочої рідини, тиск в гідроприводі, потужність гідравлічного насоса, швидкість руху і зусилля на вихідній ланці, діаметри штока і поршня.

$$Q = \frac{v_\partial F_\partial}{\eta_{\partial.о.}}$$

де v_∂ - лінійна швидкість штока, мм / с;
F_∂ - робоча площа поршня, м^2.

При прямому ході гідравлічного циліндра двосторонньої дії робоча площа поршня дорівнює:

$$F_{\partial.п.} = \frac{\pi D^2}{4},$$

а при зворотному ході дорівнює:

$$F_{\partial.п.} = \frac{\pi (D^2 - d^2)}{4}.$$

При прямому ході зусилля на штоку визначають за формулою:

$$P_{\partial.п.} = \frac{\pi}{4}\left[p_1 D^2 - p_2 (D^2 - d^2)\right]\eta_{\partial.г.}\pi_{\partial.м.}$$

при зворотному ході:

$$P_{\partial.п.} = \frac{\pi}{4}\left[(D^2 - d^2) p_1 - D^2 p_2\right]\eta_{\partial.г.}\eta_{\partial.м.}$$

Динамічні процеси, що проходять в силовому гідроциліндрі описані рівнянням нерозривності потоку робочої рідини [44]:

$$\frac{dx}{dt} S_i + Q_{УТ} + Q_{СЖ} = Q_H$$

Рівняння руху поршня описані формулою:

$$n\frac{d^2x}{dt^2} + F_{ТР}\left(\frac{dx}{dt}, t\right) sign\frac{dx}{dt} + F(t) = p_1 S_1 - p_2 S_2$$

де x – поточна координата поршня;
S_1 та S_2 - площі поршня в нагнітальній та зливній порожнинах гідроциліндра, м^2;
$Q_{УТ}$ та $Q_{СЖ}$ – втрати витрати на витікання і на стиск робочої рідини;

Q_H – масова витрата рідини, що надходить в нагнітальну порожнину гідроциліндра за одиницю часу;

m - маса рухомих частин гідроприводу, кг;

нелінійна характеристика сил тертя:

$$F_{TP}\left(\frac{dx}{dt},t\right)sign\frac{dx}{dt}$$

F (t) - зовнішні сили, прикладені до поршня;

p_1 і p_2 - тиск робочої рідини в нагнітальній та зливній порожнинах гідроциліндра.

Втрати на витоку робочої рідини через еквівалентний зазор, вважаючи потік витоків ламінарним, визначають за формулою:

$$Q_{УТ} = C_У d_П^3 \frac{\Delta p}{\mu},$$

Сили тертя ущільнення штока є функцією тиску рідини в порожнині циліндра, окремо для ущільнюючих вузлів поршня і штока гідроциліндра.

Автори роботи наводять такі висновки [43,44]:

Теоретичні дослідження за отриманими математичними моделями для розрахунку сили тертя поршневого і штокового ущільнень гідравлічних циліндрів підтверджуються результатами експериментальних досліджень.

При швидкості переміщення поршня менше 17 мм/с, при тиску робочої рідини і її перепаді більше 10 МПа, гідравлічний циліндр має найбільший ресурс.

Розіб'ємо систему гідроприводу на окремі вузли. При такому підході математична модель теплового розрахунку, описана рівнянням:

$$\frac{dt}{d\tau} = \left[C_Ж T_i \sum_i^n G_i + C_Ж T_{(i+1)} \sum_i^{n+1} G_{i+1} - K_i F_i (T_i - T_0) + N\right] \frac{1}{M_i C_m}$$

де $C_{ж}$ та C_n - теплоємність робочої рідини та матеріалу вузла підсистеми;

G_i та G_{i+1} - масовий потік робочої рідини, що входить і виходить (I + 1) з розрахункового вузла;

K_i та F_i - коефіцієнти теплопередачі та поверхня теплопередачі*;*

N - теплота, що виділяється в розглянутому вузлі*;*

T_0 - температура навколишнього середовища, *К*;

M_i - маса розрахункового вузла, включаючи масу робочої рідини*, кг.*

Математична модель являє систему рівнянь, що включає: рівняння витрат, які враховують умова нерозривності потоку робочої рідини; рівняння руху рухомих частин у вигляді основного рівняння динаміки; рівняння зв'язку між параметрами потоку. Математична модель описує фази роботи гідроударного пристрою: фазу введення рухливих частин; фазу розгону рухомих частин; фазу гальмування і відкриття пружного елемента.

Результати досліджень

Експлуатаційні характеристики розробленого автором запірно-регулюючого пристрою платформи досліджувалися на самоскидному причепі. В якості базових (порівняльних) зразків одночасно досліджувалися уповільнюючий клапан та штуцер з каліброваним отвором, що застосовуються в даний час на самоскидних платформах. Результати дослідження наведені в таблиці 1.

Результати порівняльних досліджень показали, що установка запірно-регулюючого пристрою на робочий гідроциліндр платформи дозволяє забезпечити, на відміну від порівнюваних пристроїв (уповільнюючого клапана і штуцери з каліброваним отвором), постійне час опускання платформи. Разом з тим установка

пристрою не впливає на встановлений технологічний час підйому.

Таблиця 1

Час опускання і підйому платформи

Опускання, t, с						Підйом, t, с					
Маса платформи без вантажу = 1164 кг			Маса платформи з вантажем = 2664 кг			Маса платформи без вантажу = 1164 кг			Маса платформи з вантажем = 2664 кг		
1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
54,1	39,1	26,1	54,1	29,1	21,1	19,1	19,1	19,1	59,1	61,1	59,1
54,1	41,1	29,1	54,1	31,1	21,1	19,1	19,1	19,1	61,1	61,1	59,1
54,1	40,1	27,1	54,1	30,1	21,1	19,1	19,1	19,1	60,1	61,1	59,1
54,1	40,1	27,1	54,1	30,1	21,1	19,1	19,1	19,1	60,1	61,1	59,1

Як видно із таблиці 1, встановлення разробленого пристрою дозволило забезпечити, на відміну від порівнюваних пристроїв, постійне час опускання платформи. Розбіжність розрахункового $t_Р$ = 56,36 с і фактичного $t_ф$ =54.1 с часу опускання платформи не перевищувало 4,19%.

Опис розробленого пристрою регулювання швидкості підйому-опускання вантажної самоскидної платформи

Пристрій регулювання швидкості підйому-опускання вантажної самоскидної платформи представлено на рис. 1.

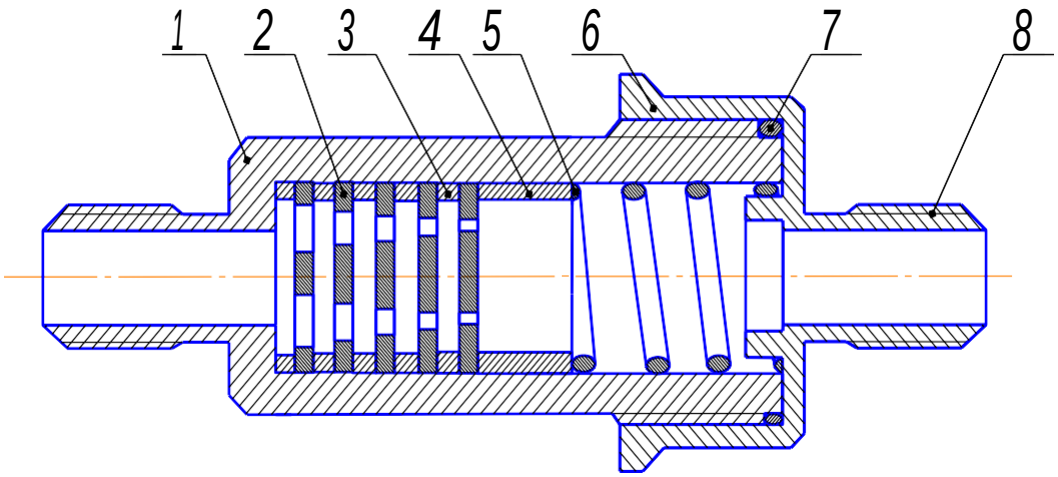


Рис. 1. Пристрій регулювання швидкості підйому - опускання вантажної самоскидної платформи:
1 - корпус; 2 - дросельні шайби; 3 - кільця; 4 - втулка 4; 5 - пружина
6 - кришка; 7 - ущільнення; 8 -штуцер

Корпус 1, через кутовий перехідник, кріпиться до штуцера гідравлічного циліндра. На штуцер 8 навертається гайка шланга високого тиску від гідравлічного насоса сільськогосподарської транспортної техніки (на рисунку 1 рукав не показаний). Кільця, втулка і дросельні шайби утримуються від провертання в корпусі за допомогою шліца на корпусі. Для герметичності з'єднань використовуються фторопластові і

гумові кільця 7.

Пристрій регулювання швидкості підйому - опускання працює наступним чином. Під час підйому платформи за допомогою гідравлічного циліндра робоча рідина під тиском, через штуцер 8 пристрою регулювання швидкості підйому-опускання вантажної самоскидної платформи підводиться до гідроциліндра. Швидкість регулювання швидкості підйому (опускання) здійснюється підбором дросельних шайб.

Опис розробленого гідравлічного скидного пристрою. Гідравлічне скидний пристрій для сільськогосподарської транспортної техніки складається з агрегатів які застосовуються в сучасних автомобілях - самоскидах (рис. 2).

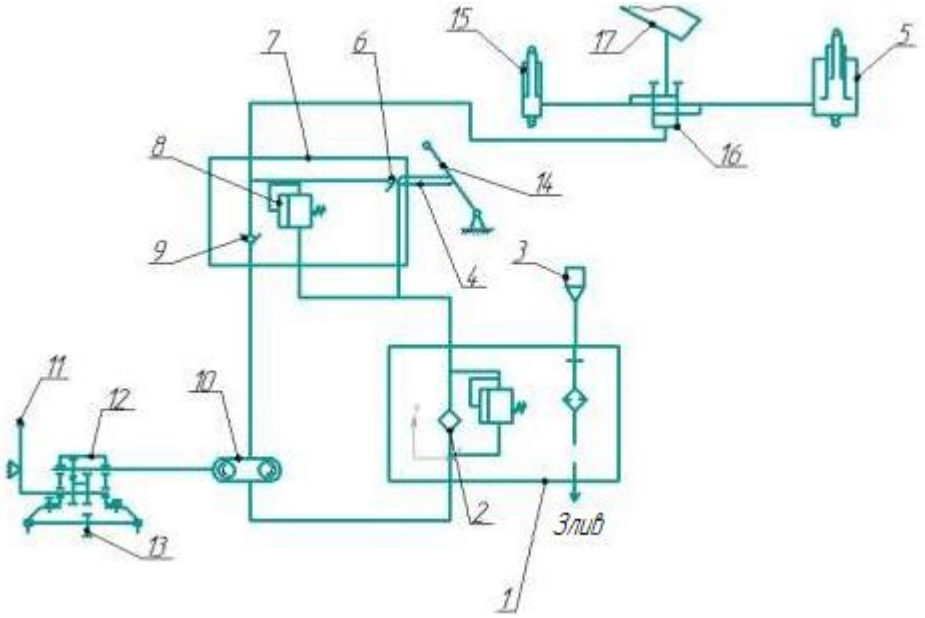


Рис. 2. Гідравлічний скидний пристрій:
1 - бак; 2 - зливний сітчастий фільтр із запобіжним клапаном; 3 - заливна горловина; 4 - штовхачі клапана опускання платформи; 5 - телескопічний трисекційний гідроциліндр; 6 - клапан опускання платформи: 7 - кран керування; 8 - запобіжний клапан крана управління; 9 - зворотний клапан; 10 - насос шестеренний; 11 - важіль управління коробкою відбору потужності; 12 - коробка відбору потужності; 13 - шестерня заднього ходу коробки передач автомобіля; 14 - важіль управління коробки автомобіля - самоскида; 15 - гідроциліндр двосторонньої дії; 16 - узгоджувальний клапан; 17 - самоскидна платформа; 18 – запобіжний упор.

Додатково в стандартну схему скидного пристрою встановлено: узгоджувальний клапан, забезпечує послідовність подачі гідравлічної рідини в гідроциліндри 5 і 15; запобіжний упор, що складається з двох секцій. Запобіжний упор основою секції 19 кріпиться до вантажної платформи 17, основою секції 18 до рами автомобіля - самоскида 23. Секція 18 має вушко 21 і наплив 22 (рис. 3).

У прибраному положенні вантажної самоскидної платформи запобіжний упор знаходиться в складеному положенні. Для підйому платформи вмикається гідравлічний насос і гідравлічна рідина з бака почне надходити по всмоктуючій магістралі в насос, а звідти під тиском, через перший відкритий канал узгоджувального клапана 16 в телескопічний трисекційний гідроциліндр 5. При підйомі платформи на розрахунковий кут перший відкритий канал узгоджувального клапана 16 закривається, перепускаючи гідравлічна рідина по другому каналу, в гідроциліндр 15. Шток гідроциліндра 15 висувається, через вушко 21 впливаючи на шарнір запобіжного упору 20, зрушуючи

його вправо. При цьому верхня секція 19 зупиниться на напливі 22 нижньої секції 18, не даючи самовільно опуститися самоскидній платформі у випадку розгерметизації системи підйому (опускання).

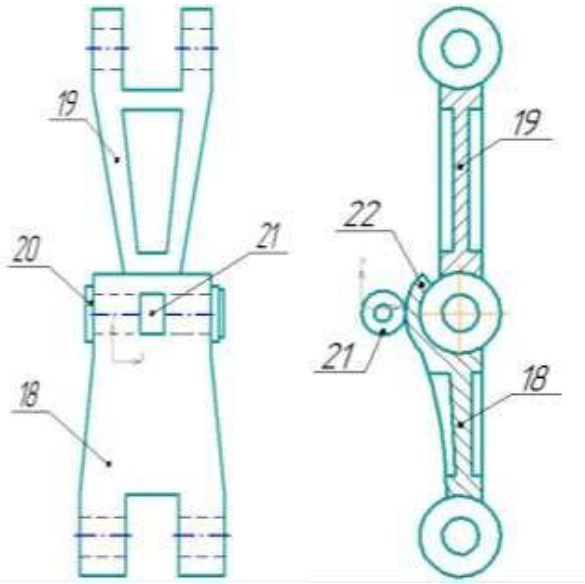


Рис. 3. Запобіжний упор вантажної самоскидної платформи

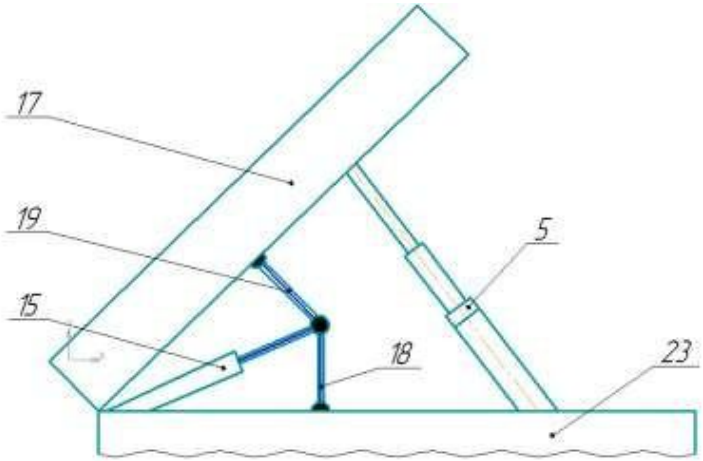


Рис. 4. Схема фіксації платформи автомобіля - самоскида в піднятому положенні.

Для опускання вантажної самоскидної платформи гідравлічна рідина, через другий канал узгоджувального клапана подається в гідроциліндр 15, який починає рухатися, зрушуючи шарнір запобіжного упору вліво, при досягненні розрахункового кута закривається другий відкритий канал узгоджувального пристрою 16, відкривається перший канал, що дозволяє гідравлічній рідині з телескопічного трисекційного гідроциліндра 5 надходити в гідравлічний бак. Секції гідроциліндра починають прибиратись, секції запобіжного упору складатися, самоскидна платформа сідає на раму автомобіля - самоскида. Схема запобіжного упору вантажної самоскидної платформи в положенні запобіжного пристрою показано на рисунку 4.

Висновки

1. Доведено, що розроблена конструкція силового гідравлічного циліндра з механічним кульковим замком, для скидного пристрою платформи забезпечує безпечну

роботу замка з ймовірністю, яка дорівнює 0,998. З метою підвищення безпеки водіїв при обслуговуванні гідроприводів сільськогосподарської транспортної техніки розроблено пристрій регулювання швидкості підйому (опускання) платформи, результати випробувань якого підтверджують його працездатність.

2. Розроблений гідравлічний скидний пристрій, запірно - регулюючий пристрій дозволяють забезпечити фіксацію платформи (робочого органу) при обриві магістралі гідравлічної системи.

3. Результати експериментальних досліджень розроблених технічних засобів безпеки скидального пристрою сільськогосподарської транспортної техніки дозволяють констатувати їх працездатність до рекомендацій практичного застосування.

Список використаних джерел

1. Fluck R. C. Energy analysis for agricultural systems. Energy in Farm Production. Energy in world agriculture. Amst:Elsevier, 2012. P. 45–51.

2. Cavalaris C. C., Gemtos T. A. Evaluation of tillage efficiency and energy requirements for five methods of soil preparation in the sugar beet crop. Proceedings of the EE&AE'2002 Conference. International Scientific Conference. 2002. P. 172–179.

3. L. Horrein, A. Bouscayrol, M. El-Fassi. Thermal energetic model of an Internal Combustion Engine for simulation of a thermal vehicle. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Seoul, 2012. P. 978–983.

4. Nazarenko I., Dedov O., Bernyk I., Rogovskii I., Bondarenko A., Zapryvoda A., Titova L. Study of stability of modes and parameters of motion of vibrating machines for technological purpose. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Vol. 6 (7-108). P. 71-79. doi:10.15587/1729-4061.2020.217747.

5. Kresan T., Pylypaka S., Ruzhylo Z., Rogovskii I., Trokhaniak O. External rolling of a polygon on a closed curvilinear profile. Acta Polytechnica. 2020. Vol. 60. No 4. P. 313-317. doi:10.14311/AP.2020.60.0313.

6. Hrynkiv A., Rogovskii I., Aulin V., Lysenko S., Titova L., Zagurskiy O., Kolosok I. Development of a system for determining the informativeness of the diagnosing parameters of the cylinder-piston group of the diesel engines in operation. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Vol. 3 (5(105)). P. 19-29.

7. Voinalovych O., Hnatiuk O., Rogovskii I., Pokutnii O. Probability of traumatic situations in mechanized processes in agriculture using mathematical apparatus of Markov chain method. Engineering for Rural Development. 2019. Vol. 18. P. 563-269. doi:10.22616/ERDev2019.18. N245.

8. Aulin V., Hrynkiv A., Lysenko S., Rohovskii I., Chernovol M., Lyashuk O., Zamota T. Studying truck transmission oils using the method of thermal-oxidative stability during vehicle operation. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Vol. 1 (1/6(97)). P. 6-12. doi:10.15587/1729-4061.2019.156150.

9. Rogovskii I. L. Models of formation of engineering management alternatives in methods of increasing grain production in agricultural enterprises. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. 2021. Vol. 12. No 1. P. 137-146. http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2021.01.137.

10. A. De Luca, G. Oriolo Modelling and control of nonholonomic mechanical systems. Kinematics and Dynamics of Multi-Body Systems (J. Angeles, A. Kecs-kemethy Eds.). Springer-Verlag, 1995. P. 301–305.

11. Geradin M., Cardona A. Kinematics and dynamics of rigid and flexible mechanisms using finite elements and quaternion algebra. Computational Mechanics. 1988. Vol. 4. PP. 115–135.

12. Wong J. Y. Theory of ground vehicles: 4th ed. Wiley, 2008. 592 p.

13. Classification of agricultural tractors according to the energy efficiencies of the engine and the transmission based on OECD tests / J. Ortiz-Cañavate, J. Gil-Sierra, J. Casanova-Kindelán, V. Gil-Quirós. Applied Engineering in Agriculture. 2009. № 25 (4). PP. 475–480.

References

1. Fluck R. C. (2012). Energy analysis for agricultural systems. Energy in Farm Production. Energy in world agriculture. Amst:Elsevier, P. 45–51.

2. Cavalaris C. C., Gemtos T. A. (2002). Evaluation of tillage efficiency and energy requirements for five methods of soil preparation in the sugar beet crop. Proceedings of the EE&AE'2002 Conference. International Scientific Conference. P. 172–179.

3. L. Horrein, A. Bouscayrol, M. El-Fassi. (2012). Thermal energetic model of an Internal Combustion Engine for simulation of a thermal vehicle. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Seoul, P. 978–983.

4. Nazarenko I., Dedov O., Bernyk I., Rogovskii I., Bondarenko A., Zapryvoda A., Titova L. (2020). Study of stability of modes and parameters of motion of vibrating machines for technological purpose. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 6 (7-108). P. 71-79. doi:10.15587/1729-4061.2020.217747.

5. Kresan T., Pylypaka S., Ruzhylo Z., Rogovskii I., Trokhaniak O. (2020). External rolling of a polygon on a closed curvilinear profile. Acta Polytechnica. Vol. 60. No 4. P. 313-317. doi:10.14311/AP.2020.60.0313.

6. Hrynkiv A., Rogovskii I., Aulin V., Lysenko S., Titova L., Zagurskiy O., Kolosok I. (2020). Development of a system for determining the informativeness of the diagnosing parameters of the cylinder-piston group of the diesel engines in operation. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 3 (5(105)). P. 19-29. doi:10. 15587/1729-4061.2020.206073.

7. Voinalovych O., Hnatiuk O., Rogovskii I., Pokutnii O. (2019). Probability of traumatic situations in mechanized processes in agriculture using mathematical apparatus of Markov chain method. Engineering for Rural Development. Vol. 18. P. 563-269. doi:10.22616/ERDev2019.18. N245.

8. Aulin V., Hrynkiv A., Lysenko S., Rohovskii I., Chernovol M., Lyashuk O., Zamota T. (2019). Studying truck transmission oils using the method of thermal-oxidative stability during vehicle operation. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 1 (1/6(97)). P. 6-12. doi:10.15587/1729-4061.2019.156150.

9. Rogovskii I. L. (2021). Models of formation of engineering management alternatives in methods of increasing grain production in agricultural enterprises. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Vol. 12. No 1. P. 137-146. http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2021.01.137.

10. A. De Luca, G.(1995). Oriolo Modelling and control of nonholonomic mechanical systems. Kinematics and Dynamics of Multi-Body Systems (J. Angeles, A. Kecskemethy Eds.). Springer-Verlag. P. 301–305.

11. Geradin M., Cardona A. (1988). Kinematics and dynamics of rigid and flexible mechanisms using finite elements and quaternion algebra. Computational Mechanics. Vol. 4. PP. 115–135.

12. Wong J. Y. (2008). Theory of ground vehicles: 4th ed. Wiley. 592 p.

13. J. Ortiz-Cañavate, J. Gil-Sierra, J. Casanova-Kindelán, V. Gil-Quirós (2009). Classification of agricultural tractors according to the energy efficiencies of the engine and the transmission based on OECD tests /. Applied Engineering in Agriculture. № 25 (4). PP. 475–480.

Швидун О.В.
Національний університет біоресурсів і природокористування України
м. Київ, Україна
E-mail:
shvydun@nubip.edu.ua

АЛГОРИТМ ДІАГНОСТУВАННЯ ВІДЕОЕНДОСКОПІЄЮ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ДЕФЕКТІВ АГРЕГАТІВ ЗЕРНОЗБИРАЛЬНИХ КОМБАЙНІВ

https://doi.org/10.37700/ts.2024.25.251-259

УДК 629.4

Швидун О.В. ***Алгоритм діагностування відеоендоскопією експлуатаційних дефектів агрегатів зернозбиральних комбайнів.***

Анотація. *В статті розкрито особливості розширеного впровадження діагностичного забезпечення зернозбиральних комбайнів, з одного боку, яке стимулюється неухильно зростаючими вимогами до надійності, а з іншого безпеки експлуатації зернозбиральних комбайнів. Метою дослідження було методичне обґрунтування алгоритму діагностування відеоендоскопією експлуатаційних дефектів агрегатів зернозбиральних комбайнів. Для розробки алгоритму діагностування об'єкта дослідження була використана інформація про зв'язок інформативних діагностичних ознак обєкта і його структурних параметрів. Так само в основу розроблюваного порядку діагностування була покладена схема основних етапів діагностування механізмів з використанням системи відеоендоскопічного діагностування на базі прикладної програми «Діагност ВС», розроблена в Національному університеті біоресурсів і природокористування України.*

Ключові слова: *комбайн, відеоендоскопія, дефект, діагностування.*

Shvydun O.V. ***Algorithm for diagnosing operational defects of combine harvester units by videoendoscopy.***

Abstract. *The article reveals the features of the expanded implementation of diagnostic support for combine harvesters, on the one hand, which is stimulated by steadily increasing requirements for reliability, and on the other hand, the safety of operation of combine harvesters. The purpose of the study was to methodologically substantiate the algorithm for diagnosing operational defects of combine harvester units by video endoscopy. To develop the algorithm for diagnosing the object of study, information about the relationship between informative diagnostic features of the object and its structural parameters was used. Similarly, the basis of the developed diagnostic procedure was a scheme of the main stages of diagnosing mechanisms using the video endoscopic diagnostic system based on the applied program "Diagnost VS", developed at the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine.*

Key words: *combine, videoendoscopy, defect, diagnosis.*

Постановка проблеми

Слід зазначити, що розширене впровадження діагностичного забезпечення зернозбиральних комбайнів [1], з одного боку, стимулюється неухильно зростаючими

вимогами до надійності та безпеки експлуатації зернозбиральних комбайнів [2], але з іншого боку, пов'язане з необхідністю вирішення низки проблем, пов'язаних з недостатньою вивченістю механізмів експлуатаційних пошкоджень [3], навантажених вузлів і деталей [4], відсутністю досить представницьких статистичних даних про кількісні та якісні характеристики експлуатаційних відмов [5], складністю отримання достовірних моделей технічного стану зернозбиральних комбайнів, недостатньою вивченістю характеру впливу можливих несправностей на параметри фізичних процесів, що супроводжують використання комбайнів за прямим призначенням, складністю адаптації традиційно застосовуваних методів неруйнівного контролю до умов безрозбірної діагностики зернозбиральних комбайнів в умовах аграрного виробництва [6], недостатньо розвиненою базою алгоритмічного та програмного забезпечення, браком спеціальних датчиків та вимірювальних приладів, відсутністю спеціального стендового обладнання для відпрацювання та випробування діагностичних методів, відсутністю системи підготовки кваліфікованих фахівців у галузі технічної діагностики, недостатнім рівнем фінансового та матеріальне забезпечення [7].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Сучасні засоби технічної діагностики передбачають використання широкого спектру фізичних явищ, реалізацію складних алгоритмів збирання, обробки, зберігання та подання інформації [8]. Тому достовірна оцінка технічного стану зернозбиральних комбайнів на стадії експлуатації передбачає використання відповідного діагностичного інструментарію [9], складовими частинами якого є інформаційне, методичне, алгоритмічне, програмне, апаратурне та організаційне забезпечення [10]. У зв'язку з цим основні напрями досліджень спрямовані на розвиток математичних методів виділення та розпізнавання діагностичної інформації, створення ефективних вимірювальних приладів та комплексних систем збору [11], обробки та подання інформації, аналіз специфічних особливостей конструкцій та умов експлуатації зернозбиральних комбайнів та їх механізмів, вивчення типових руйнівних процесів та їх можливих наслідків, виділення вузлів, що лімітують безвідмовність та довговічність зернозбиральних комбайнів, пошук діагностичних ознак деградації технічного стану та синтез алгоритмів діагностування, орієнтованих на застосування тих чи інших методів та засобів діагностики [12].

Формулювання мети досліджень

Метою дослідження є методичне обґрунтування алгоритму діагностування відеоендоскопією експлуатаційних дефектів агрегатів зернозбиральних комбайнів.

Методичний підхід в проведенні досліджень

В результаті виконаних, і виконуваних, наукових робіт у зазначених вище напрямках на даний час на ринку представлена найширша номенклатура діагностичних приладів і систем, як вітчизняних, так і імпортних, що відрізняються особливостями інформаційного, методичного, алгоритмічного, програмного та апаратурного забезпечення, що мають різні принципи дії, функціональні можливості, метрологічні характеристики, сфери застосування, масогабаритні параметри, елементну базу, співвідношення ціни та якості тощо. Наприклад, тільки в області відеоендоскопічної діагностики можна нарахувати десятки фірм, що випускають сотні різних датчиків та

приладів для вимірювання параметрів технічного стану. Аналогічно і з іншими видами діагностичних методів.

Цей достаток призвів до того, що на зміну проблеми подолання дефіциту діагностичних методик і приладів прийшла нова проблема – проблема вибору такого компонування діагностичного забезпечення, яке здатне забезпечити необхідний рівень контролю за придатністю конкретного типу обладнання. Вирішення цієї проблеми вимагає, як правило, проведення комплексу теоретичних та експериментальних досліджень, спрямованих на аналіз конструктивних особливостей та специфічних умов експлуатації агрегатів зернозбиральних комбайнів, аналіз умов навантаження та характерних експлуатаційних пошкоджень найбільш відповідальних вузлів та деталей, виділення можливих діагностичних ознак, визначення діагностичних методів та приладів, здатних функціонувати у процесі взаємодії з обладнанням, що діагностується, застосування методик порівняльного багатофакторного аналізу і критеріальної оцінки діагностичних можливостей різних варіантів компонування діагностичного забезпечення. Дана робота присвячена розробці та апробації методології проведення цих досліджень.

Результати досліджень

Для розробки алгоритму діагностування об'єкта дослідження була використана інформація про зв'язок інформативних діагностичних ознак об'єкта і його структурних параметрів (рис. 1). Так само в основу розроблюваного порядку діагностування була покладена схема основних етапів діагностування механізмів з використанням системи відеоендоскопічного діагностування на базі прикладної програми «Діагност ВС», розроблена в Національному університеті біоресурсів і природокористування України (рис. 1).

БСВАД – бороскопічна система відеоендоскопічного діагностування технічного стану агрегатів зернозбиральних комбайнів – діагностична система, що забезпечує моніторинг технічного стану агрегатів зернозбиральних комбайнів, за допомогою використання інформації, що міститься у візуалізаційному сигналі агрегату, вмонтована в штатну (бортову) систему діагностування і виконує свої функції в режимі повсякденної експлуатації. БСВАД має наступні структурні частини: електронний блок (ЕБ), індикатор несправностей, аналізуючу апаратуру і з'єднувальні дроти.

ЕБ являє собою, що отримав велике поширення в автомобілях, контролер, який виконує функції запису інформації в довготривалу пам'ять (HD), БПФ, сигнатурний аналіз відео сигналу самодіагностики системи та її навчання.

Аналізуюча апаратура складається з відеоакселерометрів, каскаду передпідсилювачів сигналу і фільтрів, що дозволяють передавати на ЕБ придатний для подальшого використання вихідний аналоговий сигнал.

Індикатор несправностей являє собою лампу, розташовану на приладовій дошці комбайнера, яка інформує його про виникаючі несправності в БСВАД, алгоритм її роботи аналогічний алгоритму роботи лампи несправностей ДВЗ (Check Engine).

З'єднувальні дроти забезпечують зв'язок всіх структурних частин системи. Повинні бути виконані, згідно з існуючими вимогами до проводів відеовимірювальних комплексів. Розпізнавання технічних станів проводиться порівнянням відліків поточного відеоспектра з граничними значеннями, сформованими по еталонному спектру (рис. 2). Якщо значення (сигнатури) поточного спектра перевищують сигнатури маски еталонного спектру більше, ніж на допуск, передбачений програмою, то включається механізм реєстрації значень розбіжності поточного і еталонного спектрів, що свідчить про наявність дефектів.

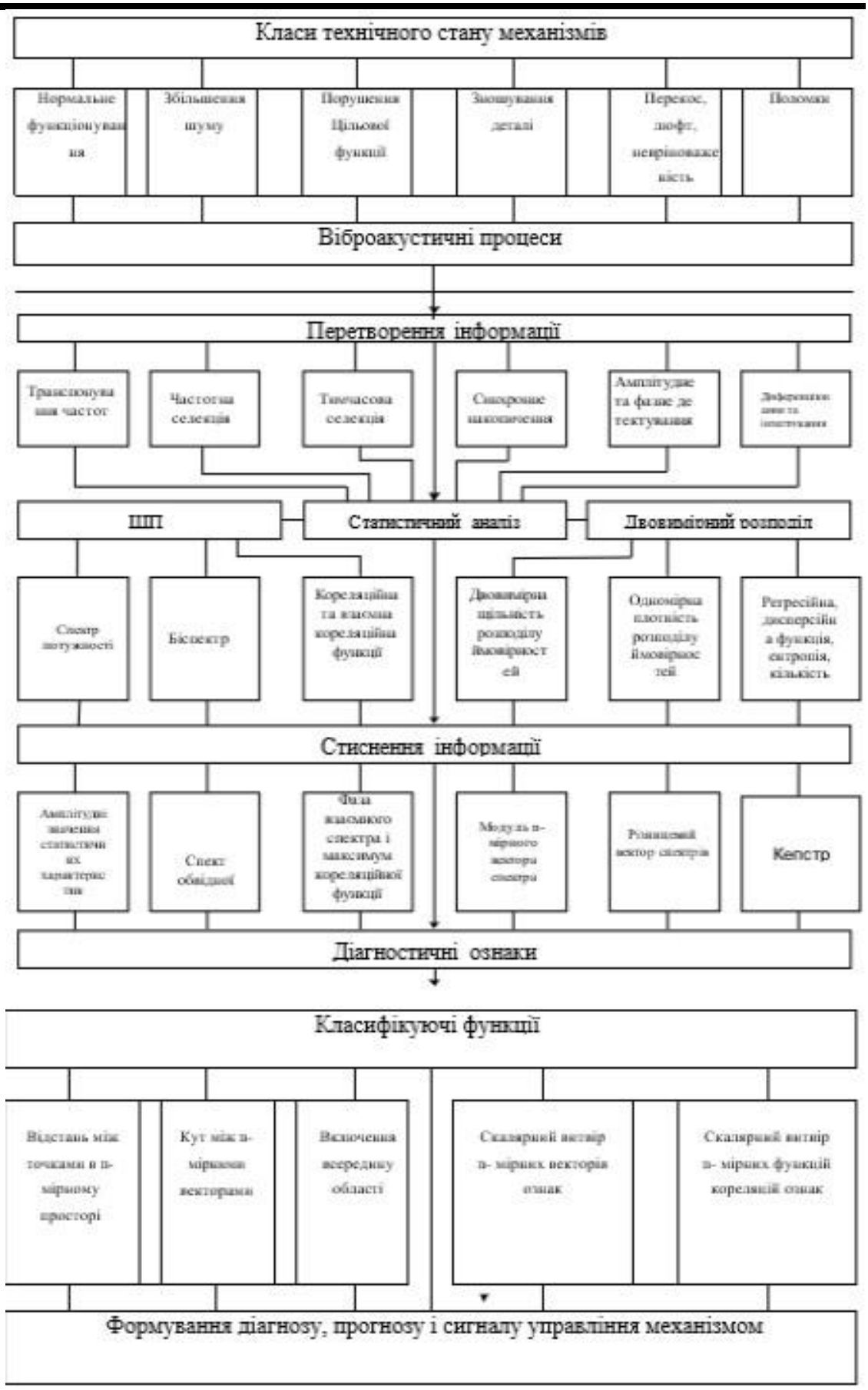


Рис. 1. Основні етапи відеоендоскопічного діагностування механізмів

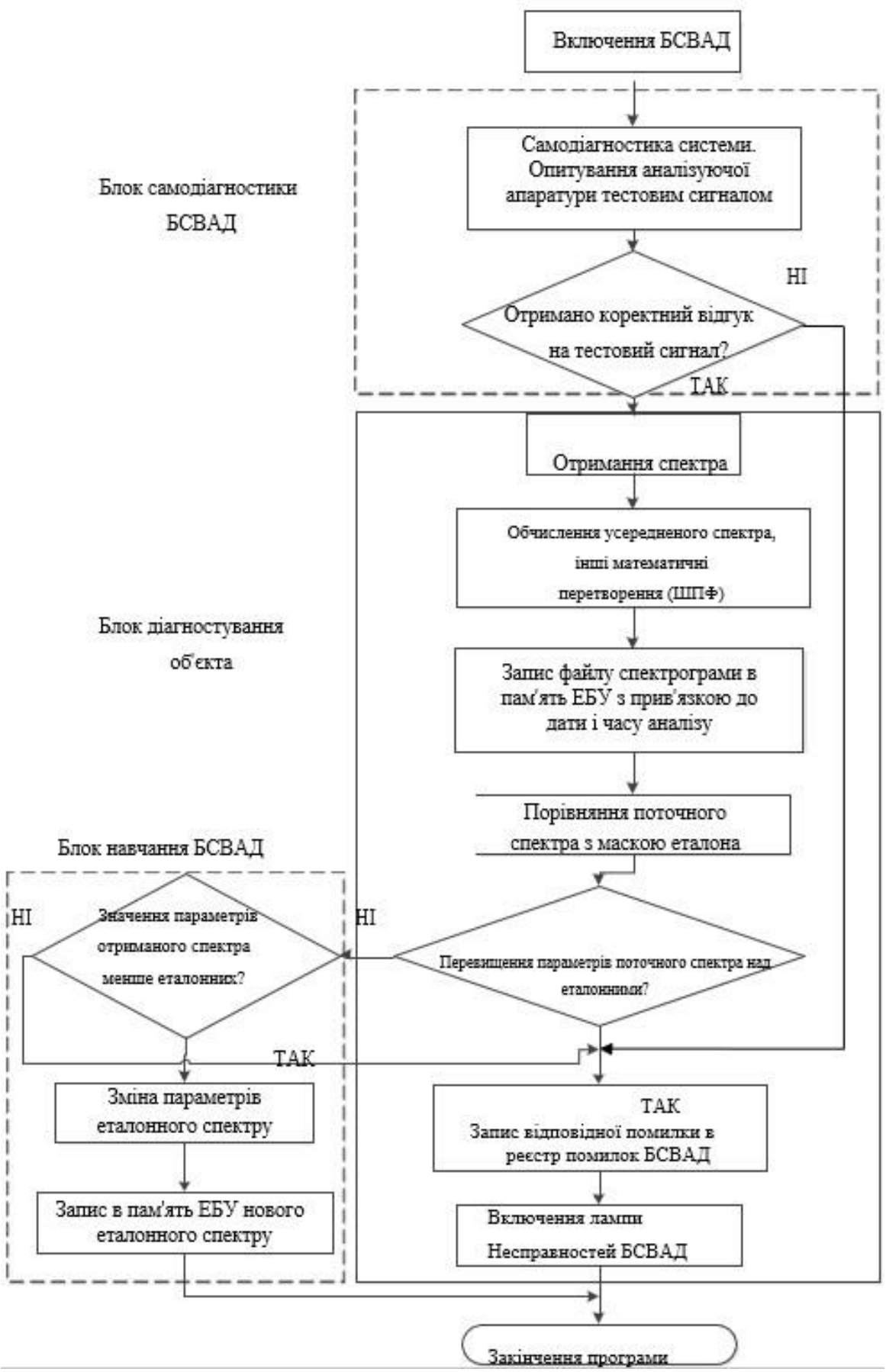


Рис. 2. Алгоритм роботи БСВАД

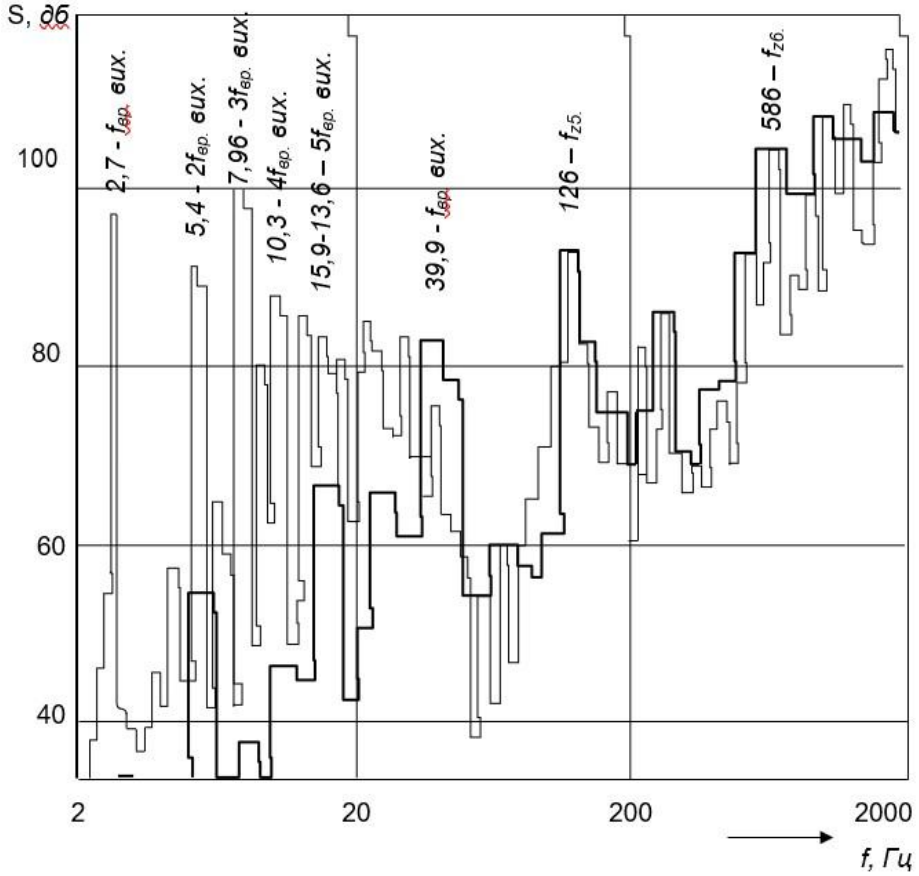


Рис. 3. Застосування алгоритму роботи БСВАД на основі сигнатурного аналізу: поточний спектр - тонка лінія; еталонний (опорний) спектр - жирна лінія

Алгоритм роботи бортової системи відеоендоскопічного діагностування представлений на рис. 2. Зазначена програма складається з трьох основних модулів:

- Модуль самодіагностики - модуль протягом, якого ЕБ надсилається тестовий сигнал на аналізуючу апаратуру. Працездатність системи визначається за отриманим зворотним сигналом.
- Модуль діагностування – власне, основний модуль протягом якого і відбувається процес відеоендоскопічного діагностування;
- Модуль навчання системи – протягом якого відбувається формування бази еталонів, щодо яких в подальшому відбувається постановка діагнозу діагностуючого об'єкту.

Перевищення граничних значень фіксується при порівнянні спектрів і заноситься до реєстру помилок відомості із зазначенням рівня перевищення (в відсотках від еталону) на відповідних частотах, в подальшому на підставі записаних даних проводиться локалізація дефекту. Виходячи з властивостей діагностичної моделі встановлюється поточний технічний стан об'єкта, що діагностується.

Графічне представлення результатів роботи запропонованого алгоритму представлено на рис. 3.

Висновки

1. Зазначений алгоритм діагностування відеоендоскопією експлуатаційних дефектів агрегатів зернозбиральних комбайнів складається з трьох основних модулів:

- Модуль самодіагностики – модуль протягом, якого ЕБ надсилається тестовий сигнал на аналізуючу апаратуру. Працездатність системи визначається за отриманим зворотним сигналом.
- Модуль діагностування – власне, основний модуль протягом якого і відбувається процес відеоендоскопічного діагностування;
- Модуль навчання системи - протягом якого відбувається формування бази еталонів, щодо яких в подальшому відбувається постановка діагнозу діагностуючого об'єкту.

Перевищення граничних значень фіксується при порівнянні спектрів і заноситься до реєстру помилок відомості із зазначенням рівня перевищення (в відсотках від еталону) на відповідних частотах, в подальшому на підставі записаних даних проводиться локалізація дефекту. Виходячи з властивостей діагностичної моделі встановлюється поточний технічний стан об'єкта, що діагностується.

Список використаних джерел

1. Aulin V., Rogovskii I., Lyashuk O., Tykhyi A., Kuzyk A., Dvornyk A., Derkach O., Lysenko S., Banniy O., Hrynkiv A. Revealing patterns of change in the tribological efficiency of composite materials for machine parts based on phenylone and polyamide reinforced with arimide-T and fullerene. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. Vol. 3 (12 (129)). P. 6–19. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.304719.

2. 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.

3. 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.

4. 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).f1.

5. Rogovskii I., Lyubarets B., Borek K. Analyticity of non-stationary processes of change in diagnostic parameters of hydrostatic transmissions of harvesters. Machinery and Energetics. 2022. Vol. 13. Issue 1. P. 67–76. https://doi.org/10.31548/machenergy2022.01.067.

6. 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. Issue 1. P. 137–146. https://doi.org/10.31548/machenergy2021.01.137.

7. 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.

8. Rogovskii I.L. Influence of operating failure of agricultural machines on efficiency of their machine use. Machinery and Energetics. 2021. Vol. 12. Issue 3. P. 157–166. https://doi.org/10.31548/machenergy2022.03.157.

9. 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. Issue 4. P. 129–138. https://doi.org/10.31548/machenergy2021.04.129.

10. Nazarenko I., Mishchuk Y., Mishchuk D., Ruchynskyi M., Rogovskii I., Mikhailova L., Titova L., Berezovyi M., Shatrov R. Determiantion 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.

11. Myhailovych Y., Rogovskii I., Korobko M., Berezova L. Experimental studies of vibration load of synchronous threaded connections of grain harvester combines. Engineering for Rural Development. 2023. Vol. 22. P. 908–914. https://doi.org/10.22616/ERDev.2023.22.TF179.

12. Zagurskiy O., Pokusa Z., Pokusa F., Titova L., Rogovskii I. Study of efficiency of transport processes of supply chains management under uncertainty. Monograph. 2020. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole. ISBN 978-83-66567-13-9. 162 p.

References

1. Aulin V., Rogovskii I., Lyashuk O., Tykhyi A., Kuzyk A., Dvornyk A., Derkach O., Lysenko S., Banniy O., Hrynkiv A. (2024). Revealing patterns of change in the tribological efficiency of composite materials for machine parts based on phenylone and polyamide reinforced with arimide-T and fullerene. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 3 (12 (129)). P. 6–19. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.304719.

2. 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.

3. 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.

4. 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).f1.

5. Rogovskii I., Lyubarets B., Borek K. (2022). Analyticity of non-stationary processes of change in diagnostic parameters of hydrostatic transmissions of harvesters. Machinery and Energetics. Vol. 13. Issue 1. P. 67–76. https://doi.org/10.31548/machenergy2022.01.067.

6. 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. Issue 1. P. 137–146. https://doi.org/10.31548/machenergy2021.01.137.

7. 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.

8. Rogovskii I.L. (2021). Influence of operating failure of agricultural machines on efficiency of their machine use. Machinery and Energetics. Vol. 12. Issue 3. P. 157–166. https://doi.org/10.31548/machenergy2022.03.157.

9. 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. Issue 4. P. 129–138. https://doi.org/10.31548/machenergy2021.04.129.

10. Nazarenko I., Mishchuk Y., Mishchuk D., Ruchynskyi M., Rogovskii I., Mikhailova L., Titova L., Berezovyi M., Shatrov R. (2021). Determiantion 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.

11. Myhailovych Y., Rogovskii I., Korobko M., Berezova L. (2023). Experimental studies of vibration load of synchronous threaded connections of grain harvester combines. Engineering for Rural Development. Vol. 22. P. 908–914. https://doi.org/10.22616/ERDev.2023.22.TF179.

12. Zagurskiy O., Pokusa Z., Pokusa F., Titova L., Rogovskii I. (2020). Study of efficiency of transport processes of supply chains management under uncertainty. Monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole. ISBN 978-83-66567-13-9. 162 p.

Тітова Л.Л.,
Войтюк В.Д.
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна
E-mail: titovall@ukr.net

АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ БАГАТОРЕЖИМНИХ ГІБРИДНИХ СИЛОВИХ АГРЕГАТІВ АВТОМОБІЛІВ В УМОВАХ АГРАРНИХ ПІДПРИЄМСТВ

https://doi.org/10.37700/ts.2024.25.260-269

УДК 629.3.016:629.3.018.7

Тітова Л.Л., Войтюк В.Д. ***Аналіз застосування багаторежимних гібридних силових агрегатів автомобілів в умовах аграрних підприємств.***

Анотація. *В статті розкрито перспективи застосування багаторежимних гібридних силових агрегатів автомобілів в умовах аграрних підприємств. Особливо актуальним питанням є собівартість вантажоперевезень за допомогою автотранспорту, особливо якщо взяти до уваги той факт, що вартість паливної сировини неухильно стає вищою. Як відомо, гібриди чудово демонструють свої переваги на вулицях мегаполісів, там, де їм доводиться дуже часто розганятися та гальмувати. У вантажних гібридних транспортних засобів, що працюють у містах з частими розгонами та гальмуваннями, економія палива сягає 25-35%. В результаті виконання даної роботи було запропоновано використовувати ітеративний процес при моделюванні оптимальної конфігурації автомобіля за рахунок комбінованої оптимізації стратегії управління живленням.*

Ключові слова: *автомобіль, гібрид, експлуатація, силовий агрегат.*

Titova L.L., Voytyuk V.D. ***Analysis of use of multi -mode hybrid power units of cars in agricultural enterprises.***

Abstract. *The article describes the prospects for the use of multi -mode hybrid power units of cars in agricultural enterprises.. Particularly relevant is the cost of cargo transportation through vehicles, especially if you take into account the fact that the cost of fuel raw materials is steadily higher. As you know, hybrids show their advantages on the streets of metropolitan areas, where they have to accelerate and slow down very often. In freight hybrid vehicles operating in cities with frequent accelerations and inhibitions, fuel savings reach 25-35%. As a result of this work, it was proposed to use an iterative process in modeling the optimal configuration of the car through a combined optimization of power management strategy.*

Key words: *car, hybrid, operation, power unit.*

Постановка проблеми

Споживання такого ресурсу, як паливо, залежить від багатьох факторів. Мають значення транспортні умови, клімат та якість дорожніх покриттів та, нарешті, характер експлуатації автотранспорту [1]. Можна з упевненістю сказати, що особливості рельєф місцевості та тип пересування транспортного засобу мають важливий вплив на ефективність використання паливних ресурсів [2]. Методики та нормативна документація визначають оптимальний рівень паливних витрат під час руху

транспортного засобу. Але ці нормативи регламентують витрата на рівних дорогах, які, часто зустрічаються у мережі доріг України. Особливо актуальним питанням є собівартість вантажоперевезень за допомогою автотранспорту, особливо якщо взяти до уваги той факт, що вартість паливної сировини неухильно стає вищою.

Популярність гібридних комерційних автомобілів поки що не помітна. Гібриди чудово демонструють свої переваги на вулицях мегаполісів, там, де їм доводиться дуже часто розганятися та гальмувати. У розвізних гібридних транспортних засобів, що працюють у містах з частими розгонами та гальмуваннями, економія палива сягає 25-35%. Важливим моментом застосування гібридної технології стає збереження корисного навантаження транспортного засобу. Адже споряджена маса комерційного автомобіля трохи зростає після того, як його основний ДВЗ буде агрегатований з електротрансмісією та пов'язаним із нею важким блоком акумуляторних батарей. ДВЗ-електричні гібридні приводи можуть регенерувати лише 25 % енергії гальмування. Цей незначний відсоток обумовлений небажанням автовиробників встановлювати ємніші батареї в гібридний автомобіль. Якщо змонтувати ємні АКБ, то різко зменшиться вантажопідйомність машини, а ціна ще зросте. Тому конструкторам гібридних вантажівок завжди потрібно шукати компроміс між економічністю, вартістю і збереженням корисного навантаження [3].

Істотне подорожчання автомобіля – це дуже важливий аспект, який сьогодні супроводжує всі гібридні транспортні засоби. Аналітики вважають, що з розвитком нового автомобільного напрямку вдасться знизити ціну, хоча зростання популярності гібридної технології в результаті залежатиме від вартості палива та впровадження більш ефективних приводів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Конструкція силового агрегату, обраного на дослідження, представлена рис. 1. Ця конструкція заснована на рішеннях, описаних у патенті US6478705. Дослідження цієї силової установки представляється цікавим [4].

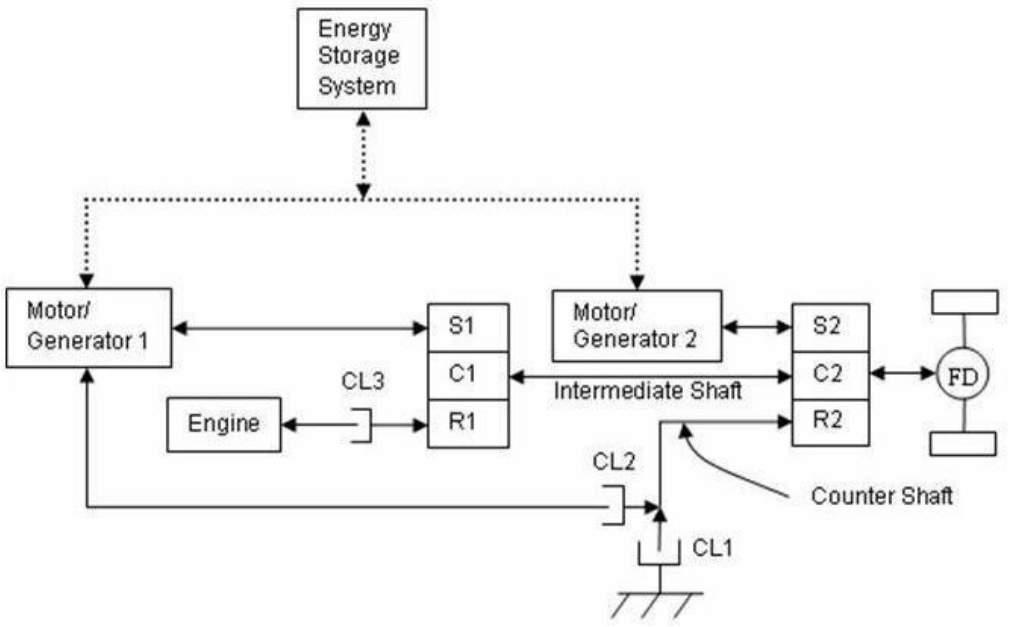


Рис. 1. Структурна схема багаторежимного силового агрегату [US6478705]

Конфігурація багаторежимного силового агрегату містить два пристрої поділу

потоків потужності (PSD), три муфти та два мотор-генератори. PSD позначаються мітками "S", "C" і "R" для сонячної шестерні, водила і коронної шестерень відповідно.

У конструкції:

- двигун через муфту (CL3) з'єднаний з коронною шестернею першої планетарної передачі (R1);
- перший мотор-генератор (MG1) безпосередньо з'єднаний із сонячною шестернею першої планетарної передачі (S1), а також через проміжний вал і муфту (CL2) з коронною шестернею другої планетарної передачі (R2);
- перше (C1) та друге (C2) водила безпосередньо з'єднані з карданним валом;
- коронна шестерня другої планетарної передачі (R2) з'єднана з нерухомим елементом через муфту (CL1);
- другий мотор/генератор (MG2) з'єднаний із сонячною шестернею другої планетарної передачі (S2).

Трирежимна структура силової установки здатна працювати як електромобіль (EV) або в одному з двох режимів розподілу потужності [5]. Повністю електричний режим (AER) можливий завдяки конфігурації EV. AER обмежується за допомогою електронного блоку управління (ECU) на низьких швидкостях та потужностях для виключення небажаного виснаження системи накопичення енергії (ESS). AER практично завжди використовується виключно для початку руху транспортного засобу. Робота EV активується шляхом відключення муфти CL3 і подачею системи накопичення енергії ESS енергії на другий мотор-генератор MG2, який, у свою чергу, рухає колеса. Двигун і перший мотор-генератор MG1 вимкнено.

Для розділення потоків потужності муфта CL3 включається разом з однією з двох інших муфт. Двигун також запускається та починає виробляти енергію [6].

Два режими поділу потоків потужності охоплюють умови низької та високої швидкості відповідно. Низько швидкісний режим спрацьовує при включенні муфти CL1 та вимкнення муфти CL2. Ця дія відключає перший мотор-генератор MG1 від другого пристроєм поділу потоків потужності PSD, фіксує коронну шестерню другої планетарної передачі R2 і в результаті відбувається поділ вхідного потоку. Цей режим використовується, коли необхідна швидкість не може бути отримана за допомогою AER, але і не є, власне, високою [7].

Дорожня обстановка та бажання водія визначатимуть рівень потужності силового агрегату і, отже, ту швидкість, з якою режими змінюватимуться [8].

Слід зазначити, що на низько-швидкісному режимі схема практично ідентична конструкції автомобіля Toyota Prius THS. Два наявні відмінності в конструкціях полягають у з'єднанні двигуна з коронною шестернею першої зубчастої передачі і тип вихідного зубчастого зачеплення: у конструкції General Motors використовується PSD з нерухомим коронним зубчастим колесом, а в THS використовується звичайна зубчаста передача [9].

Високошвидкісний режим включається при перевищенні швидкості, позначеної як V-перекл., шляхом відключення муфти CL1 та увімкнення муфти CL2. Це з'єднує перший мотор-генератор MG1 з коронною шестернею другої планетарної передачі R2. Цей режим має два вузли, перший із яких є загальним для низько-швидкісного режиму, а другий, позначений як VS3, має більш високе співвідношення - вихідна/вхідна швидкість. Додатковий вузол забезпечує ефективнішу роботу на високих швидкостях.

Слід зазначити, що представлені ті режими, що забезпечують рух транспортного засобу вперед, хоча також можливі і режими із заднім ходом автомобіля [10].

Режим заряджання системи накопичення енергії ESS, у якому відсутня рух, досягається шляхом застосування механічних гальм для запобігання будь-якому

переміщенню. Дві інші важливі швидкості при високошвидкісному режимі позначені як VS2 та VS4. VS2 - це швидкість, де другий мотор-генератор MG2 починає працювати як генератор. VS4 - це та швидкість, після якої обидва мотор-генератори працюють як мотори [11]. Активація цих двох швидкостей залежатиме від стану заряду (SOC) батареї; якщо рівень заряду батареї залишається досить високим, обидва мотор-генератори можуть працювати як мотори для отримання додаткової потужності [12].

Формулювання мети досліджень

Метою даної роботи було розкрити перспективи застосування багаторежимних гібридних силових агрегатів автомобілів в умовах аграрних підприємств.

Методичний підхід в проведенні досліджень

Дослідження гібридних трансмісій транспортних засобів зосереджено на розробці їх віртуальних прототипів [13].

Інструменти комп'ютерного моделювання, що використовуються для дослідження, є пакетами програмного забезпечення. Так, програмне забезпечення MATLAB від компанії The Math Works застосовують для комп'ютерного моделювання. Це програмне забезпечення широко використовується багатьма галузями промисловості для наукових досліджень. Програмне забезпечення має опціональний набір оптимізації інструментів, який використовується для математичної оптимізації.

Друге програмне забезпечення розроблене Національною лабораторією відновлюваної енергії (NREL) у 1994 році (і постійно вдосконалюється за допомогою процесу з відкритим вихідним кодом) для моделювання та оптимізації транспортних засобів, відомого як ADvanced VehIcle SimulatOR (ADVISOR). ADVISOR був заснований на платформі MATLAB/Simulink, що робить його використання гнучким для поєднання процедур оптимізації. Програмне забезпечення ADVISOR було відкритим вихідним кодом, в якому велика кількість дослідницьких груп зробила свій внесок у бібліотеки моделей, що дозволило інструменту стати галузевим стандартом.

Третій інструмент проектування – LSVTF, у якому можна виконати експериментальну перевірку результатів моделювання та симуляції. Засіб дозволяє відтворювати точні результати контрольованого середовища [14].

Щоб порівняти та проаналізувати продуктивність багаторежимної конфігурації, було проведено імітаційне моделювання, в якому багаторежимна модель порівнювалася з моделями THS, гібридного та звичайного силового агрегату.

Конфігурації транспортних засобів були змодельовані з використанням мови програмування MATLAB/Simulink та за допомогою інтегрованого комплексу для симуляції та аналізу руху автомобіля ADVISOR. Версія, що використовується - це версія 2002 року з відкритим вихідним кодом. ADVISOR дозволяє виконувати стаціонарне моделювання, яке не здатне імітувати перехідні процеси. Тому динамічні процеси не враховуються, і поведінка компонентів між станами, що встановилися, не може бути нами проаналізовано.

ADVISOR містить велику бібліотеку різних типів транспортних засобів, у тому числі можна вибрати необхідний. Базові моделі для THS, гібрида з паралельним проводом та стандартного силового агрегату були прийняті за основу, і згодом змінені, щоб продемонструвати бажані характеристики транспортних засобів, що досліджуються. Багаторежимну модель було розроблено шляхом значної модернізації моделі THS.

Кузов транспортного засобу, вибраного для моделювання, заснований на

вантажівці Kenworth T400, типовому комерційному транспортному засобі. Характеристики автомобіля, включаючи всі компоненти, крім компонентів силової передачі, наведено у таблиці 1. Дві різні ваги базового транспортного засобу розглядаються для випадків, коли транспортний засіб має корисне навантаження (завантажений) або не має корисного навантаження (не завантажений).

Таблиця 1

Характеристики модельованого автомобіля

Компонент	Характеристика
Колісна база	9,75 м
Радіус колеса	0,5 м
Вага транспортного засобу (не завантажена)	5933 кг
Вага транспортного засобу (завантажена)	11333 кг
Коефіцієнт опору коченню	0,00938
Аеродинамічний коефіцієнт	0,7
Площа лобового опору	8,55 $м^2$

Всі чотири конфігурації, що моделюються, використовують двигун із запаленням від стиснення (CI) з меншим розміром двигуна для трьох гібридних моделей. Моделі багаторежимні та THS мають практично однакові компоненти силових установок, а при паралельній конфігурації включені ті ж моделі двигуна і мотор-генератора.

Оскільки чотири різних конфігурації матимуть різну вагу, була спроба врахувати ці відмінності. У дослідженні, проведеному науково-дослідним інститутом електроенергетики, вага силового агрегату звичайного транспортного засобу була на 20% меншою, ніж у силової установки гібридного транспортного засобу з паралельною схемою. Ця різниця була врахована у цьому дослідженні. Крім того, передбачалося, що силові установки THS та багаторежимні силові установки були важчими, ніж у стандартного транспортного засобу на 25 % та 27 % відповідно. Останні два припущення про вагу були зроблені дещо довільно; однак припущення відображають оцінки ваги додаткових мотор/генераторів (MG), силової електроніки та пристрої розподілу потоків потужності (PSD). Також необхідно звернути увагу, що представлені значення потужності двигунів є номінальними, а не піковими.

Результати досліджень

Для порівняння було обрано різні цикли при їзді, які представляють типові умови роботи важких комерційних автомобілів. Витрата палива вимірювали протягом циклів, представлених на рисунку 1, та описані в посібнику з програмного забезпечення ADVISOR. Ці цикли при їзді включають:

1) Міський трафік руху для транспортних засобів великої вантажопідйомності (UDDSHDV), що представляє ідеалізований міський трафік руху для важких транспортних засобів. Цикл включає середньо або високошвидкісний рух з

періодичними повними зупинками. Пікова швидкість циклу становить 93,3 км/годину, а середня швидкість 30,3 км/годину за інтервал 1061 с. Пікове прискорення становить 2,0 м/с^2.

2) Міський приміський маршрут для важких транспортних засобів (CSHVR) – сукупність коротких поїздок, типових для транспортних засобів великої вантажопідйомності. Швидкості варіюються від повільних приміських швидкостей до найвищих міських швидкостей. Пікова швидкість циклу становить 70,5 км/год та середня швидкість 21,8 км/год. Пік прискорення становить 1,2 м/с^2, а тривалість циклу 1781 с.

Результати дослідження показують, що багаторежимні зміни є перспективними для використання у важких транспортних засобах з різним ступенем корисного навантаження. Результати моделювання витрати палива представлені рисунку 3.2 для випадку без навантаження і рисунку 3.3 випадку з навантаженням. Як видно з малюнків, модель багаторежимного транспортного засобу перевершила автомобілі THS та автомобілі зі звичайними силовими агрегатами у всіх циклах їзди та за всіма умовами завантаження.

Середня відсоткова різниця між витратою палива, досягнутим у багаторежимному та звичайному виконанні, становить 22,4%, при цьому найбільша різниця спостерігається при CSHVR (при завантаженні) – 57,8%.

Середня відсоткова різниця між витратою палива, досягнутим у багаторежимному та THS-виконанні, становить 65,1%, при цьому найбільша різниця спостерігається для CSHVR (без завантаження) – 88,1%.

Мультирежим не дозволяє знизити витрату палива в середньому порівняно з гібридом із паралельним приводом. Середня відсоткова різниця між багаторежимним та паралельним виконанням становить 3,3%, при цьому найбільша різниця спостерігається для NYCT (з навантаженням) – 20,1%.

Тим не менш, багаторежимне виконання перевершує паралельне у чотирьох випадках: UDDSHDV (без навантаження) – 1,2%; CSHVR (без навантаження) – 11,6%; HWFET (без навантаження) – 9,6%; та HWFET (завантажений) - 4,7%. Таким чином, багаторежимне виконання силової установки є найкращим для пересування шосе.

Паралельна схема гібридного транспортного засобу як найбільш поширена конструкція гібрида для комерційних транспортних засобів продемонструвала найкращу загальну продуктивність і середню відсоткову різницю у витраті палива на 25,6% порівняно зі звичайною конструкцією силового агрегату.

Моделювання багаторежимної конфігурації також необхідно детально проаналізувати. Як приклад було обрано цикл приводу CSHVR із завантаженими та незавантаженими умовами роботи. На рисунку 1 показано потужність двигуна протягом усього циклу їзди. Як і очікувалося, вимоги до потужності двигуна значно вищі за повного завантаження - в середньому на 18,9 кВт.

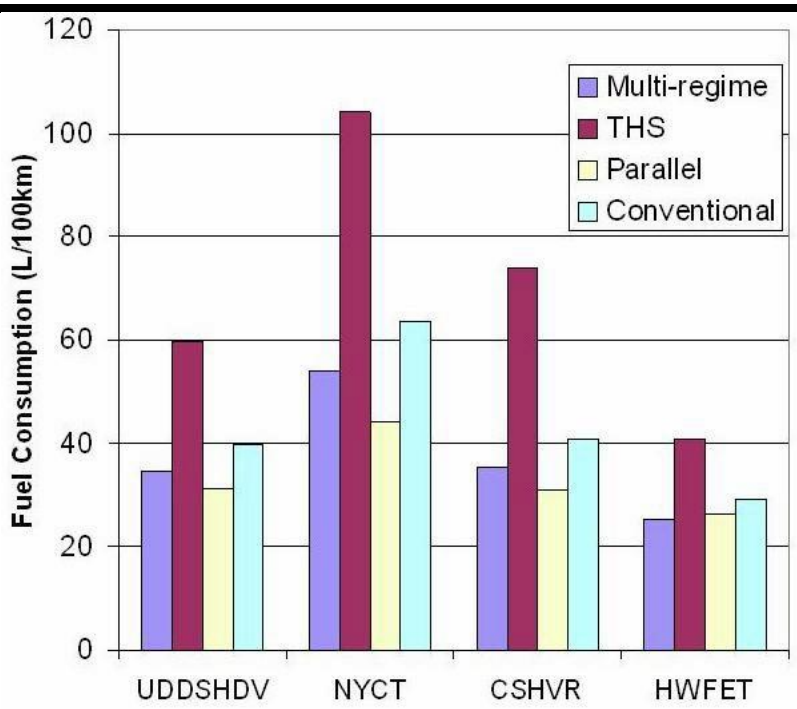


Рис. 1. Результати моделювання ICEHV: витрата палива у завантаженому автомобілі

На рисунку 2 показано потужність першого мотор-генератора MG1 протягом усього циклу руху. Як і у випадку з потужністю двигуна, навантажений автомобіль вимагає від мотор-генератора більшої потужності – в середньому 7,4 кВт та вище.

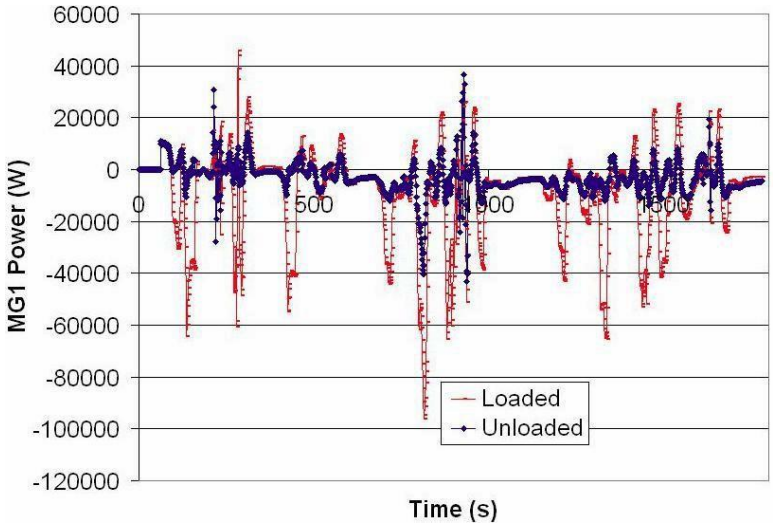


Рис. 2. Результати моделювання ICEHV: потужність першого мотор-генератора з багаторежимною конфігурацією силової установки на трасі "Місто-передмістя"

На рисунку 2 показано потужність другого мотор-генератора MG2 протягом усього циклу руху. Тут також навантажений автомобіль вимагає від мотор-генератора більшої потужності – у середньому на 6,8 кВт вище.

Рис. 3 зображує стан заряду системи накопичення енергії (ESS SOC) протягом усього циклу руху. У цьому випадку середнє значення стану заряду (SOC) для незавантаженого автомобіля несподівано нижче, ніж у завантаженого. Середня різниця між двома випадками становить 1,6%. Невідомо, чи є цей результат похибкою моделювання при керуванні живленням або робота двигуна в незавантаженому

автомобілі менш ефективна за умов моделювання.

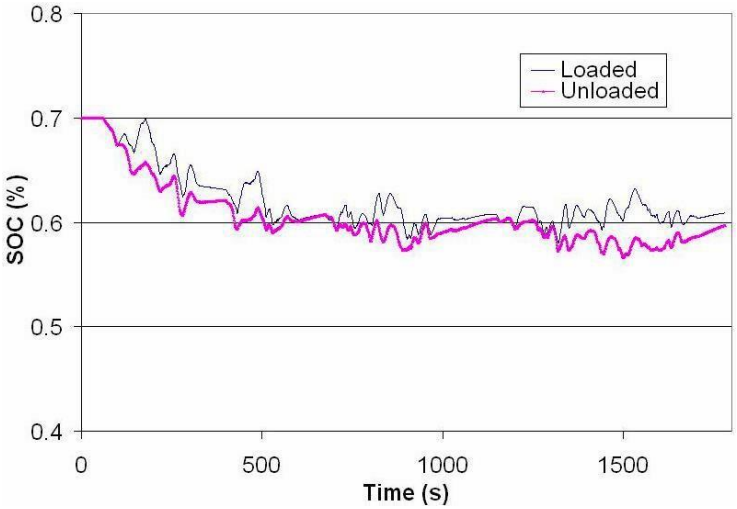


Рис. 3. Результати моделювання ICEHV: ESS SOC-крива з багаторежимною конфігурацією силової установки на трасі "Місто-передмістя"

Результати моделювання показують, що багаторежимна і паралельна конфігурації помітно впливають на поліпшення характеристик витрати палива в порівнянні з базовим стандартним транспортним засобом. Однорежимна конфігурація працює погано на відміну інших трьох. Паралельна конфігурація забезпечує найнижчу витрату палива в цілому, однак рівень, досягнутий при багаторежимній конфігурації в цілому не гірший.

Висновки

1. Аналіз результатів моделювання дозволяє зробити кілька висновків. По-перше, було показано, що багаторежимна конфігурація є досить перспективним проектом для поліпшення витрати палива, особливо в транспортних засобах з умовами завантаження, що сильно змінюються (наприклад, комерційних вантажівках). Як видно, спроба моделювання показала результати максимально наближені до продуктивності найпоширенішого гібрида з паралельним приводом важких транспортних засобах. Дослідження продемонструвало потенційні переваги вдосконаленої концепції багаторежимного проектування порівняно з однорежимними конфігураціями.

2. По-друге, стратегія керування живленням гібридних транспортних засобів є важливою сферою для потенційного покращення. Оскільки гібриди з паралельним приводом є набагато поширенішими, то і стратегії моделювання та контролю мають мінімальну кількість припущень. Що стосується продуктивності однорежимної конфігурації, то напрошується висновок про те, що існуюча стратегія управління живленням, реалізована в ADVISOR не може бути застосована до великого комерційного транспорту. Результат не говорить про те, що ця конфігурація в принципі не підходить для більш важких транспортних засобів. При правильно вибраній стратегії управління живленням конфігурація може перевершити продуктивність навіть гібрида з паралельним приводом, хоча, ймовірно, вона не зможе покращити витрату палива, досягнуту на гібриді з багаторежимною конфігурацією силової установки.

3. Подальше моделювання має бути зосереджено на розробці стратегії управління живленням багаторежимної конфігурації, тим більше, що вона забезпечує більше можливостей для підвищення продуктивності, ніж однорежимна структура.

Проведені дослідження можуть бути корисними на провідних виробничих майданчиках для вантажних та пасажирських перевезень, які будуть експлуатуватись в аграрних підприємствах.

Список використаних джерел

1. Khateeb, S. Design і simulation of lithium-ion battery with phase change material thermal management system for electric scooter / S. Khateeb, M. Farid, J. Selman, S. Al-Hallaj // Journal of Power Sources. 2014. № 128. P. 292-307.

2. Tesla Roadster [Електронний ресурс]. - URL:https://www.tesla.com/roadster.

3. Wouk, V. Hybrids є coming! / V. Wouk // Proceedings of the 2020 17th International Electric Vehicle Symposium. - Montreal, QC.

4. L. Horrein, A. Bouscayrol, M. El-Fassi. Thermal energetic model of an Internal Combustion Engine for simulation of a thermal vehicle. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Seoul, 2012. P. 978–983.

5. Nazarenko I., Dedov O., Bernyk I., Rogovskii I., Bondarenko A., Zapryvoda A., Titova L. Study of stability of modes and parameters of motion of vibrating machines for technological purpose. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Vol. 6 (7-108). P. 71-79. doi:10.15587/1729-4061.2020.217747.

6. Wu, J. Toward the optimization of operating conditions for hydrogen polymer electrolyte fuel cells / J. Wu, Q. Liu, H. Fang // Journal of Power Sources. 2016. № 156. P. 388-399.

7. Wang, G. Adaptive Response Surface Method - Global Optimization Method Scheme for Approximation-based Design Problems / G. Wang, Z. Dong // Journal of Engineering Optimization. 2021. № 33. P. 707-734.

8. Xue, D. Optimal fuel cell system design considering functional performance and production costs / D. Xue, Z. Dong // Journal of Power Sources. 2018. № 76. P. 69-80.

9. Godat, J. Optimization of fuel cell system using process integration techniques / J. Godat, F. Marechal // Journal of Power Sources. 2016. № 118. P. 411-423.

10. Frangopoulos, C. Розробка моделі для thermoeconomic design і функціонування optimization of PEM fuel cell system / C. Frangopoulos, L. Nakos // Energy. 2015. № 31. P. 1501-1519.

11. A. De Luca, G. Oriolo Modelling and control of nonholonomic mechanical systems. Kinematics and Dynamics of Multi-Body Systems (J. Angeles, A. Kecs-kemethy Eds.). Springer-Verlag, 1995. P. 301–305.

12. Geradin M., Cardona A. Kinematics and dynamics of rigid and flexible mechanisms using finite elements and quaternion algebra. Computational Mechanics. 1988. Vol. 4. P. 115–135.

13. Wong J. Y. Theory of ground vehicles: 4th ed. Wiley, 2008. 592 p.

14. Classification of agricultural tractors according to the energy efficiencies of the engine and the transmission based on OECD tests / J. Ortiz-Cañavate, J. Gil-Sierra, J. Casanova-Kindelán, V. Gil-Quirós. Applied Engineering in Agriculture. 2009. № 25 (4). P. 475–480.

References

1. Khateeb, S. (2014). Design і simulation of lithium-ion battery with phase change material thermal management system for electric scooter / S. Khateeb, M. Farid, J. Selman, S. Al-Hallaj // Journal of Power Sources. № 128. P. 292-307.

2. Tesla Roadster [Електронний ресурс]. - URL:https://www.tesla.com/roadster.

3. Wouk, V. (2000). Hybrids є coming! / V. Wouk // Proceedings of the 2020 17th International Electric Vehicle Symposium. - Montreal, QC.

4. L. Horrein, A. Bouscayrol, M. El-Fassi. (2012). Thermal energetic model of an Internal Combustion Engine for simulation of a thermal vehicle. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Seoul, P. 978–983.

5. Nazarenko I., Dedov O., Bernyk I., Rogovskii I., Bondarenko A., Zapryvoda A., Titova L. (2020). Study of stability of modes and parameters of motion of vibrating machines for technological purpose. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 6 (7-108). P. 71-79. doi:10.15587/1729-4061.2020.217747.

6. Wu, J. (2016). Toward the optimization of operating conditions for hydrogen polymer electrolyte fuel cells / J. Wu, Q. Liu, H. Fang // Journal of Power Sources. № 156. P. 388-399.

7. Wang, G. (2021). Adaptive Response Surface Method - Global Optimization Method Scheme for Approximation-based Design Problems / G. Wang, Z. Dong // Journal of Engineering Optimization. № 33. P. 707-734.

8. Xue, D. (2018). Optimal fuel cell system design considering functional performance and production costs / D. Xue, Z. Dong // Journal of Power Sources. № 76. P. 69-80.

9. Godat, J. (2016). Optimization of fuel cell system using process integration techniques / J. Godat, F. Marechal // Journal of Power Sources. № 118. P. 411-423.

10. Frangopoulos, C. (2015). Розробка моделі для thermoeconomic design і функціонування optimization of PEM fuel cell system / C. Frangopoulos, L. Nakos // Energy. № 31. P. 1501-1519.

11. A. De Luca, G. (1995). Oriolo Modelling and control of nonholonomic mechanical systems. Kinematics and Dynamics of Multi-Body Systems (J. Angeles, A. Kecskemethy Eds.). Springer-Verlag. P. 301–305.

12. Geradin M., Cardona A. (1988). Kinematics and dynamics of rigid and flexible mechanisms using finite elements and quaternion algebra. Computational Mechanics. Vol. 4. PP. 115–135.

13. Wong J. Y. (20087). Theory of ground vehicles: 4th ed. Wiley, 2008. 592 p.

14. J. Ortiz-Cañavate, J. Gil-Sierra, J. Casanova-Kindelán, V. Gil-Quirós (2009). Classification of agricultural tractors according to the energy efficiencies of the engine and the transmission based on OECD tests. Applied Engineering in Agriculture. № 25 (4). P. 475–480.

Роговський І.Л.[1]
Кісь-Коркіщенко Л.В.[2]
[1]Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна
[2]Державний біотехнологічний університет,
м. Харків, Україна
E-mail:
rogovskii@nubip.edu.ua

ОСОБЛИВОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ МЕТАНТЕНКА БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ

https://doi.org/10.37700/ts.2024.25.270-281

УДК 629.4

Роговський І.Л., Кісь-Коркіщенко Л.В. ***Особливості функціонування метантенка біогазової установки.***

Анотація. *В статті розкрито особливості методичного обґрунтування особливостей функціонування метантенка біогазової установки. Ідея наукової роботи полягає у використанні відходів і побічних продуктів переробних виробництв, які будуть впроваджені в сільській місцевості, в якості косубстратів при метановому зброджуванні побічної продукції тваринництва, що збільшить вихід біогазу та підвищить ефективність біогазових виробництв та вирішить проблему утилізації цих відходів. В результаті аналізу існуючих математичних моделей процесу отримання біогазу встановлено, що в умовах ідеального перемішування субстрату і постійної температури, головними факторами, що впливають на протікання метаногенезу, є час процесу, а також концентрація метаногенів, поживних речовин субстрату і продуктів метаболізму (біогазу). Математична модель процесу отримання біогазу в загальному випадку містить систему диференційних рівнянь, спільне вирішення яких дозволяє при заданих початкових умовах знайти зміну в часі концентрації метаногенів, поживних речовин субстрату і продуктів метаболізму (біогазу).*

Ключові слова: *установка, модель, біогаз.*

Rogovskii I.L., Kis-Korkishchenko L.V. ***Features of the functioning of the biogas plant methane tank.***

Abstract. *The article reveals the features of the methodological justification of the features of the functioning of the biogas plant methane tank. The idea of the scientific work is to use waste and by-products of processing industries, which will be implemented in rural areas, as co-substrates in methane fermentation of livestock by-products, which will increase the biogas yield and increase the efficiency of biogas production and solve the problem of disposal of these wastes. As a result of the analysis of existing mathematical models of the biogas production process, it was established that under conditions of ideal substrate mixing and constant temperature, the main factors affecting the course of methanogenesis are the process time, as well as the concentration of methanogens, substrate nutrients and metabolic products (biogas). The mathematical model of the biogas production process generally contains a system of differential equations, the joint solution of which allows, under given initial conditions, to find the change in time of the concentration of methanogens, substrate*

nutrients and metabolic products (biogas).
Key words: *installation, model, biogas.*

Постановка проблеми

Найбільш поширеним методом утилізації побічної продукції тваринництва (гною) є використання її для покращення родючості ґрунтів [1]. Однак, патогенні організми і яйця гельмінтів [2], які перебувають у гнойовій біомасі, можуть тривалий час зберігатися в зовнішньому середовищі, що може бути причиною епідемій та епізоотій [3]. Забезпечення ветеринарно-санітарного благополуччя у цьому випадку можна досягти внаслідок знезараження відходів тваринництва термічною стерилізацією за високої температури, що є енергомісним заходом [4]. Разом із тим, метанове зброджування гною, особливо в термофільному режимі, дозволяє його ефективно знезаражувати [5]. При цьому утворюється біогаз, який може бути використаний як для підтримання температурного режиму метантенка, так і для отримання електроенергії за наступним її продажем [6]. Переброджений знезаражений гній доцільно використовувати для підвищення родючості ґрунтів і відновлення у них гумусу [7]. Разом із тим, вихід біогазу при метановому зброджуванні деяких побічних продуктів тваринництва (наприклад, гною великої рогатої худоби), відносно невеликий, що не дозволяє забезпечити високу рентабельність виробництва [8]. Разом із тим, у сільській місцевості можна розвивати переробні виробництва аграрної продукції (молокопереробку, виробництво крохмалю із картоплі, олії із олієвмісних культур тощо). Це дозволить частково вирішити проблему безробіття в сільській місцевості, покращить матеріальний стан сільських жителів [9]. Але при переробці переробних підприємств отримуються відходи і побічні продукти (мезга, клітковий сік картоплі, сироватка, фуз тощо), які важко піддаються утилізації. Разом із тим, ці відходи і побічні продукти є чудовим косубстратом для гною великої рогатої худоби при його метановому зброджуванні в біогазовій установці, вихід біогазу [10]. А переброджений субстрат біогазової установки буде вноситись на поля для відновлення родючості ґрунту. Це вирішить проблему утилізації відходів і побічних продуктів переробних підприємств у сільській місцевості [11].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Ідея наукової роботи полягає у використанні відходів і побічних продуктів переробних виробництв, які будуть впроваджені в сільській місцевості, в якості косубстратів при метановому зброджуванні побічної продукції тваринництва, що збільшить вихід біогазу та підвищить ефективність біогазових виробництв та вирішить проблему утилізації цих відходів [12].

Впровадження в агропромислових підприємствах та в сільській місцевості біогазових технологій дозволить отримати енергетично цінний біогаз, який можна конвертувати в електричну і теплову енергію. Вироблену електроенергію можна подавати для живлення обладнання агропромислових підприємств, а також в житло сільського населення [13]. Теплова енергія буде використовуватись для підтримання теплового режиму метантенка, і частково для гарячого водоспоживання. Сировиною для виробництва біогазу в агропромислових підприємствах і в сільській місцевості буде побічна продукція тваринництва, а також відходи і побічні продукти переробних підприємств, які функціонуватимуть на території сіл і селищ і перероблятимуть продукцію рослинництва і тваринництва. Використання косубстратів (відходів і побічних продуктів переробних виробництв) дозволить збільшити вихід біогазу в

кілька разів, що знизить термін окупності біогазової установки [14]. Щоб знизити транспортні витрати від перевезення косубстратів на значні відстані, буде обґрунтовано доцільність улаштування переробних виробництв безпосередньо на території сільськогосподарських підприємств, внаслідок чого підвищиться ефективність біогазових установок, а також буде частково вирішено нагальну проблему зайнятості населення у сільській місцевості. Відходи біогазового виробництва (дигестат, фільтрат) запропоновано використовувати для відновлення родючості ґрунтів та підживлення посівів, а після впровадження відповідних стандартів – для продажу населенню як високоякісного органічного добрива [15].

Формулювання мети досліджень

Метою дослідження є методичне обґрунтування особливостей функціонування метантенка біогазової установки.

Методичний підхід в проведенні досліджень

Метантенк біогазової установки функціонує наступним чином. Метаноутворюючі бактерії, які містяться в субстраті, споживають його поживні речовини, виділяючи при цьому продукти метаболізму – біогаз (рис. 1: 1 – поживні речовини субстрату, що завантажуються в метантенк; 2 – поживні речовини субстрату, які вивантажуються із метантенка; 3 – поживні речовини субстрату, які переробляються метаноутворюючими бактеріями; 4 – поживні речовини субстрату, які переробляються метаноутворюючими бактеріями в мікробну біомасу; 5 – поживні речовини субстрату, які переробляються метаноутворюючими бактеріями в біогаз; 6 – розмноження метаноутворюючих бактерій; 7 – відмирання метаноутворюючих бактерій; 8 – вихід біогазу).

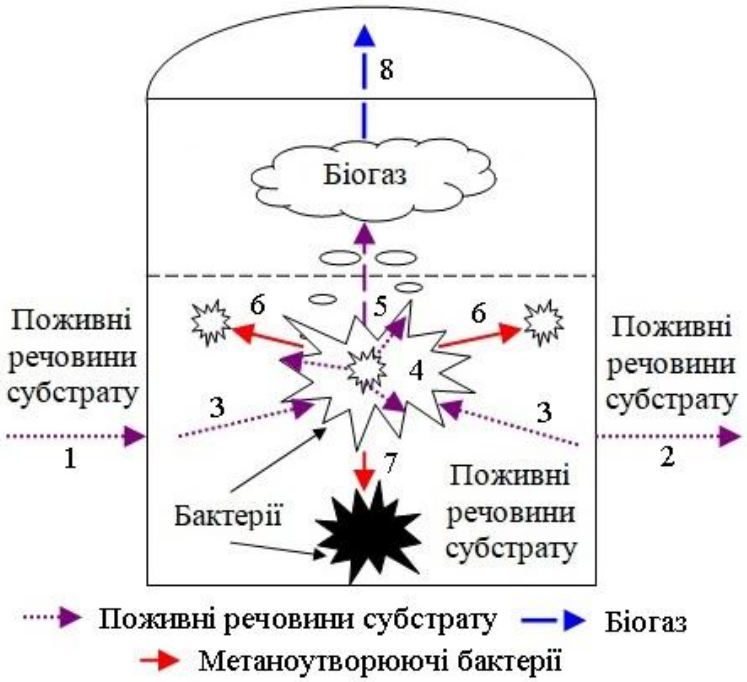


Рис. 1. Схема функціонування метантенка біогазової установки.

Поживні речовини субстрату в метантенку можна розділити на три складові (рис. 1): поживні речовини субстрату 1, що завантажуються в метантенк, поживні

речовини субстрату 2, які вивантажуються із метантенка, і поживні речовини субстрату 3, які переробляються наступним чином. метаноутворюючими бактеріями і перетворюються в мікробну біомасу 4 і продукти метаболізму (біогаз) 5. наступним чином. Метаноутворюючі бактерії при достатній кількості поживні речовини субстрату активно розмножуються 6, при їх відсутності – гинуть 7. Біогаз 8 виробляється метаноутворюючими бактеріями при споживанні поживних речовин субстрату.

Результати досліджень

В умовах ідеального перемішування субстрату і постійної температури, головними факторами, що впливають на протікання метаногенезу, є час процесу, а також концентрація метаногенів, поживних речовин субстрату і продуктів метаболізму (біогазу). Математична модель процесу отримання біогазу в загальному випадку містить систему диференційних рівнянь, спільне вирішення яких дозволяє при заданих початкових умовах знайти зміну в часі всіх основних параметрів біотехнологічного процесу:

$$\begin{cases} \dfrac{dC}{dt} = C(t) \\ \dfrac{dS}{dt} = S(t) \\ \dfrac{dV_б}{dt} = V_б(t) \end{cases} . \qquad (1)$$

де: C – концентрація біомаси метаноутворюючих бактерій, кг/м^3; S – концентрація поживних речовин субстрату що, засвоюються бактеріями, кг/м^3; $V_б$ – об'єм отриманого біогазу, м^3; t – час метанового бродіння, діб; dC/dt – зміна концентрації в метантенку біомаси метаноутворюючих бактерій в часі, кг/м^3·добу; dS/dt – зміна концентрації в метантенку поживних елементів субстрату в часі, кг/м^3·добу; dV/dt – динаміка виходу біогазу в часі, м^3/кг·добу (м^3 біогазу з кг субстрату за добу).

Поживні елементи субстрату в метантенку можна розділити на три складові: поживні елементи, які завантажуються в метантенк, поживні елементи, які вивантажуються із метантенка, і поживні елементи, які переробляються метаноутворюючими бактеріями і перетворюються в мікробну біомасу і продукти метаболізму (біогаз):

$$\frac{dS}{dt} = \left(\frac{dS}{dt}\right)_{inp} - \left(\frac{dS}{dt}\right)_{out} - \left(\frac{dS}{dt}\right)_{conv}, \qquad (2)$$

де dS/dt – зміна концентрації в метантенку поживних елементів субстрату в часі, кг/м^3·добу; $(dS/dt)_{inp}$ – зміна концентрації поживних елементів в часі, завантажених із субстратом в метантенк, кг/м^3·добу; $(dS/dt)_{out}$ – зміна концентрації поживних елементів в часі, вивантажених із субстратом із метантенка, кг/м^3·добу; $(dS/dt)_{conv}$ – зміна концентрації поживних елементів субстрату, перероблених метаноутворюючими бактеріями, кг/м^3·добу.

Зміна концентрації поживних елементів в часі, завантажених із субстратом в метантенк $(dS/dt)_{inp}$, визначається за формулою:

$$\left(\frac{dS}{dt}\right)_{inp} = p \cdot S_0, \qquad (3)$$

де p – коефіцієнт розбавлення культури потоком свіжого субстрату (відносна швидкість

надходження субстрату), діб$^{-1}$; S_0 – початкова концентрація поживних речовин в субстраті, кг/м^3.

Зміна концентрації поживних елементів в часі, вивантажених із субстратом із метантенка $(dS/dt)_{out}$, визначається за формулою:

$$\left(\frac{dS}{dt}\right)_{out} = p \cdot S, \tag{4}$$

де S – концентрація поживних речовин в субстраті, кг/м^3.

Концентрація поживних елементів субстрату, перероблених метаноутворюючими бактеріями $(dS/dt)_{conv}$, зменшується на кількість поживних елементів субстрату, що витрачається на формування клітинної маси бактерій, на енергію для життєдіяльності бактерій і на виробництво продуктів метаболізму і визначається за формулою:

$$\left(\frac{dS}{dt}\right)_{conv} = \left(\frac{dS}{dt}\right)_{КБ} + \left(\frac{dS}{dt}\right)_{E} + \left(\frac{dS}{dt}\right)_{V}, \tag{5}$$

де $(dS/dt)_{КБ}$ – зміна концентрації поживних елементів в часі, перероблених бактеріями і використаних на формування їх клітинної біомаси, кг/м^3·добу; $(dS/dt)_E$ – зміна концентрації поживних елементів в часі, перероблених бактеріями і використаних на виробництво енергії для підтримання їх життєдіяльності, кг/м^3·добу; $(dS/dt)_V$ – зміна концентрації поживних елементів в часі, перероблених бактеріями і використаних на виробництво біогазу, кг/м^3·добу.

Зміна концентрації поживних елементів в часі, перероблених бактеріями і використаних на формування їх клітинної біомаси $(dS/dt)_{КБ}$, визначається за формулою:

$$\left(\frac{dS}{dt}\right)_{КБ} = k_\alpha \cdot \mu_m \cdot C, \tag{6}$$

де k_α – безрозмірний коефіцієнт засвоєння субстрату; μ_m – максимальна питома швидкість росту метаноутворюючих бактерій, доба$^{-1}$; C – концентрація біомаси метаноутворюючих бактерій, кг/м^3.

Зміна концентрації поживних елементів в часі, перероблених бактеріями і використаних на виробництво енергії для підтримання їх життєдіяльності, $(dS/dt)_E$, визначається за формулою:

$$\left(\frac{dS}{dt}\right)_{E} = \frac{k_\beta \cdot \mu_m \cdot S}{k_a + S} \cdot C, \tag{7}$$

де k_β – безрозмірний коефіцієнт засвоєння субстрату; μ_m – максимальна питома швидкість росту метаноутворюючих бактерій, доба$^{-1}$; S – концентрація поживних речовин в субстраті, кг/м^3; C – концентрація біомаси метаноутворюючих бактерій, кг/м^3.

Зміна концентрації поживних елементів в часі, перероблених бактеріями і використаних на виробництво біогазу $(dS/dt)_V$, визначається за формулою:

$$\left(\frac{dS}{dt}\right)_{V} = k \cdot \rho_б \cdot \frac{dV_б}{dt}, \tag{8}$$

де k – коефіцієнт перетворення поживних речовин субстрату в біогаз, кг/кг; $\rho_б$ – щільність біогазу, кг/м^3; $dV_б/dt$ – динаміка виходу біогазу в часі, м^3/м^3·добу.

Модель зміни концентрації в метантенку поживних елементів субстрату в часі dS/dt, отримуємо шляхом підстановки в формулу (2) виразів (3), (4), (5), (6), (7) і (8):

$$\frac{dS}{dt} = p \cdot (S_0 - S) - \left(k_\alpha \cdot \mu_m \cdot C + \frac{k_\beta \cdot \mu_m \cdot S}{k_a + S} \cdot C + k \cdot \rho_б \cdot \frac{dV_б}{dt} \right). \quad (9)$$

Початкова концентрація поживних речовин в субстраті S_0 залежить від вологості W, зольності A та об'ємної щільності субстрату $\rho_{суб}$ у наступному співвідношенні:

$$S_0 = \frac{\rho_{суб} \cdot (100 - W)}{100 - A}, \quad (10)$$

де $\rho_{суб}$ – об'ємна щільність субстрату, кг/м^3; W – вологість субстрату, %; A – зольність субстрату, %.

Завантаження метантенка в 1 кг СОР/м^3 за день проблем із роботою, як правило, не становить. На практиці часто зустрічається завантаження ферментатора в 2-3 кг СОР/м^3 за день. При цьому необхідно спостерігати, чи не розпочалося зменшення виходу газу внаслідок затримки розвитку бактерій. Якщо завантаження метантенка становить 4-5 кг СОР/м^3 за день, то продуктивність бактерій може зменшуватись, що призводить до зниження виробництва біогазу. При цьому система буде перевантаженою. Існує інформація, що завантаження горизонтального ферментатора, що працює в проточному режимі, може досягати до 10 кг СОР/м^3 за день. Однак такі показники завантаження можливі лише при наявності другого метантенка, в якому б відбувалось добродження субстрату.

Найбільш поширені моделі, що описують кінетику залежно від концентрації лише одного субстрату, який називають лімітуючим; вважається, що інші субстрати при цьому знаходяться в надлишку і не впливають на швидкість росту. Найпростіша кінетична математична модель концентрації біомаси мікроорганізмів описується простою моделлю Мальтуса або моделлю експоненціального росту:

$$\frac{dC}{dt} = \mu \cdot C, \quad (11)$$

де C – концентрація бактерій, кг/м^3; μ – питома швидкість росту метаноутворюючих бактерій, доба$^{-1}$ (цей параметр аналогічний складним процентам; наприклад, питома швидкість росту 0,1 доба$^{-1}$ еквівалентна швидкості росту 10% за добу).

Питома швидкість росту метаноутворюючих бактерій μ залежить від концентрації поживних елементів субстрату і може визначатись за формулами, наведеними в табл. 1-4.

Таблиця 1

Моделі питомої швидкості росту мікроорганізмів

Модель	Формула
Кобозєва	$\mu = KS$ Питома швидкість росту мікроорганізмів μ знаходиться в лінійній залежності від концентрації поживних речовин в субстраті S
Блекмана	$\mu = \begin{cases} K \cdot S \text{ при } S < S^* \\ K \cdot S^* \text{при } S \geq S^* \end{cases}$ При малих концентраціях дає ті ж результати, що і модель Кобозєва, однак при досягненні величиною S деякого критичного рівня S^* швидкість росту припиняє зростати
Моно (Monod)	$\mu = \mu_n \cdot \frac{S}{K_s + S}$ Точність моделі Моно для чистих культур і простих субстратів дуже висока. Модель підходить для однорідних культур, але не для

	гетерогенних культур або складних субстратів
Мозера (Moser)	$\mu = \mu_m \cdot \frac{S^n}{K_s + S^n}$ де $n = \frac{\log \frac{\mu_0 \cdot K_{S0}}{\mu_{m0} - \mu_0}}{\log S_0}$
Контуа (Contois)	$\mu = \mu_m \cdot \frac{S}{K_c \cdot C + S} = \mu_m \cdot \frac{1}{\frac{K_c \cdot C}{S} + 1}$
Пауелла (Powell)	$\mu = \mu_m \cdot \frac{\left(K_p + L + S\right)}{2 \cdot L} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot L \cdot S}{\left(K_p + L + S\right)^2}}\right]$
Чена і Хашімото (Chen & Hashimoto)	$\mu = \mu_m \cdot \frac{\frac{S}{S_o}}{K + \frac{(1-K) \cdot S}{S_o}}$
Бергтера (Bergter)	$\mu = \mu_m \cdot \frac{S}{K_s + S} \cdot \left[1 - e^{\frac{t_0}{t_{від}}}\right]$ Це модифікована модель Моно, яка розглядає уповільнення внаслідок затримки при виникнення лаг-фаза з часу t_0 до часу затримки $t_{затр}$.

де μ_m – максимальна питома швидкість росту метаноутворюючих бактерій, доба$^{-1}$; S – концентрація поживних речовин в субстраті, кг/м^3; S^* – критична концентрація поживних речовин в субстраті, при якій швидкість росту мікроорганізмів припиняє зростати, кг/м^3; K – безрозмірний параметр, що описує кінетику росту мікроорганізмів за рахунок активності ферменту; K_S – константа насичення, чисельно рівна такій концентрації речовини, при якій швидкість росту сягає половини граничної, кг/м^3; K_M – безрозмірний параметр Мозера (K_M завжди більший одиниці); K_c – безрозмірний параметр Контуа; K_p – параметр, який описує кінетику росту за рахунок активності ферменту, кг/м^3; L – параметр, який описує кінетику росту за рахунок дифузії і проникності, кг/м^3; S_0 – початкова концентрація поживних речовин в субстраті, кг/м^3; t_0 – час початку метанового бродіння, діб; $t_{затр}$ – час закінчення лаг-фази, діб

Таблиця 2

Моделі питомої швидкості росту мікроорганізмів з врахуванням інгібування підвищеними концентраціями субстрату

Модель	Формула
Аіба та ін. (Aiba et al)	$\mu = \mu_m \frac{S}{K_s + S} \cdot e^{\frac{S}{K_i}}$
Уебба (Webb)	$\mu = \mu_m \cdot \frac{S \cdot \left(1 + \frac{\beta \cdot S}{K_i}\right)}{S + K_s + \frac{S^2}{K_i}}$
Халдейна (Haldane)	$\mu = \mu_m \cdot \frac{S}{\left(S + K_s\right) \cdot \left(1 + \frac{S}{K_i}\right)} = \mu_m \cdot \frac{S}{S + K_s} \cdot \frac{K_i}{S + K_i}$
Яно та ін. (Yano et al.)	$\mu = \mu_m \cdot \frac{S}{K_s + S \cdot \left[1 + \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{S}{K_i}\right)^i\right]}$
Гранта (Grant)	$\mu = \mu_m \cdot \frac{1}{S + K_i}$
Андріса (Andrews)	$\mu = \mu_m \cdot \frac{S}{K_s + S + \frac{S^2}{K_i}}$
Хілла і Бартона (Hill & Barth)	$\mu = \mu_m \cdot \frac{S}{K_s + S + \frac{S^2}{K_{i1}} + \frac{S \cdot I}{K_{i2}}}$
Хана і Левенспіля (Han & Levenspiel)	$\mu = \mu_m \cdot \left(1 - \frac{S}{S^*}\right) \cdot \frac{S}{S + K_s \left(1 - \frac{S}{S^*}\right)^m}$

Таблиця 3

Моделі питомої швидкості росту мікроорганізмів з врахуванням інгібування продуктом метаболізму

Модель	Формула
Хіншельвуда (Hinshelwood)	$\mu = \mu_m - K \cdot V$
Мітсдорфера (Mitsdörffer)	$\mu = \mu_m \cdot \frac{S_n}{S^n \cdot \left(1 + K_b \cdot V \cdot S^n\right)}$
Єрусалимського	$\mu = \mu_m \cdot \frac{S}{K_s + S} \cdot \frac{K_v}{V + K_v}$

Бергера	$\mu = \mu_m \cdot \frac{1}{1+\frac{V^K}{K_V}}$
Холсберга та ін. (Holzberg et al.)	$\mu = \mu_m - K_1 \cdot (V - K_2)$
Аіба та ін. (Aiba et al)	$\mu = \mu_m \cdot \frac{S}{K_s + S} \cdot e^{-K \cdot V}$
Базуа і Вілке (Bazua & Wilke)	$\mu = \frac{S}{K_s + S} \cdot \left(\mu_{m,V=0} - \frac{a \cdot \overline{V}}{b - V} \right)$
Госа і Тіарі (Ghose & Tyagi)	$\mu = \mu_m \cdot \left(1 - \frac{V}{V*}\right) \frac{S}{K_s + S + \frac{S^2}{K_s}}$
Мозера (Moser), і Бергтера (Bergter)	$\mu = \mu_m \cdot \frac{S^n}{K_s + S^n} \cdot \frac{K_V}{K_V + V^m}$
Даглі і Хіншельвуда (Dagley & Hinshelwood)	$\mu = \mu_m \cdot \frac{S}{K_s + S} \cdot (1 - K \cdot V)$
Хана і Левенспіля (Han & Levenspiel)	$\mu = \mu_m \cdot \left(1 - \frac{V}{V*}\right) \frac{S}{S + K_s \cdot \left(1 - \frac{V}{V*}\right)^m}$

Таблиця 4

Моделі питомої швидкості росту мікроорганізмів для багатокомпонентних субстратів

Модель	Модель	Формула
Мультиплікативна	Функція є добутком однофакторних залежностей	$\mu = f(S_1) f(S_2)$
Адитивна	Функція є сумою однофакторних залежностей	$\mu = \frac{S_1}{K_1 + S_1} + \frac{S_2}{K_2 + S_2}$
Альтернативна	Багатофакторна залежність підпорядковується принципу кінетичного мінімуму. Для кожного субстрату існує залежність, коли лімітуючим фактором є лише цей субстрат. Реально ж мікроорганізми ростуть зі швидкістю, яка є найменшою з усіх можливих.	$\mu = \min_{i=1}^{k} [\mu(S_i)]$

Висновки

1. В результаті аналізу існуючих математичних моделей процесу отримання біогазу встановлено, що в умовах ідеального перемішування субстрату і постійної температури, головними факторами, що впливають на протікання метаногенезу, є час

процесу, а також концентрація метаногенів, поживних речовин субстрату і продуктів метаболізму (біогазу). Математична модель процесу отримання біогазу в загальному випадку містить систему диференційних рівнянь, спільне вирішення яких дозволяє при заданих початкових умовах знайти зміну в часі концентрації метаногенів, поживних речовин субстрату і продуктів метаболізму (біогазу).

Список використаних джерел

1. Huang W.B., Wachemo A.C., Yuan H.R., Li X.J. Full utilization of nutrients in rice straw by integrating mushroom cultivation, biogas production, and fertilizer use. International Journal of Agricultural and Biological Engineering. 2019. Vol. 12, Iss. 4. P. 174-183. doi: 10.25165/j.ijabe.20191204.4658.

2. Huang W.B., Yuan H.R., Li X.J. Multi-perspective analyses of rice straw modification by Pleurotus ostreatus and effects on biomethane production. Bioresource Technology. 2020. Vol. 296. Article number: 122365. doi: 10.1016/j.biortech.2019.122365.

3. Hublin A., Zokic T.I., Zelic B. Optimization of Biogas Production from Co-digestion of Whey and Cow Manure. Biotechnology and Bioprocess Engineering. 2012. Vol. 17. Iss. 6. P. 1284-1293. doi: 10.1007/s12257-012-0044-z.

4. Ibn Abubakar B.S.U., Ismail N. Anaerobic Digestion of Cow Dung for Biogas Production. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2012. Vol. 7. Iss. 2. P. 169-172.

5. Induchoodan Tg, Izharul Haq, Ajay S. Kalamdhad. Factors affecting anaerobic digestion for biogas production: a review. Advanced Organic Waste Management. 2022. P. 223-233. DOI: 10.1016/B978-0-323-85792-5.00020-4.

6. Ismailov B.R., Babakhodjaev R.P., Ismailov K.B. Optimization of Parameters of Anaerobic Fermentation of Biomass on the Mathematical Model of Kobozev. Technical science and innovation. 2020. Vol. 1. Iss. 03. P. 70–76.

7. Jaffar M., Pang Y.Z., Yuan H.R., Zou D.X., Liu Y.P., Zhu B.N., Korai R.M., Li X.J. Wheat straw pretreatment with KOH for enhancing biomethane production and fertilizer value in anaerobic digestion. Chinese Journal of Chemical Engineering. 2016. Vol. 24, Iss. 3. P. 404-409. doi: 10.1016/j.cjche.2015.11.005.

8. Jaffar M. Yuan H.R., Zou D.X., Liu Y.P., Korai R.M., Pang Y.Z., Li X.J. Wheat straw pretreatment with potassium hydroxide for enhanced biogasification and fertilizer value. Fresenius Environmental Bulletin. 2015. Vol. 24, Iss. 10B. P. 3491-3498.

9. Janke L., Weinrich S., Leite A.F., Terzariol F.K., Nikolausz M., Nelles M., Stinner W. Improving anaerobic digestion of sugarcane straw for methane production: Combined benefits of mechanical and sodium hydroxide pretreatment for process designing. Energy Conversion And Management. 2017. Vol. 141, SI. P. 378-389. doi: 10.1016/j.enconman.2016.09.083.

10. Jha A.K., Li J., Zhang L., Ban Q., Jin Y. Comparison between Wet and Dry Anaerobic Digestions of Cow Dung under Mesophilic and Thermophilic Conditions. Advances in Water Resource and Protection. 2013. Vol. 1. Iss. 2. P. 28-38.

11. Kacprzak A., Krzystek L., Ledakowicz S. Co-digestion of agricultural and industrial wastes. Chemical Papers. 2010. Vol. 64. Iss. 2. P. 127-131. doi: 10.2478/s11696-009-0108-5.

12. Kainthola J., Kalamdhad A.S., Goud V.V., Goel R. Fungal pretreatment and associated kinetics of rice straw hydrolysis to accelerate methane yield from anaerobic digestion. Bioresource Technology. 2019. Vol. 286. Article number: 121368. doi: 10.1016/j.biortech.2019.121368.

13. Kainthola J., Kalamdhad A.S., Goud V.V. Optimization of process parameters for

accelerated methane yield from anaerobic co-digestion of rice straw and food waste. Renewable energy. 2020. Vol. 149. P. 1352-1359. doi: 10.1016/j.renene.2019.10.124.

14. Romaniuk W., Polishchuk V., Marczuk A., Titova L., Rogovskii I., Borek K. Impact of sediment formed in biogas production on productivity of crops and ecologic character of production of onion for chives. Agricultural Engineering (wir.ptir.org). Krakow. Poland. 2018. Vol. 22. №1. P. 105—125. https://doi.org/10.1515/agriceng-2018-0010.

15. Rogovskii I.L., Polishchuk V.M., Titova L.L., Sivak I.M., Vyhovskyi A.Y. 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(22). P. 2652-2663.

References

1. Huang W.B., Wachemo A.C., Yuan H.R., Li X.J. (2019). Full utilization of nutrients in rice straw by integrating mushroom cultivation, biogas production, and fertilizer use. International Journal of Agricultural and Biological Engineering. Vol. 12, Iss. 4. P. 174-183. doi: 10.25165/j.ijabe.20191204.4658.

2. Huang W.B., Yuan H.R., Li X.J. (2020). Multi-perspective analyses of rice straw modification by Pleurotus ostreatus and effects on biomethane production. Bioresource Technology. Vol. 296. Article number: 122365. doi: 10.1016/j.biortech.2019.122365.

3. Hublin A., Zokic T.I., Zelic B. (2012). Optimization of Biogas Production from Co-digestion of Whey and Cow Manure. Biotechnology and Bioprocess Engineering. Vol. 17. Iss. 6. P. 1284-1293. doi: 10.1007/s12257-012-0044-z.

4. Ibn Abubakar B.S.U., Ismail N. (2012). Anaerobic digestion of cow dung for biogas production. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. Vol. 7. Iss. 2. P. 169-172.

5. Induchoodan Tg, Izharul Haq, Ajay S. (2022). Kalamdhad. Factors affecting anaerobic digestion for biogas production: a review. Advanced Organic Waste Management. P. 223-233. DOI: 10.1016/B978-0-323-85792-5.00020-4.

6. Ismailov B.R., Babakhodjaev R.P., Ismailov K.B. (2020). Optimization of Parameters of Anaerobic Fermentation of Biomass on the Mathematical Model of Kobozev. Technical science and innovation. Vol. 1. Iss. 03. P. 70–76.

7. Jaffar M., Pang Y.Z., Yuan H.R., Zou D.X., Liu Y.P., Zhu B.N., Korai R.M., Li X.J. (2016). Wheat straw pretreatment with KOH for enhancing biomethane production and fertilizer value in anaerobic digestion. Chinese Journal of Chemical Engineering. Vol. 24, Iss. 3. P. 404-409. doi: 10.1016/j.cjche.2015.11.005.

8. Jaffar M. Yuan H.R., Zou D.X., Liu Y.P., Korai R.M., Pang Y.Z., Li X.J. (2015). Wheat straw pretreatment with potassium hydroxide for enhanced biogasification and fertilizer value. Fresenius Environmental Bulletin. Vol. 24, Iss. 10B. P. 3491-3498.

9. Janke L., Weinrich S., Leite A.F., Terzariol F.K., Nikolausz M., Nelles M., Stinner W. (2017). Improving anaerobic digestion of sugarcane straw for methane production: Combined benefits of mechanical and sodium hydroxide pretreatment for process designing. Energy Conversion And Management. Vol. 141, SI. P. 378-389. doi: 10.1016/j.enconman.2016.09.083.

10. Jha A.K., Li J., Zhang L., Ban Q., Jin Y. (2013). Comparison between Wet and Dry Anaerobic Digestions of Cow Dung under Mesophilic and Thermophilic Conditions. Advances in Water Resource and Protection. Vol. 1. Iss. 2. P. 28-38.

11. Kacprzak A., Krzystek L., Ledakowicz S. (2010). Co-digestion of agricultural and industrial wastes. Chemical Papers. Vol. 64. Iss. 2. P. 127-131. doi: 10.2478/s11696-009-0108-5.

12. Kainthola J., Kalamdhad A.S., Goud V.V., Goel R. (2019). Fungal pretreatment

and associated kinetics of rice straw hydrolysis to accelerate methane yield from anaerobic digestion. Bioresource Technology. Vol. 286. Article number: 121368. doi: 10.1016/j.biortech.2019.121368.

13. Kainthola J., Kalamdhad A.S., Goud V.V. (2020). Optimization of process parameters for accelerated methane yield from anaerobic co-digestion of rice straw and food waste. Renewable energy. Vol. 149. P. 1352-1359. doi: 10.1016/j.renene.2019.10.124.

14. Romaniuk W., Polishchuk V., Marczuk A., Titova L., Rogovskii I., Borek K. (2018). Impact of sediment formed in biogas production on productivity of crops and ecologic character of production of onion for chives. Agricultural Engineering (wir.ptir.org). Krakow. Poland. Vol. 22. №1. P. 105—125. https://doi.org/10.1515/agriceng-2018-0010.

15. Rogovskii I.L., Polishchuk V.M., Titova L.L., Sivak I.M., Vyhovskyi A.Y. (2020). 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. Vol. 15(22). P. 2652-2663.

Росомаха Ю.О.,
Мартишко В.М.
Національний університет біоресурсів і природокористування України,
м. Київ, Україна
E-mail:
rogovskii@nubip.edu.ua

АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ ДЛЯ ПОТОКОВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ЗБИРАННЯ ПЛОДІВ

https://doi.org/10.37700/ts.2024.25.282-290

УДК 631.599

Росомаха Ю.О., Мартишко В.М. ***Аналіз параметрів транспортного засобу для потокової технології збирання плодів.***

Анотація. *В статті розкрито особливості методичного обґрунтування параметрів транспортного засобу для потокової технології збирання плодів. Збалансований розвиток всіх ланок АПК – необхідна умова забезпечення країни продовольством, зокрема плодоовочевою сировиною. В даний час слабкий розвиток переробних галузей АПК, виробничої інфраструктури комплексу призводять до значних втрат продукції сільського господарства. Так, втрати зібраних плодів і овочів становлять 40–45%. Потреба в транспортних засобах для садівництва і овочівництва, задовольняється лише на 55–60%. Одним з найбільш істотних і складних завдань є зменшення ушкоджень і втрат сільськогосподарської продукції, де відповідальна роль відводиться транспортним засобам. Як показав аналіз, в процесі збирання яблук більше 15–20 % продукції не доходить до споживача. Для внутрішньогосподарського перевезення плодів використовують ящики або контейнери. Плоди зерняткових культур перевозять безтарним способом (в кузовах автомобілів і тракторних причепах). Використання транспортних засобів загального призначення не відповідають агротехнічним вимогам до перевезення плодів, а спеціальні транспортні засоби для перевезення плодів безтарним способом відсутні. Викладено доцільність використання для потокової технології збирання плодів спеціальних контейнерів-накопичувачів, обґрунтовані основні їх параметри, в томі числі оптимальна вантажопідйомність.*

Ключові слова: *плоди, технологія, транспортування, механічні пошкодження, вантажопідйомність.*

Rosomakha Yu.O., Martyshko V.M. ***Analysis of vehicle parameters for flow technology of fruit harvesting.***

Abstract. *The article reveals the features of the methodological justification of vehicle parameters for flow technology of fruit harvesting. Balanced development of all links of the agro-industrial complex is a necessary condition for providing the country with food, in particular fruit and vegetable raw materials. Currently, the weak development of the processing branches of the agro-industrial complex, the production infrastructure of the complex lead to significant losses of agricultural products. Thus, losses of harvested fruits and vegetables are 40-45%. The need for vehicles for gardening and vegetable growing is satisfied only by 55-60%. One of the most significant and complex tasks is to reduce damage*

and losses of agricultural products, where a responsible role is assigned to vehicles. As the analysis showed, in the process of harvesting apples, more than 15-20% of the products do not reach the consumer. For intra-farm transportation of fruits, boxes or containers are used. Fruits of pome crops are transported in bulk (in car bodies and tractor trailers). The use of general-purpose vehicles does not meet the agrotechnical requirements for transporting fruits, and there are no special vehicles for transporting fruits in bulk. The feasibility of using special storage containers for the flow technology of fruit harvesting is outlined, and their main parameters are substantiated, including optimal load capacity.

Key words: *fruits, technology, transportation, mechanical damage, load capacity.*

Постановка проблеми

Для внутрішньогосподарського перевезення плодів використовують ящики або контейнери. Часом плоди зерняткових культур перевозять безтарним способом (в кузовах автомобілів і тракторних причепах) [1]. Використання транспортних засобів загального призначення не відповідають агротехнічним вимогам до перевезення плодів [2]. Спеціальні транспортні засоби для перевезення плодів безтарним способом відсутні [3]. Технологічний процес збирання і транспортування плодів включає в себе ряд операцій, які виконують як вручну, так і за допомогою механізмів та машин в певній послідовності з дотриманням агротехнічних вимог з метою отримання продукції необхідної якості з мінімально можливими затратами.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Стабільної інтенсифікації виробництва плодів можна досягти на базі застосування потокових способів збирання і транспортування [4]. При цьому всі операції – знімання плодів, затарювання в контейнери, транспортування, розвантаження і товарна обробка плодів взаємопов'язані відповідно до технологічного циклу і виконуються з дотриманням чіткої послідовності – в єдиному потоці [5–7]. Обов'язковою умовою при цьому є: відсутність розриву в часі між окремими операціями; однакова продуктивність окремих ланок.

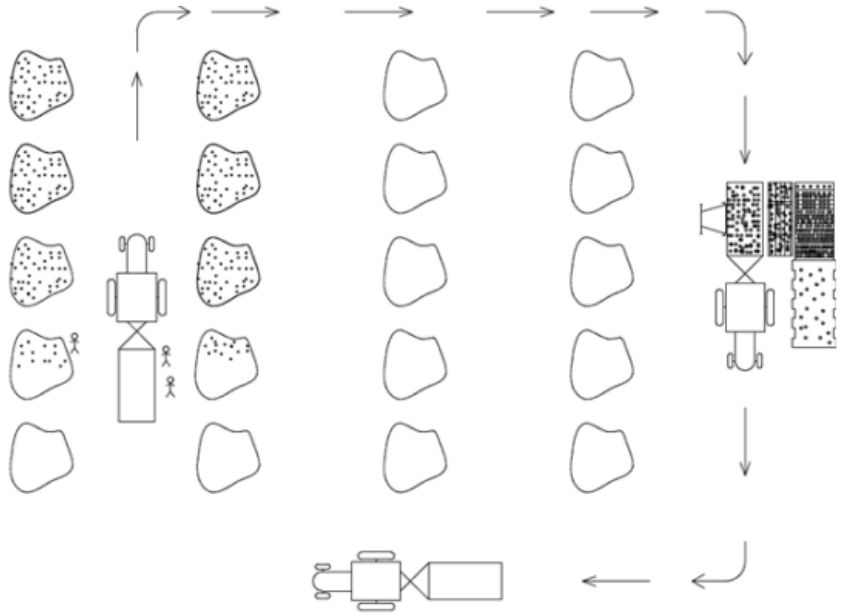


Рис. 1. Технологія збирання і безтарного транспортування плодів.

Таким умовам відповідає запропонована нами технологія внутрішньогосподарського транспортування плодів (рис. 1), яка передбачає збирання, транспортування і вивантаження плодів на лінію товарної обробки плодів в єдиному потоці. Для її виконання запропоновано використовувати контейнери-накопичувачі (транспортний засіб із спеціальним кузовом) і пристрій для розвантаження.

Формулювання мети досліджень

Метою дослідження є теоретично довести доцільність використання спеціальних контейнерів-накопичувачів для потокової технології збирання і транспортування плодів та обґрунтувати основні параметри контейнера-накопичувача, в томі числі його вантажопідйомність.

Методичний підхід в проведенні досліджень

Суть технології така: контейнер-накопичувач являє собою одновісний причіп із спеціальним кузовом. В агрегаті з трактором заїзжає в сад до місця збирання плодів. Повільно переміщуючись в міжряддях саду, контейнер-накопичувач завантажується яблуками бригадою працівників (15–20 чол.). Після наповнення кузова агрегат рухається до місця розвантаження, а на його місце подається інший агрегат з порожнім контейнеровозом-накопичувачем. Розвантаження проводиться на приймальний пристрій лінії товарної обробки плодів.

Така технологія відповідає усім основним вимогам потокової технології.

Теоретичними дослідженнями передбачається визначення основних параметрів транспортного засобу та його вантажопідйомності.

Однією із основних задач при створенні транспортних засобів є обґрунтування основних параметрів кузова.

Внутрішні розміри: довжина (L); ширина (B) і висота (h) визначаються оптимальною вантажністю, насипною вагою плодів та обмеженнями за габаритами. Оптимальна вантажопідйомність нами доведена в роботі [2].

За умови оптимальної вантажопідйомності $Q_{оп}$ об'єм кузова $V_к$ складає:

$$V_к = Q_{оп} k / \gamma , \quad (1)$$

де γ – насипна щільність плодів; k – коефіцієнт заповнення кузова.

Для визначення розмірів кузова враховано наступне:

а) ширина кузова не перевищує ширини трактора;

б) глибина кузова обмежена допустимими статичними і динамічними навантаженнями, що діють на нижні шари плодів.

Враховуючи наведене, довжина кузова визначається з умови

$$V_к = BLh ,$$

звідки

$$L = \frac{V_к}{Bh} ,$$

або

$$L_к = \frac{Q_{оп} k}{Bh\gamma} . \quad (2)$$

З приведених параметрів, які входять в (1) і (2) найбільш важливе значення має глибина кузова h.

Для її визначення розглянемо розподіл зусиль, які діють на плоди в кузові. Плоди укладаються навалом (насипом), тому їх можна розглядати як зернисті тіла розпірної структури, до яких застосовуються окремі положення механіки зернистих середовищ.

Плоди, обмежені стінками кузова, розглядаємо як зернисте тіло з такими припущеннями:

1) плоди мають певну твердість і здатні передавати зусилля від одного до другого;

2) варіювання розмірів окремих плодів відносно середнього розміру носить випадковий характер, що дозволяє безперервно змінювати висоту шару плодів;

3) плоди в кузові розміщуються незалежним і випадковим чином і розподіляються в об'ємі тари статично рівномірно з середньою щільністю γ;

4) розміри окремого плода значно менші об'єму кузова.

Для визначення зусиль, що діють на плоди в кузові, необхідно розглянути залежність їх складових від розмірів поперечного перерізу тари і коефіцієнта внутрішнього тертя плодів.

В механіці зернистих матеріалів для визначення вертикального тиску *G* на нижні шари від дії верхніх, можна використати аналітичну залежність, яка називається формулою Янсена [2].

Після деяких перетворень названа формула має вигляд:

$$G = \frac{\gamma R}{fn}(1 - e^{-\frac{fnh}{R}}), \tag{3}$$

де *G* – вертикальний тиск на глибині *h*;

γ – щільність плодів;

R – гідравлічний радіус, що дорівнює відношенню площі горизонтального перерізу *S* до периметру стінок $П_0$;

f – коефіцієнт внутрішнього тертя плодів;

n – коефіцієнт бокового тиску, який визначається відношенням горизонтальної складової до вертикальної.

Якщо відомо вертикальний тиск, можна знайти силу *P*, яка діє на шар плодів з боку шарів розташованих вище, тобто

$$P = GS. \tag{4}$$

Визначаємо статичні сили ($P_{ст}$), що діють на окремий плід:

$$P_{ст} = P/m, \tag{5}$$

де *m* – кількість плодів, які знаходяться в одному шарі.

Визначаємо кількість плодів, які припадають на одиницю площі поперечного перерізу тари (K^o):

$$K^o = m/s. \tag{6}$$

Середнє значення показника K^o для яблук у вигляді форми кулі ($D_{ср}$ = 60 мм) дорівнює 276 шт/м^2.

Результати досліджень

Підставивши значення виразу (4) і (5) за умови, що

$$S/m = 1/K^o,$$

запишемо

$$P_{ст} = G/K^o.$$

Тоді, вираз для визначення статичних сил, які діють на окремий плід з боку шарів, які розташовані вище, набуває вигляду:

$$P_{cm} = \frac{\gamma R}{K^o fn}(1 - e^{-\frac{fnh}{R}}). \quad (7)$$

Із виразу (7) випливає, що статична сила, яка діє на кожний окремий плід, залежить насамперед від висоти шару плодів. Така залежність показана на рис. 2.

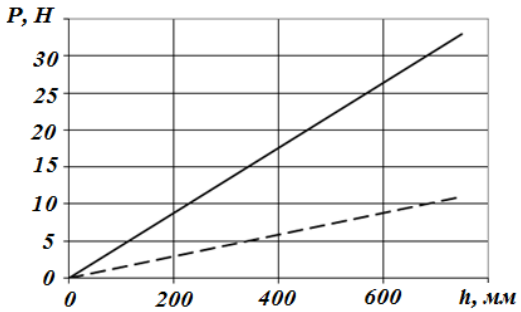


Рис. 2. Залежність сили *P*, що діє на плоди, від висоти шару плодів *h*: _ _ _ - статична сила; ____ - сума статичних і динамічних сил.

Гідравлічний радіус суттєво впливає на величину статичних сил при малих площах поперечного перерізу тари. Із рис. 2 видно, якщо збільшити гідравлічний радіус до 0,2 м – статичні сили різко зростають. За умови R<0,2>0,35 м збільшення статичних сил незначне, а коли R>0,35, практично залишаються незмінними. Для існуючої великооб'єної тари (контейнери) величина гідравлічного радіуса знаходиться в межах 0,22–0,3м.

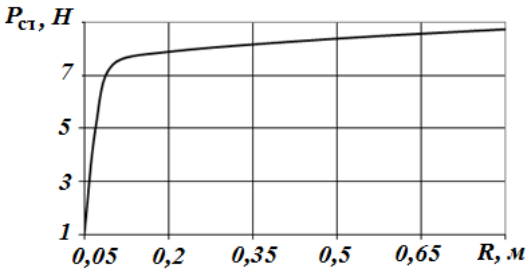


Рис. 3. Вплив гідравлічного радіуса тари на статичні навантаження.

Отже, якщо далі збільшувати площу поперечного перерізу тари, величина статичного зусилля на окремий плід буде залишатися практично незмінною.

Більшість плодів витримують без суттєвих пошкоджень м'якоті статичне навантаження, створене шаром плодів висотою 1 м і більше.

Небезпечним зусилля стискання плодів стає при динамічному його прикладанні. Для коректування глибини тари на динамічні навантаження, необхідно вибирати найбільш небезпечні коливання транспортних засобів в процесі перевезень плодів.

Допустимі навантаження такі, при яких плід пошкоджується і переходить із вищого товарного сорту в нижчий. Основним критерієм для визначення допустимих навантажень прийнята площа стискання, що дорівнює 1 см^2. Виходячи з цієї умови, допустиме навантаження при взаємодії яблук одне з одним, для більшості сортів з достатньою точністю, може бути прийнята 50 Н, а при стисканні плоскою жорсткою поверхнею – 55 Н [4]. Враховуючи час прикладання навантаження і кількості їх повторень, введемо коефіцієнт запасу рівним 1,8. Тоді допустиме навантаження дорівнює 30 Н.

Відомо, що повне навантаження, яке діє на плоди, буде дорівнювати сумі статичних і динамічних навантажень

$$P = P_{ст} + P_{д} . \quad (8)$$

Динамічні навантаження стають на скільки більшими статичних, у скільки діючі прискорення перевищують прискорення вільного падіння, які досягають 1,5 – 2g [4]. Отже, вираз (8) можна записати у вигляді

$$P = P_{ст}(1 + \eta),$$

де η – коефіцієнт динамічності, який показує у скільки разів діючі прискорення перевищують прискорення вільного падіння. За найбільш несприятливих умов транспортування η досягає 2 [4].

Якщо η = 2, тоді повне навантаження в три рази більше статичного, що видно з рис. 2, а сумарна сила досягає величини 30 Н на глибині кузова 0,6 – 0,7 м. Оптимальною можна вважати глибину кузова 0,6 м.

Оптимальну вантажопідйомность контейнера-накопичувача з умови продуктивності роботи працівників в саду і продуктивності лінії товарної обробки. Продуктивність останньої повинна відповідати продуктивності групи працівників, що забезпечує можливість організації збирання плодів потоковим методом.

При обґрунтування вантажопідйомності транспортного засобу (контейнеровоза) необхідно враховувати продуктивність транспортного засобу W і прямі витрати C.

Продуктивність агрегата залежить від ряду факторів: відстані перевезень L, вантажопідйомності, часу навантаження і розвантаження, швидкості руху. Названі фактори взаємопов'язані, наприклад, оптимальна вантажопідйомність в значній мірі залежить від співвідношення продуктивності знімання плодів, завантаження їх в тару, транспортування і розвантаження їх на лінію товарної обробки.

Отже, продуктивність агрегату W за одну годину роботи при повному використанні вантажопідйомності можна записати так

$$W = \frac{Q_{оп}}{t_1 + t_2}, \quad (9)$$

де $Q_{оп}$ – вантажопідйомність контейнеровоза;

t_1 – час руху;

t_2 – час завантаження і розвантаження плодів.

Час руху залежить від відстані перевезень L і середньотехнічної швидкості руху V, яка враховує швидкість переміщення з вантажем і без вантажу

$$t_1 = \frac{2L}{V}. \quad (10)$$

Час завантаження контейнеровоза

$$t_3 = \frac{Q_{оп}}{W_{зб}}, \quad (11)$$

де $W_{зб}$ – продуктивність роботи збирачів плодів.

Час розвантаження контейнеровоза з плодами

$$t_4 = \frac{Q_{оп}}{W_{лто}}, \quad (12)$$

де $W_{лто}$ – продуктивсність лінії товарної обробки плодів.

Тоді, час заповнення контейнеровоза і час розвантаження буде дорівнювати

$$t_5 = t_3 + t_4 . \quad (13)$$

Після нескладних перетворень вираз (5) матиме вигляд

$$t_5 = \frac{Q_{оп}k}{W_{зб}}, \quad (14)$$

де k – коефіцієнт, який відповідає відношенню $\frac{W_{лто} + W_{лто}}{W_{лто}}$.

Підставивши у рівняння (8) значення часу руху, часу наповнення і розвантаження із виразів (10) і (14) і, зробивши математичні перетворення, отримаємо

формулу продуктивності транспортного агрегату з врахуванням усіх факторів, які характеризують процес збирання, транспортування і товарної обробки плодів

$$W = \frac{W_{лто} V Q_{оп}}{2LW_{зб} + kV Q_{оп}} . \quad (15)$$

На рис. 4 наведений графік залежності продуктивності транспортного агрегата від його вантажопідйомності, з якого випливає, що зміна продуктивності має гіперболічний характер. При збільшенні вантажопідйомності зростання продуктивності зменшується, це обумовлено тим, що збільшується час завантаження і розвантаження контейнеровоза. Із збільшенням радіуса перевезень продуктивність також зменшується.

Залежність продуктивності агрегату W від швидкості руху V і продуктивності збирачів показані на рис. 4. Із збільшенням V *і* $W_{зб}$ продуктивність транспортного агрегату зростає, особливо при збільшенні $W_{зб}$. Таке явище буде характерно при збільшенні вантажопідйомності, але по мірі збільшення останньої затрати на виготовлення і експлуатацію контейнеровозів зростають.

Для визначення оптимальної вантажопідйомності контейнеровоза, коли в процесі експлуатації затрати будуть мінімальними, необхідно виявити її зв'язок від прямих і питомих витрат.

Відповідно до методики визначення економічної ефективності прямі експлуатаційні витрати включають: заробітну плату працівників, відрахування на реновацію і капітальний ремонт, відрахування на поточний ремонт і ТО, вартість паливо-мастильних матеріалів та інші витрати.

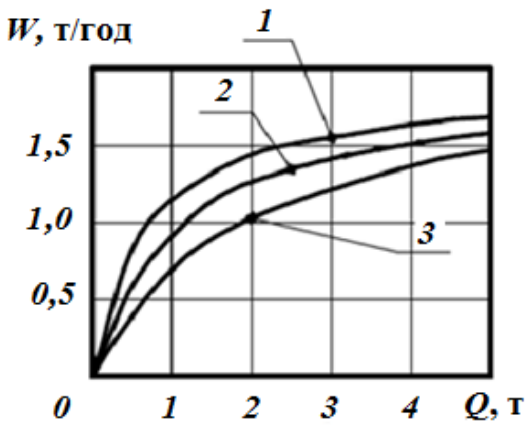


Рис. 4. Залежності продуктивності W транспортного агрегата від його вантажопідйомності Q і відстані перевезень L, за умови: V = 15 км/год, продуктивність роботи збирачів плодів $W_{зб}$ = 2 т/год і продуктивність лінії товарної обробки $W_{лто}$ = 10 т/год (*1* – L = 2 км; *2* – L = 3 км; *3* – L = 4 км).

З урахуванням викладеного прямі експлуатаційні витрати C зростають пропорційно в залежності від вантажопідйомності, що можна показати у вигляді:

$$C = a + в\, Q_{оп}, \quad (16)$$

де a і $в$ – коефіцієнти.

Питомі прямі витрати U визначають, як відношення прямих витрат C і продуктивності агрегату W, тоді

$$U = \frac{(a + вQ_{оп})(2LW_{зб} + kV Q_{оп})}{W_{зб} V Q_{оп}} \quad (17)$$

Залежність питомих експлуатаційних витрат $\frac{C}{W}$ від вантажопідйомності контейнера-накопичувача Q показано на рис. 5.

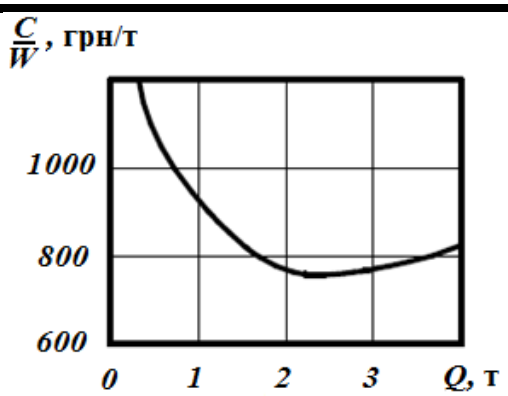


Рис. 5. Залежності питомих експлуатаційних витрат від вантажопідйомності контейнера-накопичувача: L = 3 км; V =15 км/год; $W_{зб}$ = 2 т/год.

Для того, щоб визначити вантажопідйомність контейнеровоза-накопичувача, яка відповідає мінімуму питомих прямих затрат необхідно продиференціювати вираз по $Q_{оп,}$ в результаті отримаємо:

$$U_Q^1 = -\frac{1.6L}{V}Q^2 + \frac{bk}{W_{зб}} \quad (18)$$

Якщо прирівняти праву частину рівняння (18), отримаємо

$$Q_{оп} = \sqrt{\frac{1,6LW_{зб}}{bkV}}$$

За умови, якщо L = 3 км, $W_{зб}$ = 2 т/год, V = 15 км/год і K = 1,2 – оптимальна вантажопідйомність контейнера-накопичувача 2,5 т.

Висновки

1. Для безтарного транспортування плодів розміри контейнера-накопичувача приймають з умови оптимальної вантажопідйомності, яка обумовлена продуктивністю роботи працівників на збирання плодів і продуктивністю лінії товарної обробки плодів.

2. Габаритні розміри кузова обмежені допустимими навантаженнями від дії верхніх шарів на нижні від дії вібрації, а також загальними транспортними вимогами.

Список використаних джерел

1. Vlăduţ D.I., Biriş S., Vlăduţ V., Cujbescu D., Ungureanu N., Găgeanu I. Verification of stress by FEM analysis·M-1 echanical testing of agricultural mobile aggregates couplig device. Inmateh – Agricultural Engineering. 2018. Vol. 54, no. 1/2018, P. 37–46.

2. Gheorghe G., Lates D., Oprea C., Baltatu C. Structural and modal analysis in solidworks of agricultural plow to choose vibration system at moldboard. Engineering for Rural Development. 2023. Vol. 22. P. 872–878. DOI: 10.22616/ERDev.2023.22.TF168.

3. Rogovskii I., Titova L., Trokhaniak V., Trokhaniak O., Stepanenko S. Experimental study on the process of grain cleaning in a pneumatic microbiocature separator with apparatus camera. Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering. 2019. Vol. 12 (61). No 1. P. 117−128. https://doi.org/10.31926/but.fwiafe.2019.12.61.1.10.

4. Rogovskii I.L., Titova L.L., Trokhaniak V.I., Rosamaha Yu.O., Blesnyuk O.V., Ohiienko A.V. Engineering management of two-phase coulter systems of seeding machines for implementing precision farming technologies. INMATEH. Agricultural Engineering. 2019. Bucharest. Vol. 58. No 2. P. 137−146. https://doi.org/10.35633/INMATEH-58-15.

5. Rogovskii I.L. Algorithmicly determine the frequency of recovery of agricultural machinery according to degree of resource's costs. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 2020. Vol. 11 (1). P. 155−162.

6. Rogovskii I.L. Consistency ensure the recovery of agricultural machinery according to degree of resource's costs. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 2019. Vol. 10(4). P. 145−150. https://doi.org/10.31548/machenergy.2019.04.145-150.

7. Nazarenko I., Mishchuk Y., Mishchuk D., Ruchynskyi M., Rogovskii I., Mikhailova L., Titova L., Berezovyi M., Shatrov R. Determiantion 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.

References

1. Vlăduţ D.I., Biriş S., Vlăduţ V., Cujbescu D., Ungureanu N., Găgeanu I. (2018). Verification of stress by FEM analysis·M-1 echanical testing of agricultural mobile aggregates couplig device. Inmateh – Agricultural Engineering. Vol. 54, no. 1/2018, P. 37–46.

2. Gheorghe G., Lates D., Oprea C., Baltatu C. (2023). Structural and modal analysis in solidworks of agricultural plow to choose vibration system at moldboard. Engineering for Rural Development. Vol. 22. P. 872–878. DOI: 10.22616/ERDev.2023.22.TF168.

3. Rogovskii I., Titova L., Trokhaniak V., Trokhaniak O., Stepanenko S. (2019). Experimental study on the process of grain cleaning in a pneumatic microbiocature separator with apparatus camera. Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering. Vol. 12 (61). No 1. P. 117−128. https://doi.org/10.31926/but.fwiafe.2019.12.61.1.10.

4. Rogovskii I.L., Titova L.L., Trokhaniak V.I., Rosamaha Yu.O., Blesnyuk O.V., Ohiienko A.V. (2019). Engineering management of two-phase coulter systems of seeding machines for implementing precision farming technologies. INMATEH. Agricultural Engineering. Vol. 58. No 2. P. 137−146. https://doi.org/10.35633/INMATEH-58-15.

5. Rogovskii I.L. (2020). Algorithmicly determine the frequency of recovery of agricultural machinery according to degree of resource's costs. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. Vol. 11 (1). P. 155−162.

6. Rogovskii I.L. (2019). Consistency ensure the recovery of agricultural machinery according to degree of resource's costs. Machinery & Energetics. Kyiv. Ukraine. Vol. 10(4). P. 145−150. https://doi.org/10.31548/machenergy.2019.04.145-150.

7. Nazarenko I., Mishchuk Y., Mishchuk D., Ruchynskyi M., Rogovskii I., Mikhailova L., Titova L., Berezovyi M., Shatrov R. (2021). Determiantion 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.

Антощенков Р.В.,
Кусков М.А.
Державний біотехнологічний університет,
м. Харків, Україна,
E-mail:
0671210957@btu.kharkiv.ua

ДО ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛОСКО-ПАРАЛЕЛЬНОГО РУХУ ПОСІВНОГО МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТУ

https://doi.org/10.37700/ts.2024.25.291-305

УДК 631.362

Антощенков Р.В., Кусков М.А. ***До дослідження плоско-паралельного руху посівного машинно-тракторного агрегату.***

Анотація. *В роботі обґрунтовано метод дослідження плоско-паралельного руху посівного машинно-тракторного агрегату (МТА) через формування рівнянь динаміки використанням рівнянь Лагранжу ІІ-го роду. Теоретичні дослідженні проведено на прикладі посівного машинно-тракторного агрегату у складі повнопривідного трактора класичної компоновки Беларус-1025 виробництва МТЗ та сівалки Vega-8 W Profi виробництва ПАТ «Ельворті» (м. Кропивницький). Трактор класичної компоновки, повнопривідний, з передніми керованими колесами. Сівалка причіпна призначена для одночасної сівби двох культур. При формувані рівнянь руху агрегату задавались допущеннями, що дозволять спростити рішення поставленого завдання, а також відкинути фактори, які ускладнюють математичне моделювання та не впливають на розрахунок. Введено наступні припущення: розглядався плоско-паралельний рух агрегату; в процесі складання математичної моделі не враховувався деферент (плоско-паралельний рух агрегату в площині XOZ) і крен (плоско-паралельний рух агрегату в площині YOZ); не враховувалися процеси, які відбуваються в гідроприводі рульового керування; не враховуються процеси, які відбуваються в трансмісії; не враховувалися динамічні характеристики двигуна в процесі розгону та гальмування агрегату; остови секцій абсолютно тверді тіла, а весь агрегат симетричний щодо поздовжньої площини; сили опору перекочуванню вважаються постійними; бічні зусилля на шинах обмежені зчепленням коліс із дорогою. Опір перекочуванню коліс трактора та сівалки розраховується в залежності від вертикального навантаження на відповідне колесо. При складанні математичної моделі використовується випадок руху по криволінійній траєкторії, яка відповідає дійсній траєкторії руху посівних агрегатів по полю. В процесі руху ведучими є передні та задні колеса трактора. Положення системи «трактор-сівалка» буде визначатися чотирма узагальненими координатами: проекція швидкості центру мас трактора на ось x; проекція швидкості центру мас трактора на ось y; кут повороту рами трактора навколо вертикальної осі; кут повороту рами сівалки навколо вертикальної осі. Для приведення рівнянь динаміки МТА до виду Коші та чисельного рішення системи СЛАР методом Крамера був використаний математичний пакет програм MatLab 2021a. Розроблена математична модель дозволяє досліджувати динаміку (рух) елементів посівного МТА у поздовжньо-паралельній площині та визначати вплив геометричних параметрів агрегату на його динаміку, коливання елементів навколо прямолінійної траєкторії та стійкість руху.*

Ключові слова: *математична модель, рівняння Лагранжу, рух, посівний машинно-тракторний агрегат.*

Antoshchenkov R.V., Kuskov M.A. ***On study of plane-parallel movement of sowing machine-tractor unit.***

Abstract. *The paper substantiates the method of studying the plane-parallel movement of the sowing machine-tractor unit (MTA) through the formation of equations of dynamics using Lagrange equations of the II kind. Theoretical studies were carried out on the example of a sowing machine-tractor unit as part of an all-wheel drive tractor of the classic layout Belarus-1025 manufactured by MTZ and a seeder Vega-8 W Profi manufactured by PJSC "Elworthy" (Kropyvnytskyi). Tractor of a classic layout, all-wheel drive, with front steered wheels. as well as discard factors that complicate mathematical modeling and do not affect the calculation. The following assumptions were introduced: the plane-parallel motion of the unit was considered; in the process of compiling the mathematical model, the deferent (plane-parallel movement of the unit in the plane XOZ) and roll (plane-parallel movement of the unit in the plane YOZ) were not taken into account; the processes that occur in the hydraulic steering drive were not taken into account; the processes that occur in the transmission are not taken into account; the dynamic characteristics of the engine were not taken into account during acceleration and braking of the unit; the skeletons of the sections are absolutely solid, and the entire aggregate is symmetrical with respect to the longitudinal plane; rolling resistance forces are considered constant; lateral forces on the tires are limited by the grip of the wheels on the road. The rolling resistance of the wheels of the tractor and seeder is calculated depending on the vertical load on the corresponding wheel. When compiling a mathematical model, the case of movement along a curved trajectory is used, which corresponds to the actual trajectory of the sowing units in the field. In the process of movement, the front and rear wheels of the tractor are the drivers. The position of the tractor-seeder system will be determined by four generalized coordinates: the projection of the velocity of the tractor's center of mass on the x-axis; projection of the velocity of the center of mass of the tractor on the y-axis; the angle of rotation of the tractor frame around the vertical axis; the angle of rotation of the seeder frame around the vertical axis. To bring the equations of MTA dynamics to the Cauchy form and the numerical solution of the SLAR system, the mathematical software package MatLab 2021a was used by the Kramer method. The developed mathematical model allows you to study the dynamics (movement) of the elements of the sowing MTA in the longitudinally parallel plane and determine the influence of geometric parameters of the unit on its dynamics, oscillations of elements around a rectilinear trajectory and stability of motion.*

Key words: *mathematical model, Lagrange equation, motion, sowing machine-tractor unit.*

Постановка проблеми

У сучасному сільському господарстві ефективність агрономічних процесів значною мірою залежить від використання сучасної техніки, зокрема посівних машинно-тракторних агрегатів. Плоско-паралельний рух таких агрегатів є критично важливим для забезпечення точності і якості сівби, а також для оптимізації витрат ресурсів. Дослідження, представлене в цій статті, має на меті розробку математичної моделі, що описує рух повнопривідного трактора класичної компоновки в поєднанні з сівалкою. Ця модель дозволить глибше зрозуміти механіку взаємодії між елементами агрегату, а також вплив різних параметрів на стійкість руху та продуктивність. Актуальність даного дослідження зумовлена необхідністю підвищення ефективності сільськогосподарських робіт, що особливо важливо в умовах зростаючої конкуренції і зміни кліматичних умов.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У сільськогосподарському виробництві, особливо у точному землеробстві, зростає потреба в підвищенні ефективності та продуктивності посівних операцій. Важливим аспектом є забезпечення стабільності та точності руху машинно-тракторних агрегатів (МТА), які виконують ці операції [1]. Зокрема, дослідження плоско-паралельного руху посівних МТА, що складаються з повнопривідних тракторів класичної компоновки та сівалок, є актуальним завданням, оскільки дозволяє оптимізувати процес сівби, зменшити витрати ресурсів та підвищити врожайність [2].

Ефективність роботи МТА значною мірою залежить від його здатності стабільно рухатися по заданій траєкторії, особливо при наявності зовнішніх збурень, таких як нерівності ґрунту або бічний вітер [3]. Нестабільність руху може призвести до нерівномірного розподілу насіння, збільшення пропусків та подвійних висівів, що негативно впливає на якість посіву та кінцевий результат [4].

Сучасні дослідження в галузі динаміки МТА зосереджені на розробці математичних моделей, які враховують різні фактори, що впливають на рух агрегату [5]. Математичне моделювання дозволяє аналізувати стійкість руху, визначати оптимальні параметри конструкції та режими роботи МТА, а також розробляти системи автоматичного керування, які забезпечують високу точність та стабільність руху [1].

У даній роботі представлено результати дослідження плоско-паралельного руху посівного МТА, що складається з повнопривідного трактора класичної компоновки та сівалки. Метою дослідження є розробка математичної моделі, яка описує динаміку руху агрегату в горизонтальній площині з урахуванням конструктивних параметрів трактора та сівалки, а також зовнішніх сил, що діють на МТА. Розроблена математична модель дозволяє оцінити вплив різних факторів на стійкість руху агрегату та визначити оптимальні параметри, які забезпечують високу точність та стабільність посівних операцій [6]. Повнопривідні трактори класичної компоновки широко використовуються в сільському господарстві завдяки своїй універсальності та здатності працювати на різних типах ґрунтів. Дослідження стійкості їх руху в складі МТА є важливим для забезпечення якісного виконання технологічних операцій [7]. У зв'язку з цим, розробка математичної моделі, яка враховує особливості конструкції таких тракторів та їх взаємодію з сівалкою, є актуальним завданням [8].

Сівалки є невід'ємною частиною посівного МТА і відіграють важливу роль у забезпеченні рівномірного розподілу насіння. Їх конструктивні особливості та параметри також впливають на динаміку руху агрегату. Тому, при розробці математичної моделі необхідно враховувати ці фактори для отримання точних результатів [9].

Формулювання мети досліджень

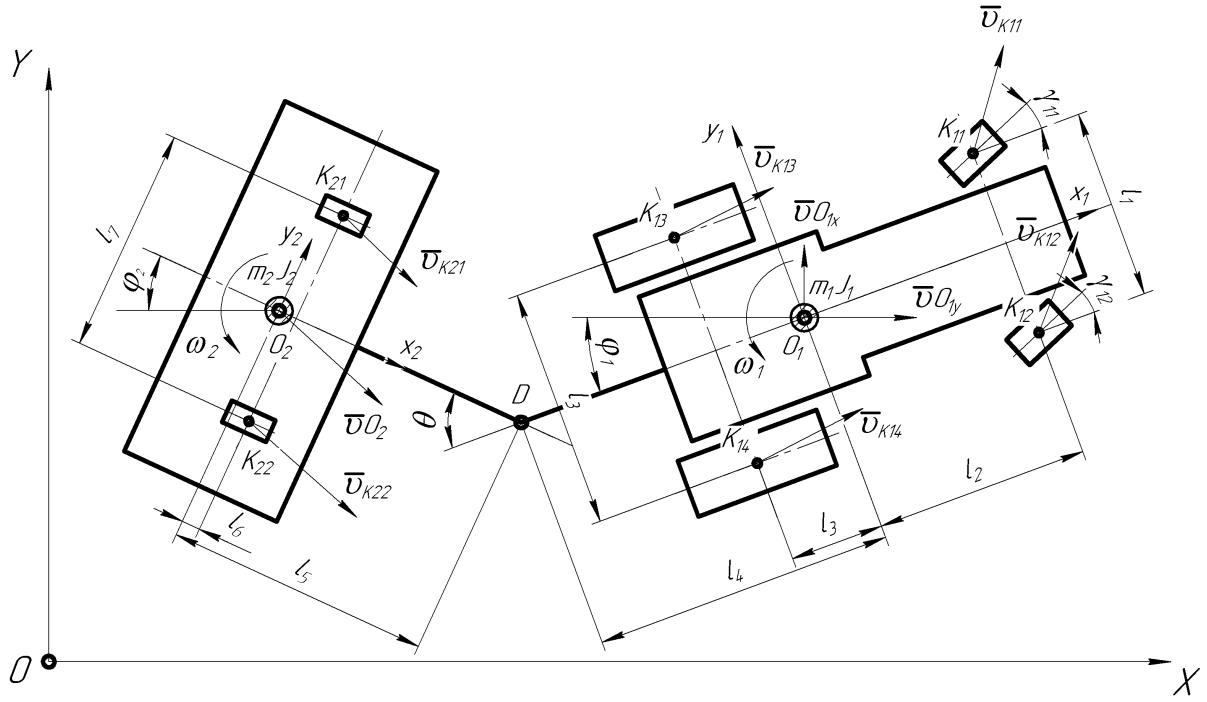
Завдання даного дослідження полягає у обґрунтуванні метода дослідження плоско-паралельного руху посівного машинно-тракторного агрегату у складі повнопривідного трактора класичної компоновки Беларус-1025 виробництва МТЗ та сівалки Vega-8 W Profi виробництва ПАТ «Ельворті» через формування математичної моделі.

Результати досліджень

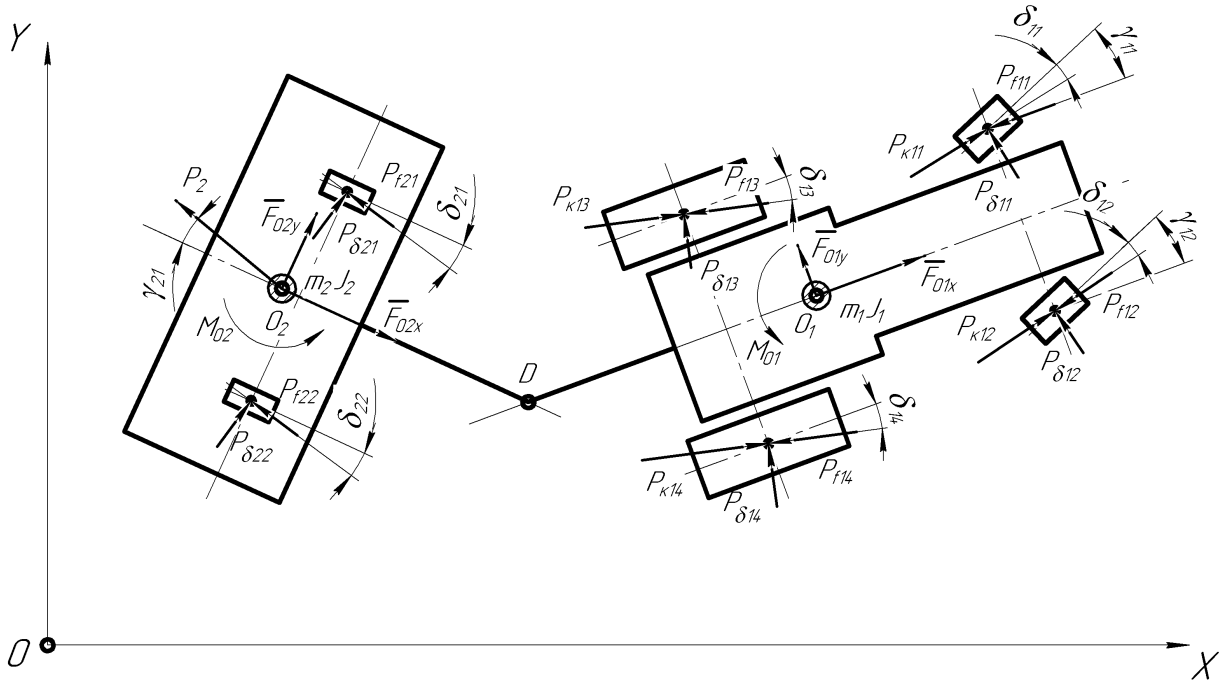
Покращення динамічних властивостей машинно-тракторних агрегатів досягається через теоретичні дослідження динаміки, оцінки прямолінійності руху,

стійкості та керованості. Науково-прикладна задача покращення динамічних властивостей МТА розглядалась у роботах Лебедєва А. Т., Надикто В. Т., Мельника В. І., Артемова М. П., Антощенкова Р. В., Калініна Є. І., Шуляка М. Л., Галича І. В. та ін. [10–12].

У зазначених вище дослідженнях проводився аналіз руху МТА, динамічні моделі яких подавалися у вигляді просторових та плоско-паралельних моделей, що мають від двох та більше елементів (мас).



а



б

Рис. 1. Кінематична (а) та динамічна (б) моделі плоско-паралельного руху двохелементного (двох масового) посівного машинно-тракторного агрегату

Покращення динамічних властивостей посівного МТА потребують теоретичних досліджень плоско-паралельного руху двохмасового агрегату з чотирма ступенями свободи.

Теоретичні дослідженні проведено на прикладі посівного машинно-тракторного агрегату у складі повнопривідного трактора класичної компоновки Беларус-1025 виробництва МТЗ та сівалки Vega-8 W Profi виробництва ПАТ «Ельворті» (м. Кропивницький). Трактор класичної компоновки, повнопривідний, з передніми керованими колесами. Сівалка причіпна призначена для одночасної сівби двох культур.

Формування рівнянь руху агрегату потребує задатися допущеннями, що дозволять спростити рішення поставленого завдання, а також відкинути фактори, які ускладнюють математичне моделювання та не впливають на розрахунок.

Введено наступні припущення:

- розглядався плоско-паралельний рух агрегату;
- в процесі складання математичної моделі не враховувався деферент (плоско-паралельний рух агрегату в площині *XOZ*) і крен (плоско-паралельний рух агрегату в площині *YOZ*);
- не враховувалися процеси, які відбуваються в гідроприводі рульового керування; не враховуються процеси, які відбуваються в трансмісії;
- не враховувалися динамічні характеристики двигуна в процесі розгону та гальмування агрегату;
- остови секцій абсолютно тверді тіла, а весь агрегат симетричний щодо поздовжньої площини; сили опору перекочуванню вважаються постійними;
- бічні зусилля на шинах обмежені зчепленням коліс із дорогою.

Опір перекочуванню коліс трактора та сівалки розраховується в залежності від вертикального навантаження на відповідне колесо [13].

Прийняті допущення дозволяють представити МТА у вигляді плоскої системи в горизонтальній площині *XOY*, тому що в цій площині діють проекції сил, які формують навантаження на елементи агрегату, зчіпний пристрій, силу опору сівалки, сила опору перекочуванню машини, бічні сили та рушійні зусилля.

Розрахункова схема (рис. 1) являє собою динамічну модель плоско-паралельного руху двохелементного (двох масового) посівного МТА, що складається з двох ланок: трактору та сівалки.

При складанні математичної моделі використовується випадок руху по криволінійній траєкторії, яка відповідає дійсній траєкторії руху посівних агрегатів по полю [14]. В процесі руху ведучими є передні та задні колеса трактора. Навантаження, які зазнає в цьому випадку агрегат, не є критичними і характерні для технологічного процесу сівби. Відмінною рисою розробленої математичної моделі є те, що вона дозволяє проаналізувати траєкторії руху елементів агрегату, відхилення та частоти в залежності від керуючого впливу та конструкційних параметрів.

На схемі кінематичної та динамічної моделі плоско-паралельного руху двохелементного (двох масового) посівного МТА (рис. 1) використано наступні позначення: *XOY* – глобальна (нерухома) система координат; O_1 – центр мас трактора; O_2 – центр мас сівалки; $x_1o_1y_1$ – зв'язана (рухома) система координат трактора, що проходить через центр мас т. O_1; $x_1o_1y_1$ – зв'язана (рухома) система координат сівалки, що проходить через центр мас т. O_2; т. D – зчіпний пристрій (точка з'єднання трактора та сівалки); φ_1 – кут повороту рами трактора навколо вертикальної осі; φ_2 – кут повороту рами сівалки навколо вертикальної осі; ω_1 – кутова швидкість обертання рами трактора навколо вертикальної осі z; ω_2 – кутова швидкість обертання рами сівалки навколо вертикальної осі z; γ_{11} – кут повороту керованого переднього лівого колеса трактора; γ_{12} – кут повороту керованого переднього правого колеса трактора; δ_{11}, δ_{12}, δ_{13}, δ_{14} – кут

бічного уводу переднього лівого, переднього правого, заднього лівого та заднього правого коліс трактора; δ_{21}, δ_{22} – кут бічного уводу лівого та правого коліс сівалки; θ – кут зламу (кут між повздовжніми осями трактора та сівалки); l_1 – колія передніх коліс трактора; l_2 – відстань від передніх коліс до центра мас трактора; l_3 – відстань від центра мас до осі задніх коліс трактора; l_4 – відстань від центра мас трактора до точки приєднання сівалки; l_5 – відстань від точки приєднання сівалки до центра мас; l_6 – відстань від центру мас сівалки до осі коліс; l_7 – колія коліс сівалки; m_1 – маса трактора; J_1 – момент інерції трактора; m_2 – маса сівалки; J_2 – момент інерції сівалки; $P_{к11}$, $P_{к12}$, $P_{к13}$, $P_{к14}$ – дотична сила тяги переднього лівого, переднього правого, заднього лівого та заднього правого коліс трактора; P_{f11}, P_{f12}, P_{f13}, P_{f14} – сила опору кочення переднього лівого, переднього правого, заднього лівого та заднього правого коліс трактора; $P_{\delta 11}$, $P_{\delta 12}$, $P_{\delta 13}$, $P_{\delta 14}$ – сила бічного уводу переднього лівого, переднього правого, заднього лівого та заднього правого коліс трактора; P_2 – вектор сил тягового опору сівалки; γ_{21} – кут повороту вектору сил тягового опору сівалки; P_{f21}, P_{f22} – сила опору кочення лівого та правого коліс сівалки; $P_{\delta 21}$, $P_{\delta 22}$ – сила бічного уводу лівого та правого коліс сівалки; F_{O1x}, F_{O1y}, F_{O2x}, F_{O2y} – проекції головного вектора сил з боку опорної поверхні для трактора та сівалки; M_{O1}, M_{O2} – головний момент збурюючих впливів з боку опорної поверхні для трактора та сівалки.

Положення системи «трактор-сівалка» буде визначатися чотирма узагальненими координатами: O_{1x} – проекція швидкості центру мас трактора на ось x; O_{1y} – проекція швидкості центру мас трактора на ось y; φ_1 – кут повороту рами трактора навколо вертикальної осі; φ_2 – кут повороту рами сівалки навколо вертикальної осі.

У якості математичного апарата при складанні диференціальних рівнянь руху посівного двохелементного (двох масового) агрегату у складі трактора та сівалки були прийняті рівняння Лагранжа другого роду [14]:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k}\right)-\frac{\partial T}{\partial q_k}=Q_k, k=1,2,3,4, \tag{1}$$

де T – кінетична енергія системи;

Q – узагальнені сили системи;

q_k – узагальнені координати системи.

Рівняння Лагранжа ІІ-го роду, які описують динаміку посівного агрегату, сформовано щодо таких узагальнених координат: O_{1x} і O_{1y} – центр мас трактора (т. O_1); кути повороту рам трактора φ_1 та сівалки φ_2 навколо осі x. Рівняння динаміки агрегату в загальному випадку мають такий вигляд:

$$\begin{cases} \dfrac{d}{dt}\left(\dfrac{\partial T}{\partial \dot{x}_{O_1}}\right)-\dfrac{\partial T}{\partial x_{O_1}}=Q_{O1x}; \\ \dfrac{d}{dt}\left(\dfrac{\partial T}{\partial \dot{y}_{O_1}}\right)-\dfrac{\partial T}{\partial y_{O_1}}=Q_{Oy1}; \\ \dfrac{d}{dt}\left(\dfrac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_1}\right)-\dfrac{\partial T}{\partial \varphi_1}=Q_{\varphi_1}; \\ \dfrac{d}{dt}\left(\dfrac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_2}\right)-\dfrac{\partial T}{\partial \varphi_2}=Q_{\varphi_2}, \end{cases} \tag{2}$$

де Q_{O1x}, Q_{O1y}, Q_{φ_1}, Q_{φ_2} – узагальнені сили відповідних узагальнених координат.

Кінетична енергія МТА складається з кінетичної енергії трактора та сівалки і визначається з виразу:

$$T = \frac{m_1 \upsilon_{O_1}^2}{2} + \frac{J_{O_1}\omega_1^2}{2} + \frac{m_2 \upsilon_{O_2}^2}{2} + \frac{J_{O_2}\omega_2^2}{2}, \tag{3}$$

де υ_{O_1}, υ_{O_2} – швидкості центрів мас трактора та сівалки;

ω_1, ω_2 – кутові швидкості трактора та сівалки щодо відповідних вертикальних осей *z*;

J_{O_1}, J_{O_2} – моменти інерції трактора та сівалки щодо відповідних вертикальних осей *z*.

Швидкість центру мас трактора щодо нерухомої координат *XOY* визначається з рівнянь:

$$\begin{cases} V_{O_1} = \sqrt{V_{O_{1x}}^2 + V_{O_{1y}}^2}; \\ V_{O_1}^2 = V_{O_{1x}}^2 + V_{O_{1y}}^2; \\ V_{O_{1x}} = \dot{x}_{O_1}; \\ V_{O_{1y}} = \dot{y}_{O_1}. \end{cases} \tag{3}$$

Швидкість центру мас сівалки залежить від φ_1 і φ_2 та визначається з виразу:

$$\begin{cases} V_{O_{2x}} = \dot{x}_{O_{2x}} + \omega_1 \left(l_2 + l_3\right)\sin\varphi_1 + \omega_2 l_5 \sin\varphi_2; \\ V_{O_{2y}} = \dot{y}_{O_{2y}} - \omega_1 l_4 \cos\varphi_1 - \omega_2 l_5 \cos\varphi_2; \\ V_{O_2} = \sqrt{V_{O_{2x}}^2 + V_{O_{2y}}^2}\ . \end{cases} \tag{4}$$

З урахуванням (3) та (4) вираз для визначення кінетичної енергії посівного агрегату набуде вигляду:

$$\begin{aligned} T = {} & \frac{m_1\left[x_{O_1}^2 + y_{O_1}^2\right] + J_{O_1}\omega_1^2 + J_{O_2}\omega_2^2}{2} + \\ & + \frac{m_2\left[\dot{x}_{O_1} + \omega_1\left(l_2 + l_3\right)\sin\varphi_1 + \omega_2 l_5 \sin\varphi_2\right]^2}{2} + \\ & + \frac{m_2\left[\dot{y}_{O_1} - \omega_1\left(l_4 + l_5\right)cos\varphi_1 - \omega_2 l_5 \cos\varphi_2\right]^2}{2}. \end{aligned} \tag{5}$$

Після обчислення приватних похідних кінетичної енергії (2.5) за узагальненими швидкостями отримуємо:

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_{O_1}} = m_1 \dot{x}_{O_1} + m_2\left(\dot{x}_{O_1} + \dot{\varphi}_1 l_4 \sin\varphi_1 + \dot{\varphi}_2 l_5 \sin\varphi_2\right); \tag{6}$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{y}_{O_1}} = m_1 \dot{y}_{O_1} + m_2\left(\dot{y}_{O_1} - \dot{\varphi}_1 l_4 \cos\varphi_1 - \dot{\varphi}_2 l_5 \cos\varphi_2\right); \tag{7}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_1} = {} & J_{O_1}\dot{\varphi}_1 + m_2 l_4 sin\varphi_1\left(\dot{x}_{O_1} + \dot{\varphi}_1 l_4 \sin\varphi_1 + \dot{\varphi}_2 l_5 \sin\varphi_2\right) + \\ & + m_2 l_4 \cos\varphi_1\left(-\dot{y}_{O_1} + \dot{\varphi}_2 l_4 \cos\varphi_1 + \dot{\varphi}_2 l_5 \cos\varphi_2\right); \end{aligned} \tag{8}$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_2} = J_{O_2}\dot{\varphi}_2 + m_2 l_5 \sin\varphi_2 \left(\dot{x}_{O_1} + \dot{\varphi}_1 l_4 \sin\varphi_1 + \dot{\varphi}_2 l_5 \sin\varphi_2\right) + \\ + m_2 l_5 \cos\varphi_2 \left(-\dot{y}_{O_1} + \dot{\varphi}_1 l_4 \cos\varphi_1 + \dot{\varphi}_2 l_5 \cos\varphi_2\right). \quad (9)$$

Похідні виразів (6)–(9) за часом мають наступний вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{dT}{d\dot{x}_{O_1}}\right) = \left(m_1 + m_2\right)\ddot{x}_{O_1} + \\ + m_2\left(\ddot{\varphi}_1 l_4 \sin\varphi_1 + \dot{\varphi}_1^2 l_4 \cos\varphi_1 + \ddot{\varphi}_2 l_5 \sin\varphi_2 + \dot{\varphi}_2^2 l_5 \cos\varphi_2\right); \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{dT}{d\dot{y}_{O_1}}\right) = \left(m_1 + m_2\right)\ddot{y}_{O_1} + \\ + m_2\left(-\ddot{\varphi}_1 l_4 \cos\varphi_1 + \dot{\varphi}_1^2 l_4 \sin\varphi_1 - \ddot{\varphi}_2 l_5 \cos\varphi_2 + \dot{\varphi}_2^2 l_5 \sin\varphi_2\right); \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{dT}{d\dot{\varphi}_1}\right) = J_{O_1}\ddot{\varphi}_1 + m_2 l_4 \varphi_1 \cdot \\ \cdot\left(\dot{x}_{O_1} + \ddot{\varphi}_1 l_4 \sin\varphi_1 + \dot{\varphi}_1^2 l_4 \cos\varphi_1 + \ddot{\varphi}_2 l_5 \cos\varphi_2 + \dot{\varphi}_2^2 l_5 \cos\varphi_2\right) + \\ + \dot{\varphi}_1 m_2 l_4 \sin\varphi_1\left(\dot{x}_{O_1} + \varphi_1 l_4 \sin\varphi_1 + \dot{\varphi}_2 l_5 \sin\varphi_2\right) - m_2 l_4 \cdot \\ \cdot\cos\varphi_1\left(\ddot{y}_{O_1} - \ddot{\varphi}_1 l_4 \cos\varphi_1 + \dot{\varphi}_1^2 l_4 \sin\varphi_1 - \ddot{\varphi}_2 l_5 \cos\varphi_2 + \dot{\varphi}_2^2 l_5 \cos\varphi_2\right) + \\ + \dot{\varphi}_1 m_2 l_4 \cos\varphi_1\left(\ddot{y}_{O_1} - \dot{\varphi}_1 l_4 \cos\varphi_1 - \dot{\varphi}_2 l_5 \cos\varphi_2\right); \quad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{dT}{d\dot{\varphi}_2}\right) = J_{O_1}\ddot{\varphi}_2 + \\ + m_2 l_5(\dot{x}_{O_1}\sin\varphi_2 + \dot{x}_{c_1}\dot{\varphi}_2\cos\varphi_2 + \ddot{\varphi}_1 l_4 \cos\left(\varphi_1 - \varphi_2\right) - \\ - \dot{\varphi}_1 l_4\left(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2\right)\sin\left(\varphi_1 - \varphi_2\right) - \ddot{y}_{O_1}\cos\varphi_2 + \ddot{y}_{O_1}\ddot{\varphi}_2\sin\varphi_2 + \ddot{\varphi}_2 l_5. \quad (13)$$

Приватні похідні кінетичної енергії у узагальнених координатах дорівнюють:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial T}{\partial x_{c_1}} = 0; \\ \dfrac{\partial T}{\partial y_{c_1}} = 0; \\ \dfrac{\partial T}{\partial \varphi_1} = \dot{\varphi}_1 m_2 l_4\left(\dot{x}_{O_1}\cos\varphi_1 + \dot{y}_{O_1}\sin\varphi_1 - \dot{\varphi}_2 l_5 \sin\left(\varphi_1 - \varphi_2\right)\right); \\ \dfrac{\partial T}{\partial \varphi_2} = \dot{\varphi}_2 m_2 l_5\left(\dot{x}_{O_1}\cos\varphi_2 + \dot{y}_{O_1}\sin\varphi_2 + \dot{\varphi}_1 l_4 \sin\left(\varphi_1 - \varphi_2\right)\right). \end{cases} \quad (14)$$

У моделі бічні сили, що діють у контакті коліс з опорною поверхнею, визначаються як функції кута бічного уводу.

Для визначення кутів бічного уводу через кінематичні параметри руху трактора (швидкість центру мас, кутову швидкість у горизонтальній площині та її геометричні розміри) досліджено схему плоско-паралельного руху МТА щодо нерухомої системи координат *XOY* зображену на рис. 1, б центрами мас трактора та сівалки пов'язані зв'язані (рухомі) системи координат $x_1o_1y_1$ та $x_2o_2y_2$.

Швидкість центрів коліс трактора визначаються як векторна сума швидкості

центру мас трактора $\vec{\upsilon}_{O_1}$ та їх обертальних швидкостей ($\vec{\upsilon}_{K_{11}}$, $\vec{\upsilon}_{K_{12}}$, $\vec{\upsilon}_{K_{13}}$, $\vec{\upsilon}_{K_{14}}$) щодо центру мас:

$$\begin{cases} \vec{\upsilon}_{K_{11}} = \vec{\upsilon}_{O_1} + \vec{\upsilon}_{O_1K_{11}}; \\ \vec{\upsilon}_{K_{12}} = \vec{\upsilon}_{O_1} + \vec{\upsilon}_{O_1K_{12}}; \\ \vec{\upsilon}_{K_{13}} = \vec{\upsilon}_{O_1} + \vec{\upsilon}_{O_1K_{13}}; \\ \vec{\upsilon}_{K_{14}} = \vec{\upsilon}_{O_1} + \vec{\upsilon}_{O_1K_{14}}. \end{cases} \tag{15}$$

Швидкості центрів коліс сівалки визначаються як векторна сума швидкості т. *D* і щодо цієї точки обертальних швидкостей ($\vec{\upsilon}_{K_{21}}$, $\vec{\upsilon}_{K_{22}}$):

$$\begin{cases} \vec{\upsilon}_{K_{21}} = \vec{\upsilon}_D + \vec{\upsilon}_{DK_{21}}; \\ \vec{\upsilon}_{K_{22}} = \vec{\upsilon}_D + \vec{\upsilon}_{DK_{22}}. \end{cases} \tag{16}$$

Обертальні швидкості – це відстань від центрів мас коліс до відповідного центру на кутову швидкість колісної машини в горизонтальній площині.

Після проектування рівнянь на рухомі осі x_1 та y_1, пов'язані з колісним трактором, отримуємо проекції швидкостей центрів коліс на ці осі:

$$\begin{cases} \upsilon_{K11x} = \dot{x}_{O_1}\cos\varphi_1 + \dot{y}_{O_1}\sin\varphi_1 - 0,5l_1\dot{\varphi}_1; \\ \upsilon_{K11y} = -\dot{x}_{O_1}\sin\varphi_1 + \dot{y}_{O_1}\cos\varphi_1 + \dot{\varphi}_1 l_2; \\ \upsilon_{K12x} = \dot{x}_{O_1}\cos\varphi_1 + \dot{y}_{O_1}\sin\varphi_1 - 0,5l_1\dot{\varphi}_1; \\ \upsilon_{K12y} = -\dot{x}_{O_1}\sin\varphi_1 + \dot{y}_{O_1}\cos\varphi_1 + \dot{\varphi}_1 l_2; \\ \upsilon_{K13x} = \dot{x}_{O_1}\cos\varphi_1 + \dot{y}_{O_1}\sin\varphi_1 - 0,5l_1\dot{\varphi}_1; \\ \upsilon_{K13y} = -\dot{x}_{O_1}\sin\varphi_1 + \dot{y}_{O_1}\cos\varphi_1 + \dot{\varphi}_1 l_3; \\ \upsilon_{K14x} = \dot{x}_{O_1}\cos\varphi_1 + \dot{y}_{O_1}\sin\varphi_1 - 0,5l_1\dot{\varphi}_1; \\ \upsilon_{K14y} = -\dot{x}_{O_1}\sin\varphi_1 + \dot{y}_{O_1}\cos\varphi_1 + \dot{\varphi}_1 l_3. \end{cases} \tag{17}$$

Для сівалки проектування рівнянь виконується на аналогічні рухомі осі та отримуємо наступні рівняння проекцій швидкостей:

$$\begin{cases} \upsilon_{K21x} = \dot{x}_{O_1}\cos\varphi_2 + \dot{y}_{O_1}\sin\varphi_2 + \dot{\varphi}_1 l_4\sin(\varphi_1 - \varphi_2) - 0,5l_7\dot{\varphi}_2; \\ \upsilon_{K21y} = -\dot{x}_{O_1}\sin\varphi_2 + \dot{y}_{O_1}\cos\varphi_2 - \dot{\varphi}_1 l_4 cos(\varphi_1 - \varphi_2) - \dot{\varphi}_2 l_5; \\ \upsilon_{K22x} = \dot{x}_{O_1}\cos\varphi_2 + \dot{y}_{O_1}\sin\varphi_2 + \dot{\varphi}_1 l_4\sin(\varphi_1 - \varphi_2) - 0,5l_7\dot{\varphi}_2; \\ \upsilon_{K22y} = -\dot{x}_{O_1}\sin\varphi_2 + \dot{y}_{O_1}\cos\varphi_2 - \dot{\varphi}_1 l_4\cos(\varphi_1 - \varphi_2) - \dot{\varphi}_2 l_5. \end{cases} \tag{18}$$

Для некерованих коліс трактора та сівалки кут бокового уводу визначається з виразу:

$$\delta_i = arctg\frac{\upsilon_{iy}}{\upsilon_{ix}}. \tag{19}$$

Для передніх керованих коліс трактора кут бокового уводу визначається з формул:

$$\delta_i = a_j - arctg\frac{\upsilon_{iy}}{\upsilon_{ix}}. \tag{20}$$

Виходять такі формули для визначення кутів уведення коліс:

$$\begin{cases}
\delta_{11} = a - arctan\dfrac{-\dot{x}_{O_1}\sin\varphi_1 + \dot{y}_{O_1}\cos\varphi_1 + \dot{\varphi}_1 l_2}{\dot{x}_{O_1}\cos\varphi_1 + \dot{y}_{O_1}\sin\varphi_1 - 0,5 l_1\dot{\varphi}_1}; \\
\delta_{12} = a - arctan\dfrac{-\dot{x}_{O_1}\sin\varphi_1 + \dot{y}_{O_1}\cos\varphi_1 + \dot{\varphi}_1 l_2}{\dot{x}_{O_1} cos\varphi_1 + \dot{y}_{O_1} sin\varphi_1 + 0,5 l_1\dot{\varphi}_1}; \\
\delta_{13} = -arctan\dfrac{-\dot{x}_{O_1} sin\varphi_1 + \dot{y}_{O_1} cos\varphi_1 + \dot{\varphi}_1 l_3}{\dot{x}_{O_1} cos\varphi_1 + \dot{y}_{O_1} sin\varphi_1 + 0,5 l_1\dot{\varphi}_1}; \\
\delta_{14} = -arctan\dfrac{-\dot{x}_{O_1} sin\varphi_1 + \dot{y}_{O_1} cos\varphi_1 + \dot{\varphi}_1 l_3}{\dot{x}_{O_1} cos\varphi_1 + \dot{y}_{O_1} sin\varphi_1 - 0,5 l_1\dot{\varphi}_1}; \\
\delta_{21} = -arctan\dfrac{-\dot{x}_{O_1} sin\varphi_2 + \dot{y}_{O_1} cos\varphi_2 - \dot{\varphi}_1 l_4 cos\left(\varphi_1 - \varphi_2\right) - \dot{\varphi}_2 l_5}{\dot{x}_{O_1} cos\varphi_2 + \dot{y}_{O_1} sin\varphi_2 + \dot{\varphi}_1 l_4 sin\left(\varphi_1 - \varphi_2\right) - 0,5 l_7\dot{\varphi}_2}; \\
\delta_{22} = -arctan\dfrac{-\dot{x}_{O_1}\sin\varphi_2 + \dot{y}_{O_1}\cos\varphi_2 - \dot{\varphi}_1 l_4\cos\left(\varphi_1 - \varphi_2\right) - \dot{\varphi}_2 l_5}{\dot{x}_{O_1} cos\varphi_2 + \dot{y}_{O_1} sin\varphi_2 + \dot{\varphi}_1 l_4 sin\left(\varphi_1 - \varphi_2\right) + 0,5 l_7\dot{\varphi}_2}.
\end{cases} \tag{21}$$

Бічні сили приймаються пропорційно до кутів бокового уводу (21):

$$T_i = C_i\delta_i,$$

де C_i – коефіцієнт опору бокового уводу *i*-го колеса.

Сили бокового уводу P_δ спрямовано перпендикулярно до площині обіду коліс, рушійні сили $P_к$ та сили опору коченню P_f – вздовж лінії вектора швидкості центру колеса у відповідних напрямках (рис. 1, б).

Отримуємо такі формули для обчислення узагальнених сил:

$$\begin{aligned}
Q_{O1x} = &\begin{pmatrix}
\left(P_{K11} - P_{f11}\right)\cos\left(\gamma_{11} - \delta_{11}\right) - P_{\delta 11}\sin\gamma_{11} + \\
+\left(P_{K12} - P_{f12}\right)\cos\left(\gamma_{12} - \delta_{12}\right) - \\
-P_{\delta 12}\sin\gamma_{12} + \left(P_{K13} - P_{f13}\right)\cos\delta_{13} + \\
+\left(P_{K14} - P_{f14}\right)\cos\delta_{14} + F_{O1x}
\end{pmatrix}\cos\varphi_1 - \\
&-\begin{pmatrix}
P_{\delta 11}\sin\gamma_{11} + \left(P_{K11} - P_{f11}\right)\sin\left(\gamma_{11} - \delta_{11}\right) + \\
+\left(P_{K12} - P_{f12}\right)\cos\left(\gamma_{12} - \delta_{12}\right) + \\
+\left(P_{K12} - P_{f12}\right)\sin\left(\gamma_{12} - \delta_{12}\right) + F_{O1y} + P_{\delta 13} + P_{\delta 14} - \\
-\left(P_{K13} - P_{f13}\right)\sin\delta_{13} - \left(P_{K14} - P_{f14}\right)\sin\delta_{14}
\end{pmatrix}\sin\varphi_1 + \\
&+\left(F_{O2x} - P_{f21}\cos\delta_{21} - R_2\cos\gamma_{21} - P_{f22}\cos\delta_{22}\right)\cos\varphi_2 - \\
&-\left(P_{f21}\sin\delta_{21} + R_2\sin\gamma_{21} + P_{\delta 21} + P_{\delta 22} + P_{f22}\sin\delta_{22} + F_{O2y}\right)\sin\varphi_2;
\end{aligned} \tag{22}$$

$$Q_{O1y}=\begin{pmatrix}\left(P_{K11}-P_{f11}\right)\cos\left(\gamma_{11}-\delta_{11}\right)-P_{\delta11}\sin\gamma_{11}+\\+\left(P_{K12}-P_{f12}\right)\cos\left(\gamma_{12}-\delta_{12}\right)-P_{\delta12}\sin\gamma_{12}+\\+\left(P_{K13}-P_{f13}\right)\cos\delta_{13}+\left(P_{K14}-P_{f14}\right)\cos\delta_{14}+F_{O1x}\end{pmatrix}\sin\varphi_1+$$

$$+\begin{pmatrix}\left(P_{K11}-P_{f11}\right)\cos\gamma_{11}+P_{\delta11}\sin\left(\gamma_{11}-\delta_{11}\right)+\\+\left(P_{K12}-P_{f12}\right)\cos\gamma_{12}+P_{\delta12}\sin\left(\gamma_{12}-\delta_{12}\right)+\\+F_{O1y}+P_{\delta13}+P_{\delta14}-\left(P_{K13}-P_{f13}\right)\sin\delta_{13}-\left(P_{K14}-P_{f14}\right)\sin\delta_{14}\end{pmatrix}\cos\varphi_1+$$

$$+\left(F_{O2x}-P_{f21}\cos\delta_{21}-P_2\cos\gamma_{21}-P_{f22}\cos\delta_{22}\right)\sin\varphi_2+$$

$$+\left(P_{f21}\sin\delta_{21}+P_2\sin\gamma_{21}+P_{\delta21}+P_{\delta22}+P_{f22}\sin\delta_{22}+F_{O1y}\right)\cos\varphi_2;$$

$$Q_{\varphi_1}=\left(P_{\delta11}\cos\gamma_{11}-\left(P_{K11}-P_{f11}\right)\sin\left(\gamma_{11}-\delta_{11}\right)+P_{\delta12}\cos\left(\gamma_{12}-\delta_{12}\right)\right)l_2-$$

$$-\left(P_{\delta13}+P_{\delta14}-\left(P_{K13}-P_{f13}\right)\sin\delta_{13}-\left(P_{K14}-P_{f14}\right)\sin\delta_{14}\right)l_3+$$

$$+\begin{pmatrix}P_{\delta11}\sin\gamma_{11}-\left(P_{K11}-P_{f11}\right)\cos\left(\gamma_{11}-\delta_{11}\right)+\left(P_{K13}-P_{f13}\right)\cos\delta_{13}+\\+\left(P_{K14}-P_{f14}\right)\cos\delta_{14}+\left(P_{K12}-P_{f12}\right)\cos\left(\gamma_{12}-\delta_{12}\right)-P_{\delta12}\sin\gamma_{12}\end{pmatrix}\cdot$$

$$\cdot0,5l_1+M_{O1}+M_{O2}-$$

$$-\left(P_{\delta21}+P_{f21}\sin\delta_{21}+P_{\delta22}+P_{f22}\sin\delta_{22}\right)\cdot\left(l_5+l_4\cos\left(\varphi_1-\varphi_2\right)\right)-$$

$$-P_2\sin\gamma_{21}\left(l_5+l_4\cos\left(\varphi_1-\varphi_2\right)\right)-P_2\cos\gamma_{21}l_4\sin\left(\varphi_1-\varphi_2\right)+$$

$$+F_{O2x}l_4\sin\left(\varphi_1-\varphi_2\right)-F_{O2x}\left(l_5+l_4\cos\left(\varphi_1-\varphi_2\right)\right)-P_{f22}\cos\delta_{22}\cdot$$

$$\cdot\left(0,5l_7+l_4\sin\left(\varphi_1-\varphi_2\right)\right)+P_{f21}\cos\delta_{21}\left(0,5l_7-l_4\sin\left(\varphi_1-\varphi_2\right)\right);$$

$$Q_{\varphi_2}=\left(P_{f21}\cos\delta_{21}-P_{f22}\cos\delta_{22}\right)0,5l_7-\left(P_{\delta21}+P_{\delta22}\right)l_5+$$

$$+P_2\sin\gamma_{21}l_5-F_{O2y}l_5+M_{O2}.$$

Отримана система рівнянь Лагранжу 2-го роду (1)–(22) є суттєво нелінійною [14], тому система диференціальних рівнянь не має рішення, які могли бути представлені в аналітичному вигляді. Відповідно, для вирішення також системи звичайних диференційних рівнянь необхідно використовувати чисельний метод рішення і відповідне програмне забезпечення.

Для використання чисельного методу рішення системи диференційних рівнянь (модифікований метод Рунге-Кутта 4-5 порядку) необхідно привести систему (1)–(22) до виду Коші. З цією метою введемо наступні змінні:

$$\begin{cases}a_{11}=m_1+m_2;a_{12}=0;a_{13}=m_2l_4\sin\varphi_1;a_{14}=m_2l_5\sin\varphi_2;\\a_{21}=0;a_{22}=m_1+m_2;a_{23}=-m_2l_4\cos\varphi_1;a_{24}=-m_2l_5\cos\varphi_2;\\a_{31}=m_2l_4\sin\varphi_1;a_{32}=-m_2l_4\cos\varphi_1;a_{33}=J_1+m_2l_4^2;a_{34}=m_2l_4l_5;\\a_{41}=m_2l_5\sin\varphi_2;a_{42}=-m_2l_5\cos\varphi_2;a_{43}=m_2l_5l_4\cos\left(\varphi_1-\varphi_2\right);a_{44}=J_2+m_2l_5^2.\end{cases}\quad(23)$$

З урахуванням рівнянь (2.1)–(2.22) після проведення необхідних угруповань і перетворень отримаємо рівняння Лагранжа, які матимуть вигляд:

$$\begin{cases} a_{11}\ddot{x}_{O_1} + a_{12}y_{O_1} + a_{13}\ddot{\varphi}_1 + a_{14}\ddot{\varphi}_2 = Q_{x_{O_1}}; \\ a_{21}\ddot{x}_{O_1} + a_{22}y_{O_1} + a_{23}\ddot{\varphi}_1 + a_{24}\ddot{\varphi}_2 = Q_{y_{O_1}}; \\ a_{31}\ddot{x}_{O_1} + a_{32}y_{O_1} + a_{33}\ddot{\varphi}_1 + a_{34}\ddot{\varphi}_2 = Q_{\varphi_1}; \\ a_{41}\ddot{x}_{O_1} + a_{42}y_{O_1} + a_{43}\ddot{\varphi}_1 + a_{44}\ddot{\varphi}_2 = Q_{\varphi_2}, \end{cases} \quad (24)$$

Коефіцієнти при других похідних системах (24) та узагальнені сили є функціями масових, геометричних, експлуатаційних параметрів трактора та агрегату, узагальнених координат та швидкостей. Рівняння руху МТА є системою чотирьох неоднорідних диференціальних рівнянь другого порядку.

Для приведення рівнянь (1)–(22) до виду Коші та чисельного рішення системи СЛАР методом Крамера був використаний математичний пакет програм MatLab 2021a [15].

Розроблена математична модель дозволяє досліджувати динаміку (рух) елементів посівного МТА у поздовжньо-паралельній площині та визначати вплив геометричних параметрів агрегату на його динаміку, коливання елементів навколо прямолінійної траєкторії та стійкість руху.

Висновки

1. Для забезпечення заданої точності розділення компонентів НС дрібнонасінних культур доцільним є урахування впливу повітряного потоку, що утворюється у міждековому просторі віброфрикційних сепараторів. При цьому урахування тільки стаціонарної складової дає уявлення про рух повітряного потоку між вібруючими поверхнями «в середньому», вплив пульсуючої складової швидкості повітряного потоку між вібруючими площинами, в окремих режимах вібраційного переміщення, є визначальним для реалізації технологічного процесу сепарації НС.

2. Збільшення частоти і амплітуди коливань робочого органу зумовлює зростання середньої швидкості руху насіння, максимальна швидкість переміщення частинки досягається в інтервалі зміни параметрів: A = 1,0…1,7 мм; ω = 200…260 с$^{-1}$. Подальше збільшення цих параметрів призводить до зменшення швидкості вібраційного переміщення компонентів. В той же час, швидкість переміщення частинки без врахування впливу повітряного середовища продовжує зростати. При швидкості руху робочого органу ($A\omega$) більше 27…30 см/с вплив повітряного середовища призводить до зниження швидкості вібраційного переміщення частинок. Для забезпечення максимальної продуктивності процесу швидкість руху робочого органу не повинна перевищувати вищенаведених значень.

3. Середня швидкість переміщення частинок має тенденцію до зменшення при збільшенні значення кута нахилу робочої поверхні α, причому при досягненні певного значення кута нахилу, частинка зупиняється, а при подальшому збільшенні α переміщається у зворотному напрямку. Частинка з меншим значенням коефіцієнта миттєвого тертя λ змінює напрямок руху при меншому значенні кута нахилу площини, а з більшим λ – при більшому значенні α. Так при α = 7,5° часточки з λ = 0,076 будуть переміщатися вниз, а часточки з λ = 0,27 будуть переміщатися вверх по вібраційній площині, тобто буде відбуватися процес розділення компонентів НС.

4. Зміна кута спрямованості коливань ε має не такий суттєвий вплив на швидкість переміщення насіння, як амплітуда і частота коливань, збільшення ε до 35…40° забезпечує підвищення швидкості переміщення, а подальше збільшення кута ε призводить до зниження середньої швидкості руху насіння по робочому органу. Найбільшої продуктивності віброфрикційного сепаратора можна досягти при встановленні ε = 35…40°.

5. При збільшенні зазору *H* від 3 до 6 мм швидкість переміщення знижується, а при подальшому збільшенні зазору підвищується і після 12 мм залишається постійною. Отже менш доцільним, з точки зору швидкості переміщення компонентів НС по робочій поверхні віброфрикціного сепаратора, є зазор між деками в межах 3,5…10 мм.

Список використаних джерел

1. Adamchuk, V., Bulgakov, V., Nadykto, V., Trohaniak, O., & Chorna, T. (2023). Theoretical study of the stability of asymmetric movement sowing machine-tractor aggregate. Visnyk Agrarnoi Nauky, 101(5), 57–64. https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202305-08.

2. Parihar, N. S., Sharma, S., & Khar, S. (2024). Factors Affecting the Performance of a Potato Digger – A Review. Potato Research, 67(4), 1563–1580. https://doi.org/10.1007/s11540-024-09704-5.

3. Han, J., Yan, X., & Tang, H. (2023). Method of controlling tillage depth for agricultural tractors considering engine load characteristics. Biosystems Engineering, 227, 95–106. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2023.01.011

4. Sun, J., Zhang, Y., Zhang, Y., Li, P., & Teng, G. (2022). Precision Seeding Compensation and Positioning Based on Multisensors. Sensors, 22(19), 7228. https://doi.org/10.3390/s22197228.

5. Startcev, A., Romanov, S., & Vagina, O. (2021). Research into the Course Stability of a Four-Wheel Drive Wheeled Machine–Tractor Unit. In Lecture Notes in Mechanical Engineering (pp. 607–614). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54814-8_70.

6. Babaei Robat, A., Arezoo, K., Alipour, K., & Tarvirdizadeh, B. (2024). Dynamics modeling and path following controller of tractor-trailer-wheeled robots considering wheels slip. ISA Transactions, 148, 45–63. https://doi.org/10.1016/j.isatra.2024.03.004.

7. Li, X., Xu, L., Liu, M., Yan, X., & Zhang, M. (2024). Research on torque cooperative control of distributed drive system for fuel cell electric tractor. Computers and Electronics in Agriculture, 219, 108811. https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108811.

8. Prasanna Kumar, G. V., Srivastava, B., & Nagesh, D. S. (2009). Modeling and optimization of parameters of flow rate of paddy rice grains through the horizontal rotating cylindrical drum of drum seeder. Computers and Electronics in Agriculture, 65(1), 26–35. https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.07.006.

9. Wang, L., Zhu, J., Liu, F., He, Z., Lai, Q., Zhu, Z., Song, Z., & Li, Z. (2024). Algorithm and scale experiment of gyro-based tractor rollover control towards hilly farmland application. Computers and Electronics in Agriculture, 220, 108925. https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108925.

10. Антощенков Р. В., Череватенко Г. І., Задорожний В. П., Світличний О. В., Кусков М. А. Дослідження динаміки повнопривідної тягово-транспортної машини. Український журнал прикладної економіки та техніки, 2023. Т. 7. № 3. С. 125–135.

11. 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. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.254688. (Scopus)

12. Volodymyr Bulgakov, Roman Antoshchenkov, Valerii Adamchuk, Ivan Halych, Yevhen Ihnatiev, Ivan Beloev, Semjons Ivanovs. Investigation of the tractor performance when ballasting its rear half-frame. INMATEH –Agricultural Engineering, 2022. Vol. 68. No. 3. PP. 533–542.

13. ten Damme, L., Schjønning, P., J. Munkholm, L., Green, O., K. Nielsen, S., & Lamandé, M. (2021). Traction and repeated wheeling – effects on contact area characteristics and stresses in the upper subsoil. Soil and Tillage Research, 211, 105020. https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105020.

14. 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.

15. Shior, M. M., Agbata, B. C., Gbor, G. D., Ezugorie, I. U., & Topman, N. N. (2024). Solution of First Order Ordinary Differential Equations Using Fourth Order Runge-Kutta Method with MATLAB. International Journal of Mathematics and Statistics Studies, 12(1), 54–63. https://doi.org/10.37745/ijmss.13/vol12n15463.

References

1. Adamchuk, V., Bulgakov, V., Nadykto, V., Trohaniak, O., & Chorna, T. (2023). Theoretical study of the stability of asymmetric movement sowing machine-tractor aggregate. Visnyk Agrarnoi Nauky, 101(5), 57–64. https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202305-08.

2. Parihar, N. S., Sharma, S., & Khar, S. (2024). Factors Affecting the Performance of a Potato Digger – A Review. Potato Research, 67(4), 1563–1580. https://doi.org/10.1007/s11540-024-09704-5.

3. Han, J., Yan, X., & Tang, H. (2023). Method of controlling tillage depth for agricultural tractors considering engine load characteristics. Biosystems Engineering, 227, 95–106. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2023.01.011

4. Sun, J., Zhang, Y., Zhang, Y., Li, P., & Teng, G. (2022). Precision Seeding Compensation and Positioning Based on Multisensors. Sensors, 22(19), 7228. https://doi.org/10.3390/s22197228.

5. Startcev, A., Romanov, S., & Vagina, O. (2021). Research into the Course Stability of a Four-Wheel Drive Wheeled Machine–Tractor Unit. In Lecture Notes in Mechanical Engineering (pp. 607–614). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54814-8_70.

6. Babaei Robat, A., Arezoo, K., Alipour, K., & Tarvirdizadeh, B. (2024). Dynamics modeling and path following controller of tractor-trailer-wheeled robots considering wheels slip. ISA Transactions, 148, 45–63. https://doi.org/10.1016/j.isatra.2024.03.004.

7. Li, X., Xu, L., Liu, M., Yan, X., & Zhang, M. (2024). Research on torque cooperative control of distributed drive system for fuel cell electric tractor. Computers and Electronics in Agriculture, 219, 108811. https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108811.

8. Prasanna Kumar, G. V., Srivastava, B., & Nagesh, D. S. (2009). Modeling and optimization of parameters of flow rate of paddy rice grains through the horizontal rotating cylindrical drum of drum seeder. Computers and Electronics in Agriculture, 65(1), 26–35. https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.07.006.

9. Wang, L., Zhu, J., Liu, F., He, Z., Lai, Q., Zhu, Z., Song, Z., & Li, Z. (2024). Algorithm and scale experiment of gyro-based tractor rollover control towards hilly farmland application. Computers and Electronics in Agriculture, 220, 108925. https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108925.

10. Antoshchenkov R. V., Cherevatenko G. I., Zadorozhny V. P., Svitlychny 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. 7. No. 3. Pp. 125–135.

11. 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. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.254688. (Scopus)

12. Volodymyr Bulgakov, Roman Antoshchenkov, Valerii Adamchuk, Ivan Halych, Yevhen Ihnatiev, Ivan Beloev, Semjons Ivanovs. Investigation of the tractor performance when ballasting its rear half-frame. INMATEH –Agricultural Engineering, 2022. Vol. 68. No. 3. PP. 533–542.

13. ten Damme, L., Schjønning, P., J. Munkholm, L., Green, O., K. Nielsen, S., & Lamandé, M. (2021). Traction and repeated wheeling – effects on contact area characteristics and stresses in the upper subsoil. Soil and Tillage Research, 211, 105020. https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105020.

14. 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.

15. Shior, M. M., Agbata, B. C., Gbor, G. D., Ezugorie, I. U., & Topman, N. N. (2024). Solution of First Order Ordinary Differential Equations Using Fourth Order Runge-Kutta Method with MATLAB. International Journal of Mathematics and Statistics Studies, 12(1), 54–63. https://doi.org/10.37745/ijmss.13/vol12n15463.

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ
SCIENCE JOURNAL

ТЕХНІЧНИЙ СЕРВІС АГРОПРОМИСЛОВОГО,
ЛІСОВОГО ТА ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСІВ
2024, № 25

TECHNICAL SERVICE OF AGRICULTURE,
FORESTRY AND TRANSPORT SYSTEMS
2024, № 25

Українською, англійською мовами

Підписано до друку 28.12.2024.
Формат 60Ч84 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