

ISSN 2664-262X

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Центральноукраїнський національний технічний університет

**ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВИЙ ВІСНИК.
ТЕХНІЧНІ НАУКИ**

За загальною редакцією М.І. Черновола

Заснований у 1997 році

**В и п у с к 10(41)
Частина II**

Кропивницький • 2024

ISSN 2664-262X

Ministry of Education and Science of Ukraine
Central Ukrainian National Technical University

**CENTRAL UKRAINIAN SCIENTIFIC BULLETIN.
TECHNICAL SCIENCES**

Under the general editorship of M. Chernovol

Founded in 1997

**Issue 10(41)
Part II**

Kropyvnytskyi • 2024

У науковому віснику представлені статті, присвячені проблемам проектування, експлуатації та ремонту сільськогосподарської техніки і транспортних засобів, технології виробництва, транспортних технологій та логістики, будівництва, матеріалознавства, ІТ-технологій, роботизації, автоматизації в промисловості та сільському господарстві. Наведені практичні рекомендації до використання результатів досліджень у галузях народного господарства.

Науковий вісник є фаховим виданням, в якому публікуються основні результати наукових досліджень професорсько-викладацького складу, аспірантів, докторантів університету, а також науковців інших навчальних закладів, науково-дослідних інститутів НАНУ та промислових підприємств України.

Збірник розрахований на наукових, науково-технічних працівників різних галузей науки та техніки, ЗВО, здобувачів вчених ступенів і звань.

Рекомендовано до друку Вченою радою Центральноукраїнського національного технічного університету, протокол від 23 грудня 2024 року № 4.

Головний редактор: д-р техн. наук, проф. Черновол М.І.

Редакційна колегія: Аулін В.В., д-р техн. наук, проф., (заступник головного редактора за галузями: 13 «Механічна інженерія», 19 «Архітектура та будівництво», 20 «Аграрні науки та продовольство», 27 «Транспорт»); Лисенко С.В., канд. техн. наук, доц. (відповідальний секретар за галузями: 13 «Механічна інженерія», 19 «Архітектура та будівництво», 20 «Аграрні науки та продовольство», 27 «Транспорт»); Смірнов О.А., д-р техн. наук, проф., (заступник головного редактора за галузями: 12 «Інформаційні технології», 15 «Автоматизація та приладобудування»); Доренський О.П., канд. техн. наук, доц. (відповідальний секретар за галузями: 12 «Інформаційні технології», 15 «Автоматизація та приладобудування»); Березюк І.А., канд. техн. наук, доц.; Варума Аріфа, Dr PhD (Нігер); Васильковський О.М., канд. техн. наук, проф.; Віхрова Л.Г., канд. техн. наук, проф.; Галкін А.С., д-р техн. наук, проф.; Гамалій В.Ф., д-р ф.-м. наук, проф.; Гасенко А.В., канд. техн. наук, доц.; Голуб Д.В., канд. техн. наук, доц.; Гриньків А.В., канд. техн. наук, ст. наук співр.; Дарієнко В.В., канд. техн. наук, доц.; Зоценко М.Л., д-р техн. наук, проф.; Івашук В.В., д-р техн. наук, доц.; Карпушин С.О., канд. техн. наук, доц.; Кириченко А.М., д-р техн. наук, проф.; Клименко В.В., д-р техн. наук, проф.; Коваленко О.В., д-р техн. наук, проф.; Кондратець В.О., д-р техн. наук, проф.; Коренькова Т.В. д-р техн. наук, доц.; Кузик О.В., канд. техн. наук, доц.; Матейчик В.П., д-р техн. наук, проф.; Мацуї А.М. канд. техн. наук, доц.; Мелешко С.В., д-р техн. наук, проф.; Осадчий С.І., д-р техн. наук, проф.; Пашинський В.А. д-р техн. наук, проф.; Пашинський М.В., канд. техн. наук; Плешков П.Г. канд. техн. наук, проф.; Россолов О.В., д-р техн. наук, доц.; Сало В. М., д-р техн. наук, проф.; Смірнов С.А., канд. техн. наук, доц.; Солових Є.К., д-р техн. наук, проф.; Сторчак М.Г., д-р техн. наук, ст. наук співр. (Німеччина); Тарандушка Л.А., д-р техн. наук, проф.; Філімоніхін Г.Б., д-р техн. наук, проф.; Шепеленко І.В., д-р техн. наук, порф.; Яцун В.В., канд. техн. наук, доц.

Адреса редакційної колегії: 25030, м. Кропивницький, проспект Університетський, 8,
Центральноукраїнський національний технічний університет, тел.: +380 (522)
390-472, +380 (522) 390-437, +380 (522) 55-10-49.

Офіційний сайт: <http://mapiea.kntu.kr.ua/>

Автори опублікованих матеріалів несуть відповідальність за підбір і точність наведених фактів, цитат, економіко-статистичних даних, власних імен та інших відомостей, а також за те, що матеріали не містять даних, які не підлягають відкритій публікації. Редакція може публікувати статті в порядку обговорення, не поділяючи точки зору автора.

Науковий вісник заснований у 1997 році.

Включений до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватись результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (доктора філософії) в галузі технічних наук (постанови Президії ВАК України від 9 червня 1999 року №1-05/7, від 14 жовтня 2009 року № 1-05/4; накази Міністерства освіти і науки України від 29 грудня 2014 року № 1528, від 07 листопада 2018 року № 1218, від 02 липня 2020 року № 886, від 24 вересня 2020 року № 1188).

Науковий вісник зберігається в загальнодержавній реферативній базі даних «Україніка наукова» Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського та представлений у міжнародних наукометричних базах даних *Index Copernicus*, *CrossRef*, *Open Ukrainian Citation Index*, *WorldCat*, *ResearchBib*, *Google Scholar*

Ідентифікатор медіа: **R30-03350** (рішення Національної ради України від 25.04.2024 р. № 1418).

ISSN 2664-262X (p), 2707-9449 (o)

DOI: 10.32515/2664-262X

КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ

УДК 004.056

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.3-10](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.3-10)**О.А. Ревнюк**, асп. **Н.В. Загородна**, доц., канд. техн. наук*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна**e-mail: revo0708@gmail.com***О.С. Улічев**, канд. техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**e-mail: askin79@gmail.com*

Адаптивна методологія розрахунку кількісного показника стану захищеності вебзастосунків

Розроблена методологія оцінки захищеності вебзастосунків враховує різні аспекти безпеки на основі вимог OWASP ASVS, з яких сформовано релевантну вибірку. Розроблено структурований набір критеріїв з чіткими правилами оцінювання кожної вимоги. Введено систему вагових коефіцієнтів для критеріїв та вимог, що дозволяє адаптуватись під архітектуру, функціонал та вимоги щодо захисту вебсайту. Підхід дозволяє отримувати кількісні метрики виконання кожної вимоги, розділу та інтегровану оцінку безпеки сайту.

web application security, quantitative assessment, OWASP ASVS, evaluation criteria, security assessment

Постановка проблеми. У сучасному світі інформаційних технологій вебдодатки стали невід'ємною частиною життєдіяльності багатьох організацій та користувачів. Вони використовуються у різноманітних сферах – від електронної комерції до державних сервісів і соціальних мереж – забезпечуючи зручний доступ до послуг, автоматизацію бізнес-процесів і керування даними у реальному часі. Проте з розвитком веб-технологій зростає і загроза кіберзлочинності, яка постійно еволюціонує та пристосовується до нових технічних реалій. Кількість кібератак, спрямованих на веб-додатки, зростає щороку [1], що ставить питання їх безпеки у пріоритетний ряд завдань для розробників, аналітиків та фахівців з кібербезпеки.

Атаки на системи безпеки вебсайтів не є новими і відбуваються з початку епохи Web 2.0. Вразливості на вебсайтах притаманні як звичайним компаніям, так і брендовим. Наприклад, збитки від кібератак для відомих брендів у 2018–2019 роках оцінюються у понад 350 мільйонів доларів [2–4]. Постійна загроза кіберзлочинності призводить до необхідності впровадження нових, більш ефективних методів і засобів забезпечення захищеності вебдодатків. За даними міжнародних звітів з кібербезпеки [5, 6], більшість кібератак орієнтовані саме на веб-інтерфейси, де зловмисники використовують різноманітні техніки для проникнення у системи та компрометації даних. Особливого значення набули такі загрози, як несанкціонований доступ до конфіденційних даних, атаки типу SQL-ін'єкції, Cross-Site Scripting (XSS) [7], атаки на сесії користувачів та вразливості в системах автентифікації. Подібні уразливості призводять до масштабних інцидентів, результатами яких є втрати даних, порушення конфіденційності та збої у роботі систем.

Основний напрямок для зменшення кількості атак – це систематичне тестування безпеки та оцінка вразливостей. Крім того, з розвитком хмарних обчислень і поширенням архітектур на базі мікросервісів питання захищеності веб-додатків стає ще більш складнішим. Веб-додатки не лише повинні захищати дані, але й забезпечувати

їхню цілісність і доступність у розподілених середовищах, де багато компонентів взаємодіють один з одним через відкриті інтерфейси. Така складність архітектур ускладнює процес захисту, оскільки кожен елемент системи може стати потенційною точкою входу для атак. Отже, забезпечення належного рівня захищеності веб-додатків потребує комплексного підходу, що враховує як традиційні методи захисту, так і новітні рішення для протидії сучасним кіберзагрозам.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З початку XXI століття дослідження безпеки вебсайтів зазнали значної еволюції, тісно пов'язаної з бурхливим розвитком веб-технологій. На початку 2000-х років фокус досліджень був зосереджений на обмеженому спектрі вразливостей, характерних для тогочасних веб-додатків, таких як міжсайтовий скриптинг (XSS) та SQL-ін'єкції. Проте стрімкий розвиток веб-технологій, поява нових архітектурних підходів (AJAX, Web 2.0) та розширення функціональності веб-додатків призвели до значного ускладнення ландшафту веб-безпеки та виникнення нових векторів атак.

Сучасні дослідження у сфері безпеки вебсайтів характеризуються комплексним підходом, який охоплює як традиційні аспекти безпеки, так і нові виклики, пов'язані з розвитком хмарних технологій, мікросервісної архітектури та прогресивних веб-додатків. Особлива увага приділяється автоматизованим засобам виявлення вразливостей, включаючи розробку більш досконалих сканерів безпеки та методів статичного і динамічного аналізу коду.

На ринку існує безліч інструментів для збору інформації та оцінки вразливостей, проте вони не можуть забезпечити 100% точності та рішення для виявлення конкретних вразливостей відповідно до CWE (Common Weakness Enumeration). До такого висновку дійшли науковці Dixitkumar .V та Prajapati1, які проводили дослідження [8] інструментів для оцінки вразливостей та збору інформації різних форматів й функціональних можливостей. Вони запропонували власний підхід, який полягає в об'єднанні кількох інструментів для збору інформації та оцінки вразливостей, що дозволяє досягти більш високого рівня покриття та точності виявлення вразливостей.

Дослідження [9] авторів Nikhil Rane та Amna Qureshi висвітлює порівняння автоматизованого сканування та ручного тестування вебсайтів на проникнення для оцінки ефективності цих методів у виявленні вразливостей. Експериментальні результати підтвердили, що ручне тестування на проникнення є більш ефективним, ніж автоматизоване, з точки зору точності та глибини аналізу. Дослідники дійшли висновку, що практичні дослідження підкреслюють важливість навичок і досвіду фахівця з тестування на проникнення у виявленні та використанні слабких місць у безпеці. Автоматизовані інструменти, хоча й корисні для початкового сканування, можуть генерувати хибнопозитивні результати та пропускати специфічні вразливості.

Важливим етапом у розвитку досліджень стало формування галузевих стандартів та рекомендацій від провідних організацій з інформаційної безпеки, таких як OWASP (Open Web Application Security Project) [10], NIST (National Institute of Standards and Technology) [11] та SANS Institute [12]. Ці стандарти, зокрема OWASP Top 10, не лише систематизували знання про відомі вразливості та методи захисту, але й сприяли розробці єдиної методологічної бази для проведення досліджень та аудиту безпеки веб-додатків на різних етапах життєвого циклу веб-додатка.

Незважаючи на інтенсивний розвиток методологічних баз та ініціатив стандартизації у галузі інформаційної безпеки, спостерігається суттєва прогалина в інструментарії оцінки захищеності вебресурсів. Існуючі автоматизовані системи сканування безпеки, хоча й забезпечують визначення широкого спектру вразливостей, демонструють істотні обмеження у верифікації критичних параметрів захисту. Зокрема,

поза межами їх функціональності залишається багато речей, що потрібно перевіряти вручну, таких, для прикладу, як аналіз політики парольної автентифікації для доступу до персоналізованих інтерфейсів користувача та валідація коректності імплементації механізмів журналювання безпекових інцидентів під час здійснення кібератак тощо.

Чинні галузеві стандарти та нормативні документи у сфері вебзахисту здебільшого зосереджуються на класифікації та категоризації потенційних вразливостей вебзастосунків, проте не пропонують уніфікованої методології кількісної оцінки рівня їх захищеності. З огляду на різноманітність функціонального навантаження сучасних вебресурсів та диверсифікацію їх архітектурних рішень, актуалізується проблематика детермінації необхідного та достатнього обсягу тестування безпеки. Відсутність стандартизованої системи обчислення коефіцієнта захищеності вебресурсу суттєво ускладнює розуміння ситуації, процес ідентифікації потенційних векторів компрометації та розробки рішень покращення захисту вебсайту.

Постановка завдання. Метою дослідження є розробка адаптивної методології кількісної оцінки рівня захищеності вебдодатку шляхом динамічного розрахунку коефіцієнта безпеки з урахуванням індивідуальних характеристик проекту, зокрема специфіки його функціоналу та архітектури.

Виклад основного матеріалу. У сучасному ландшафті кібербезпеки спостерігається зростання популярності OWASP Application Security Verification Standard (ASVS) [13] - комплексного стандарту, що регламентує вимоги до захищеності веб-додатків. ASVS надає чітко структурований набір контролів безпеки структурований по 14 розділах, спрямованих на забезпечення конфіденційності, цілісності та доступності інформаційних активів.

Даний стандарт позиціонується як практичний інструментарій для проведення всебічної оцінки безпеки веб-додатків протягом усього життєвого циклу розробки програмного забезпечення - від стадії проектування до виведення з експлуатації. Важливою перевагою ASVS є його інтеграція з загальновизнаною системою класифікації вразливостей Common Weakness Enumeration (CWE) [14]. Це сприяє стандартизації підходів до ідентифікації та усунення потенційних загроз безпеці. Проте, незважаючи на свою масштабність та практичну цінність, ASVS не надає методологічних засад для формування кількісної оцінки захищеності веб-сайту.

Існуюча структура стандарту орієнтована на якісний аналіз безпеки, що включає перевірку 282 вимог, що розподілені по 14 розділах. Слід зазначити, що на практиці можливість перевірки кожної з вимог залежить від багатьох факторів, зокрема від доступу до інформації, яку має аудитор (доступ до технічної документації, вихідного коду чи розробників), від архітектури та функціоналу досліджуваного вебсайту. Крім того даний стандарт містить вимоги, які необхідно перевірити, проте не дає чітких рекомендацій для їх перевірки. Велика кількість вимог та відсутність єдиної методології їх перевірки ускладнює процес об'єктивного вимірювання та порівняння рівня захищеності різних веб-додатків.

На першому етапі розробки даної методології, було детально проаналізовано вміст кожного розділу та зменшено вибірку вимог для подальшої роботи до 133 вимог, розподілених в межах 13 розділів. Наступним кроком стала розробка авторами множини критеріїв для перевірки кожної з вимог. Для кожного критерію було запропоновано методологію оцінювання за шкалою з трьома градаціями: "0 балів" (відсутність реалізації функціоналу, що відповідає критерію), "0,5 бала" (часткова реалізація) та "1 бал" (повна реалізація або наявність адекватного механізму безпеки).

Для прикладу, розглянемо вимогу: "Verify that the application or framework enforces a strong anti-CSRF mechanism to protect authenticated functionality, and effective anti-automation or anti-CSRF protects unauthenticated functionality".

Ця вимога стосується перевірки та впровадження механізмів захисту від атак Cross-Site Request Forgery (CSRF), які спрямовані на захист аутентифікованих функцій вебдодатка та захист від автоматизованих атак для неаутентифікованих функцій, застосовуючи CAPTCHA або інші методи. Важливо забезпечити правильну обробку помилок, щоб уникнути розкриття чутливої інформації, і належне інформування користувачів у разі невдалих запитів через CSRF-захист. Система повинна вести логування та моніторинг всіх відмов у запитах через CSRF-захист і регулярно тестуватися для виявлення можливих вразливостей. Нижче приведено два з десяти критеріїв оцінювання вимоги:

1. Чи використовуються унікальні CSRF-токени для кожної сесії користувача?

- 0 балів: CSRF-токени не використовуються для сесій користувачів.
- 0.5 бала: Токени використовуються, але не для всіх сесій або не генеруються унікально.
- 1 бал: Унікальні CSRF-токени генеруються для кожної сесії користувача.

2. Чи перевіряються CSRF-токени на кожен запит, що змінює стан?

- 0 балів: CSRF-токени не перевіряються на змінюючі запити.
- 0.5 бала: Токени перевіряються на деякі запити, але не на всі дії, що змінюють стан.
- 1 бал: CSRF-токени перевіряються на всі запити, що змінюють стан.

Проте оцінки за окремими критеріями не дають загального уявлення про якість виконання окремої вимоги чи оцінку безпеки вебдодатку загалом. Крім того, для врахування особливостей архітектури вебдодатку, діючого функціоналу та наявної документації було запропоновано ввести коефіцієнти важливості вимог та критеріїв. Цей етап передбачає суб'єктивну оцінку експертом, який, спираючись на власний досвід та розуміння критичності функціоналу, присвоює коефіцієнти важливості кожній вимозі в межах розділу та кожному критерію в межах вимоги. Для кращого розуміння розглянемо структуру методології, зображену на рисунку 1.

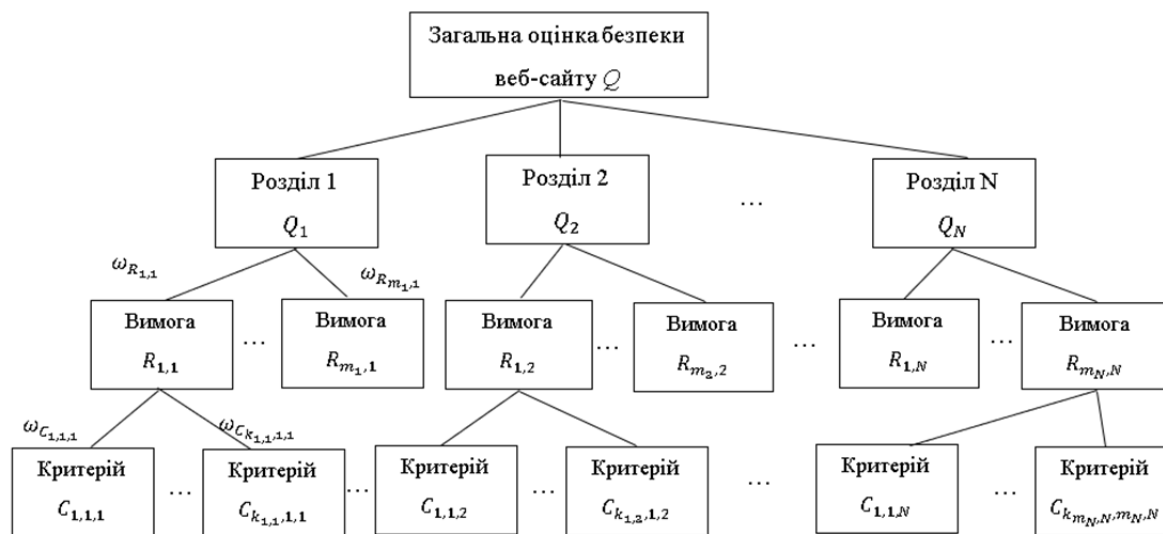


Рисунок 1 – Загальна структура адаптивної методології для оцінювання вебдодатку

Джерело: розроблено авторами

Для кращого розуміння суті рисунку розпишемо детальніше використані позначення:

$R_{m,n}$ – оцінка m -ої вимоги в межах n -го розділу, $m=1..m_n$, $n=1..N$, m_n – кількість вимог в межах n -го розділу, причому $m_1 + m_2 + \dots + m_N = M$, M – загальна кількість вибраних вимог, N – загальна кількість вибраних розділів зі стандарту ASVS.

$C_{k,m,n}$ – значення k -го критерію m -ої вимоги в межах n -го розділу, $k=1..k_{m,n}$, $k_{m,n}$ – кількість розроблених авторами критеріїв для оцінювання m -ої вимоги n -го розділу. Нагадаємо що оцінка кожного критерію відбувається за одним з трьох значень “0”, “0,5” та “1”.

$\omega_{C_{k,m,n}}$ – коефіцієнт важливості k -го критерію m -ої вимоги n -го розділу, що визначається технічним експертом з врахуванням того, як даний критерій впливає на виконання вимоги, до якої він застосовується. Ці коефіцієнти визначені авторами методології апіорі. Однак, експерт, який проводить оцінку, має можливість коригувати ці значення, враховуючи специфіку досліджуваного веб-сайту та вибравши зручну для себе шкалу оцінювання.

$\omega_{R_{m,n}}$ – коефіцієнт важливості k -го критерію m -ої вимоги n -го розділу, що визначається для кожної вимоги аудитором, що проводить оцінку безпеки веб-сайту в залежності від наявної інформації, архітектури та функціоналу системи, а також з огляду на бізнес-контекст, вимоги до захисту інформації. Аудитор може вибрати зручну для себе шкалу для оцінювання важливості вимог. В даній роботі запропоновано використовувати шкалу від 0 (вказує на відсутність функціоналу, що відповідає даній вимозі, в вебдодатку) до 10 (критично важлива вимога для безпеки функціоналу).

На першому кроці обчислень необхідно провести оцінку виконання кожної вимоги. Для цього спершу здійснимо нормалізацію коефіцієнтів важливості критеріїв в межах даної вимоги за формулою:

$$\varpi_{C_{k,m,n}} = \frac{\omega_{C_{k,m,n}}}{\sum_{k=1}^{k_{m,n}} \omega_{C_{k,m,n}}}, \quad (1)$$

де $\varpi_{C_{k,m,n}}$ – нормалізований ваговий коефіцієнт k -го критерію m -ої вимоги n -го розділу;

$\sum_{k=1}^{k_{m,n}} \omega_{C_{k,m,n}}$ – загальна сума вагових коефіцієнтів критеріїв m -ої вимоги n -го розділу.

Тоді інтегральну оцінку виконання m -ої вимоги n -го розділу можна отримати як збалансовану ваговими коефіцієнтами суму оцінок експерта безпеки функціоналу веб-сайту за критеріями в межах даної вимоги:

$$R_{m,n} = \sum_{k=1}^{k_{m,n}} \varpi_{C_{k,m,n}} \cdot C_{k,m,n}. \quad (2)$$

Для отримання оцінок для кожного розділу необхідно спершу нормалізувати коефіцієнти важливості вимог. Це можна зробити за формулою:

$$\varpi_{R_{m,n}} = \frac{\omega_{R_{m,n}}}{\sum_{m=1}^{m_n} \omega_{R_{m,n}}}, \quad (3)$$

де $\omega_{R_{m,n}}$ – нормалізований ваговий коефіцієнт m -ої вимоги n -го розділу;

$\sum_{m=1}^{m_n} \omega_{R_{m,n}}$ – сума вагових коефіцієнтів вимог n -го розділу.

Наступним етапом розрахунків є визначення кількісної оцінки захищеності вебсайту для певного розділу. Оцінку безпеки n -го розділу з врахуванням особливостей структури сайту та індивідуального підходу аудитора можна обчислити як:

$$Q_n = \sum_{k=1}^{m_n} \omega_{R_{m,n}} \cdot R_{m,n} \quad (4)$$

Завершальним етапом є інтегрована оцінка безпеки сайту, яку можна обчислити, як середню оцінку безпеки всіх розділів

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^N Q_n}{N} \quad (5)$$

Отже, в основі розробленої методології лежить диференційований підхід до класифікації вимог безпеки, що враховує рівень критичності захисту даних та специфіку функціональних компонентів веб-додатку і дозволяє отримати кількісну метрику оцінки безпеки вебсайту.

Висновки. Запропонована нова методологія кількісної оцінки рівня захищеності вебзастосунків, яка враховує індивідуальні характеристики проекту, включаючи специфіку функціоналу, архітектуру та рівень критичності даних. Розроблена система показників дозволяє оцінити рівень безпеки вебзастосунку у числовому вимірі та визначити його відповідність встановленим вимогам як на етапі планування проекту, так і на етапі його експлуатації. Запровадження такого адаптивного підходу до оцінювання рівня захисту надасть можливість експерту створення індивідуальних наборів вимог залежно від архітектури, функціоналу та галузі застосування конкретного веб-додатку методом налаштувань коефіцієнтів важливості. Така гнучка модель дозволить отримувати більш точні результати, які відобразатимуть реальні потреби додатку у сфері безпеки. Крім цього, адаптація до конкретних потреб користувачів дозволить уникнути випадків штучного зниження оцінок через відсутність нерелевантних для вебдодатка вимог, що, своєю чергою, забезпечить справедливість і об'єктивність оцінювання.

Практичне значення даної методології полягає у можливості підвищення ефективності процесів розробки та тестування вебзастосунків з врахуванням кіберризиків. Важливо зазначити, що запропонована система показників, яка враховує індивідуальні характеристики вебзастосунків не має аналогів, що робить її унікальною та інноваційною.

Подальші дослідження будуть спрямовані на верифікацію та валідацію запропонованої методології, а також на розробку інструментів автоматизації процесу оцінювання.

Список літератури

1. Zahid A. Vulnerability detection and prevention: an approach to enhance cybersecurity. *MS Computer Science*. 2024. DOI: 10.13140/RG.2.2.31687.71841
2. Humayun. M., Niazi, M., Jhanjhi. N. Cyber Security Threats and Vulnerabilities: A Systematic Mapping Study / M. Humayun et al. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2020. Т. 45(4). 3171–3189. DOI: 10.1007/s13369-019-04319-2.

3. Asaduzzaman M. Security Aspects of ePayment System and Improper Access Control in Microtransactions. *EasyChair*. 2020.
4. 2024 Data Breach Investigations Report. *Verizon Business*. URL: <https://www.verizon.com/business/resources/reports/2024-dbir-data-breach-investigations-report.pdf>.
5. Lella I., Theocharidou M., Magonara E. Enisa threat landscape 2024. ENISA, 2024. 130 с.
6. Ravindran U., Potukuchi R. V. A review on web application vulnerability assessment and penetration testing. *Review of Computer Engineering Studies*. 2022. Т. 9, № 1. С. 1–22. DOI: 10.18280/rces.090101
7. Pentest monkey. URL: <https://pentestmonkey.net/>
8. I. Yaqoob, S.A. Hussain, S. Mamoon. Penetration Testing and Vulnerability Assessment. *Journal of Network Communications and Emerging Technologies (JNCET)*. 2017. Т. 7, № 8.
9. N. Rane, A. Qureshi. Comparative Analysis of Automated Scanning and Manual Penetration Testing for Enhanced Cybersecurity. *12th International Symposium on Digital forensics and security* : : матеріали конференції, м. San Antonio, 29 квіт. 2024 р. San Antonio, 2024.
10. OWASP Foundation, the Open Source Foundation for Application Security. URL: <https://owasp.org>
11. National Institute of Standards and Technology. URL: <https://www.nist.gov>
12. Cyber Security. URL: <https://www.sans.org/emea>
13. A. van der Stock, D. Cuthbert, J. Manico. OWASP Application Security Verification Standard 4.0.3. 2021. 71 с.
14. CWE - Common Weakness Enumeration. URL: <https://cwe.mitre.org>.

References

1. Zahid A. (2024) Vulnerability detection and prevention: an approach to enhance cybersecurity. *MS Computer Science*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31687.71841>
2. Humayun. M., Niazi. M., & Jhanjhi. N. (2020). Cyber Security Threats and Vulnerabilities: A Systematic Mapping Study / M. Humayun et al. *Arabian Journal for Science and Engineering*. (Vol. 45(4)). (pp 3171–3189). <https://doi.org/10.1007/s13369-019-04319-2>.
3. Asaduzzaman M. (2020). Security Aspects of ePayment System and Improper Access Control in Microtransactions. *EasyChair*.
4. (2024) Data Breach Investigations Report. *Verizon Business*. <https://www.verizon.com/business/resources/reports/2024-dbir-data-breach-investigations-report.pdf>.
5. Lella I., Theocharidou M., Magonara E. (2024). Enisa threat landscape. ENISA, 2024.
6. Ravindran U., Potukuchi R. V. (2022). A review on web application vulnerability assessment and penetration testing. *Review of Computer Engineering Studies*. (Vol. 9(1)). <https://doi.org/10.18280/rces.090101>
7. Pentest monkey. <https://pentestmonkey.net/>
8. I. Yaqoob, S.A. Hussain, & S. Mamoon. (2017) Penetration Testing and Vulnerability Assessment. *Journal of Network Communications and Emerging Technologies (JNCET)*. 2017. (Vol. 7(8)).
9. N. Rane, & A. Qureshi. (2024). Comparative Analysis of Automated Scanning and Manual Penetration Testing for Enhanced Cybersecurity. *12th International Symposium on Digital forensics and security* : Conference. San Antonio.
10. OWASP Foundation, the Open Source Foundation for Application Security. <https://owasp.org>
11. National Institute of Standards and Technology. <https://www.nist.gov>
12. Cyber Security Training. <https://www.sans.org/emea>
13. A. van der Stock, D. Cuthbert, & J. Manico. (2021). OWASP Application Security Verification Standard 4.0.3.
14. CWE - Common Weakness Enumeration. <https://cwe.mitre.org>.

Oleksandr Revniuk, post-graduate, **Nataliya Zagorodna**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Ternopil Ivan Puluji National Technical University, Ternopil, Ukraine

Oleksandr Ulichev, PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Adaptive Methodology for Computing the Quantitative Security Status Indicator of Web Applications

This article proposes an adaptive methodology for quantitative security assessment of web applications based on standardized requirements from the OWASP Application Security Verification Standard (ASVS). This methodology takes into account various aspects of website security, including authentication, authorization, data protection, input handling, and others.

The proposed approach allows obtaining quantitative metrics for the level of compliance with each requirement, thus ensuring objectivity and transparency of the evaluation process for both auditors and web application owners. The use of clearly defined numerical metrics facilitates unambiguous interpretation of results and avoids subjectivity in determining the security level of a web application. Based on the analysis of OWASP ASVS requirements, a relevant subset of requirements was formed to assess the security of websites of varying complexity. It was assumed that the expert conducting the assessment possesses the necessary technical competencies and has access to web application development documentation. For each requirement, a structured set of criteria was developed with clearly defined evaluation rules to obtain quantitative indicators. A system of weight coefficients was introduced to determine the significance of each criterion and requirement, and their normalization was performed. The weight coefficients of requirements are established considering the functionality, website architecture, and availability of access to technical documentation or source code. To ensure methodology adaptivity, the auditor has the ability to modify any weight coefficients.

The implementation of an adaptive approach to security assessment allows forming individual requirements based on architecture and functionality of a web application by adjusting weight coefficients. This flexible model ensures more accurate results that reflect the website's actual security state.

web application security, quantitative assessment, OWASP ASVS, evaluation criteria, security assessment

Одержано (Received) 11.11.2024

Прорецензовано (Reviewed) 13.12.2024

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2024

КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 004.75

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.11-22](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.11-22)

Є.В. Мелешко, проф., д-р техн. наук, **М.С. Якименко**, доц., канд. ф.-м. наук,
В.В. Міхав, д-р філос., **Я.П. Шуліка**, асп.

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: elismelashko@gmail.com, m.yakymenko@gmail.com, mihaw.wolodymyr@gmail.com,
yar.shulika@gmail.com*

Математична модель виявлення аномальних зв'язків між компонентами складної комп'ютерної системи

Об'єктом дослідження є процес виявлення аномалій у високонавантажених складних комп'ютерних системах (ВНСКС). Сфера практичного використання включає ВНСКС, такі як сервери банківських транзакцій, хмарні платформи, де необхідно забезпечити стабільну роботу в умовах великої кількості запитів. Проблема, що вирішується в дослідженні, полягає у відсутності моделей виявлення аномалій у ВНСКС у реальному часі з заданою точністю в умовах обмежених ресурсів. Створено та досліджено математичну модель виявлення аномальних зв'язків між компонентами складної комп'ютерної системи (ВАЗККС). Результати тестування моделі показали наступні показники ефективності: точність – 84%, точність позитивних прогнозів – 87%, повнота – 74%, зважена середня точність (ЗСТ) – 78%. Позитивні результати дослідження пояснюються наступними передумовами, модель ВАЗККС використовує ортогональні векторні функції та проєкційні матриці для аналізу аномалій у складній комп'ютерній системі. Що дозволяє будувати просторові розклади, за допомогою яких можна виявляти складні взаємозв'язки між компонентами складної комп'ютерної системи, використовуючи тільки власні вектори та значення. Таким чином, модель може застосовуватися для оперативного аналізу даних та виявлення аномалій в умовах обмежених ресурсів.

високонавантажені складні комп'ютерні системи, виявлення аномалій, математичні моделі, динамічний хаос, складні мережі

Постановка проблеми. Високонавантажені веб-сервіси та складні комп'ютерні системи та мережі становлять ключову частину сучасної інфраструктури, оскільки забезпечують стабільну роботу банківських послуг, комерційних платформ, онлайн-освітніх ресурсів, соціальних мереж та багатьох інших критичних галузей. З огляду на значне навантаження, яке ці системи щоденно витримують, для їхньої стабільної роботи необхідно дотримуватися високих вимог до показників безпеки та надійності.

Одна з головних проблем для таких систем – це виявлення аномалій у реальному часі. Аномалії можуть сигналізувати про несправності у функціонуванні системи, невідповідності в процесах або потенційні кібератаки. Високонавантажені системи є особливо чутливими до навіть незначних збоїв, оскільки вони можуть спричинити значні затримки або повну недоступність сервісу для багатьох користувачів одночасно, що призводить до фінансових втрат та втрати довіри клієнтів.

Сучасні веб-сервіси стикаються з такими проблемами як спроби DDoS-атак, значні перепади в запитах користувачів, проблеми з підключенням до баз даних, витоки пам'яті, а також вплив несподіваних змін у конфігурації мережі чи обладнання. Тому забезпечення своєчасного виявлення аномалій є критично важливим аспектом безпеки високонавантажених систем. Автоматизація процесу аналізу та своєчасна ідентифікація потенційних проблем в режимі реального часу дозволяють зменшити ризики та мінімізувати час простою.

Високонавантажені системи відрізняються складною динамікою процесів та великою кількістю компонентів, що потребує застосування інструментів для глибокого аналізу взаємодії між ними. Одним з перспективних підходів є використання моделей виявлення аномальних зв'язків між компонентами системи, що дозволяє здійснювати оцінку стабільності поведінки, враховуючи складні залежності між навантаженням на процесор, пам'ять та мережеві компоненти.

Враховуючи ці вимоги, розробка математичної моделі для виявлення аномалій у високонавантажених веб-сервісах має на меті не лише підвищення точності виявлення, але й забезпечення своєчасної реакції на потенційні загрози в умовах обмежених ресурсів. Це дозволяє уникнути значних фінансових втрат та підвищити рівень довіри користувачів до таких сервісів.

Отже, актуальною є задача розробки математичної моделі виявлення аномалій у високонавантажених складних комп'ютерних системах в умовах обмежених ресурсів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Було проведено аналіз останніх наукових досліджень і публікацій у сфері виявлення аномалій у комп'ютерних системах.

В дослідженні [1] проведено аналіз використання технологій обчислення в пам'яті для прискорення роботи високонавантажених систем глибинного навчання. Особливий акцент зроблено на перспективі покращення енергоефективності і зниження затримок під час обробки великих обсягів даних, що особливо актуально для масштабованих комп'ютерних систем, які обслуговують численні запити одночасно. Автори надають огляд сучасних трендів і прогнозів розвитку технологій. У висновках автори підкреслюють актуальність досліджень високонавантажених складних комп'ютерних систем у різних напрямках, в тому числі у напрямках безпеки та надійності. Однак, у зв'язку з узагальненим характером праці, автори не надають результатів практичних експериментів та не конкретизують досягнуті переваги дослідження.

У статті [2] представлені сучасні тенденції в розробці мережевих систем виявлення вторгнень, що є критично важливими для захисту високонавантажених складних комп'ютерних систем від кіберзагроз. Автори детально описують поточний стан методів виявлення аномалій у мережевих потоках та обговорюють необхідність створення адаптивних і масштабованих рішень для реального часу, що допоможе забезпечити надійну роботу таких систем навіть у пікові навантаження. Проте, залишаються невирішені питання щодо узгодження різних методів виявлення аномалій та адаптації цих методів до нових загроз. Основною причиною цього є відсутність єдиного стандарту для оцінки та порівняння ефективності різних моделей, а також високі вимоги до обчислювальних ресурсів, необхідних для реалізації цих підходів у реальному часі.

Стаття [3] описує основні мережі з'єднань, що використовуються в суперкомп'ютерних системах, такі як NVIDIA InfiniBand, Intel Omni-Path та Cray Slingshot, і представляє їхню еволюцію та тенденції розвитку в умовах зменшення дії закону Мура. Особлива увага приділяється продуктивності мереж а також швидкості реакції на можливі впливи. Автори підкреслюють що ці характеристики є ключовими для підвищення ефективності паралельних обчислень у високопродуктивних комп'ютерах. Це важливо для розуміння майбутніх викликів у розвитку мережевих рішень для високонавантажених систем. Проте, залишається кілька невирішених питань, таких як забезпечення масштабованості цих мереж для подальшого підвищення продуктивності. Пов'язано це з питаннями технічного обмеження, архітектурними особливостями сучасних мережевих рішень і вимогами до

обчислювальних ресурсів.

Аналіз літератури [4–8] показав, що ряд наукових праць присвячено математичному моделюванню процесів у високонавантажених системах з акцентом на можливість захисту даних. Так, наприклад, в статті [4] автори пропонують математичну модель для виявлення аномалій у складних комп'ютерних системах. Автори наголошують на необхідності універсального та науково обґрунтованого підходу до моніторингу поведінки високонавантаженої системи. Дослідження спрямоване на встановлення загального критерію для ідентифікації аномальної активності на основі однорідності вибірок вхідних даних. Покращуючи критерії однорідності вибірки та ізолюючи спостереження, що вказують на аномальну поведінку, пропонується модель спрямована на підвищення надійності та безпеки комп'ютерних систем. Однак модель розрахована тільки на обробку серій з невеликих вибірок. Крім того, модель має високу обчислювальну складність.

В статті [5] пропонуються методи для ймовірнісного аналізу і моделювання динаміки складних систем, що можуть бути застосовані для моделювання високонавантажених складних комп'ютерних систем і аналізу їх надійності та поведінки в умовах аномальних змін. Це відповідає цілям побудови моделей для виявлення аномалій в поведінці систем, особливо з акцентом на моделювання і розуміння динаміки переходів між станами. Автори запропонували математичну модель для обчислення умовних ймовірностей того, що система опиниться в певному стані у конкретний час, за умови, що на початковий момент система була в будь-якому з можливих станів. Але обмеження наданого графового підходу моделювання, що передбачає наявність тільки трьох станів, зменшує практичну цінність запропонованої моделі в умовах ускладнення безпекової ситуації в реальному часі.

В статті [6] проведено математичне моделювання процесу тестування системи на безпеку з використанням перевіреного графового методу моделювання з додаванням елементів теорії невизначеної логіки. Це дало можливість математично формалізувати складний процес і отримати математичні вирази для розрахунку ймовірнісно-часових характеристик. Аналогічний підхід представлено у статті [7]. Але автори моделей не проводили їх верифікацію на високонавантажених складних комп'ютерних системах. Тому можна зробити висновки про доцільність інших підходів математичної формалізації складних технічних систем.

Один з таких підходів описаний в статті [8]. В ній автори рекомендують системи виявлення аномалій математично формалізувати за допомогою основних положень теорії динамічного хаосу. Зокрема, в якості основного показника автори пропонують використовувати показник BDS-статистики (статистика Брока-Дечерта-Шейнкмана). Це сучасний математичний апарат для виявлення аномалій в часових рядах, який може бути використаний при описі показників інформаційних процесів. В цілому математичний апарат теорії динамічного хаосу має перспективи в формалізації саме складних високонавантажених складних комп'ютерних систем. Однак автори цієї статті не провели аналізу складності та швидкості процесу виявлення аномалій.

На основі проведеного аналізу літературних джерел було виявлено кілька критичних невіршених питань, що потребують подальшого дослідження. Перш за все, одним із ключових викликів є підвищення швидкості виявлення аномалій з урахуванням вимог точності для ВНКС. Це особливо актуально в умовах виконання завдань такими системами в реальному часі. Також залишаються нерозв'язаними питання масштабованості методів виявлення аномалій, які повинні ефективно працювати з великою кількістю даних і змінюватися відповідно до динамічних умов середовища. Відсутність єдиного стандарту для оцінки ефективності різних підходів

ускладнює об'єктивне порівняння результатів, що створює бар'єри для впровадження нових методів у промислових застосуваннях. Але можна відмітити що процеси масштабованості нових методів у великій мірі залежать так само і від швидкості виконання завдань.

Постановка завдання. Метою цієї роботи є розробка математичної моделі виявлення аномальних зв'язків між компонентами складної комп'ютерної системи в умовах обмежених ресурсів на основі положень теорії динамічного хаосу. Це дозволить підвищити швидкість виявлення аномалій у поведінці високонавантажених складних комп'ютерних систем що, в свою чергу, повинно підвищити її безпеку.

Виклад основного матеріалу. Розглянуто динаміку поведінки складної комп'ютерної системи, представлену в тривимірному просторі. Оцінимо три основні характеристики – завантаження пам'яті, процесора та мережевого пристрою. Для цієї оцінки застосуємо основні положення теорії динамічного хаосу [9, 10].

Розглянуто такий випадок, у якому інваріантним атрактором системи є граничний цикл. Цей цикл може задаватися деяким τ -періодичним розв'язком $x=\xi(t)$, де $x_0=\xi(0)$ є фіксованою точкою циклу. Розв'язок на інтервалі $[0, \tau)$ задає природну параметризацію точок циклу: $M=\{\xi(t) \mid 0 \leq t \leq \tau\}$. Зроблено припущення, що цикл атрактору M є E -стійким. Тоді навколо цього циклу формується стаціонарно розподілений набір випадкових траєкторій складної системи. В такому разі визначення стохастичної чутливості атрактору M відповідно до теорії динамічного хаосу для складної комп'ютерної системи зводиться до побудови та аналізу τ -періодичного розв'язку $W(t)$ матричного виразу:

$$V = F(t)V + VF^T(t) + P(t)S(t)P(t), \quad (1)$$

з T -періодичними коефіцієнтами:

$$F(t) = \partial f / \partial x(\xi(t)), \quad S(t) = G(t)G^T(t), \\ G(t) = \sigma(\xi(t)), \quad P(t) = P_{\xi(t)}.$$

Матриця $W(t)$, що є функцією стохастичної чутливості циклу M , являється єдиним розв'язком рівняння (1) у просторі Σ симетричних матриць $n \times n$, які визначені і є достатньо гладкими на R^1 з наступними умовами періодичності:

$$\forall t \in R^1 : V(t + \tau) = V(t), \quad (2)$$

та вродженості:

$$\forall t \in R^1 : V(t)r(t) = 0, r(t) = f(\xi(t)). \quad (3)$$

Для ймовірнісної інтерпретації матриці $W(t)$ розглянемо наступну стохастичну систему:

$$dy = F(t)ydt + P(t)G(t)dw(t). \quad (4)$$

Ця система має періодичний режим, який пов'язаний із розв'язком $\bar{y}(t)$. Отже, шуканим розв'язком $W(t)$ системи (1)–(4) і є коваріаційна матриця випадкового періодичного процесу $\bar{y}(t)$, що відповідає стабільному стану складної системи. Вона є результатом асимптотичної поведінки процесу і забезпечує характеристику зв'язків між

компонентами системи у довгостроковій перспективі.

Випадкові траєкторії лінійної складної системи створюють навколо циклу набір, що лежить у деякому інваріантному околі системи в області U . Нехай PL_t – це гіперплощина, яка ортогональна циклу в точці $\zeta(t)$ ($0 \leq t \leq Q$). Тоді позначимо через U_t окіл точки $\zeta(t)$, що знаходиться в PL_t : $U_t = U \cap PL_t$. В такому разі можна зробити припущення, що $U_t \cap U_s = \emptyset$, якщо $t \neq s$.

Ймовірнісний опис набору цих випадкових траєкторій зручно пов'язати з векторною функцією X_t . Значення X_t є точками перетину випадкових траєкторій лінійної складної системи в області U_t . Ймовірнісний розподіл набору траєкторій з часом стабілізується, тому випадкова змінна X_t в околі області U_t має певний стаціонарний розподіл з деякою густиною $\rho_t(x, \varepsilon)$.

Було використано геометричне представлення для дослідження розкиду випадкових траєкторій навколо циклу. На рис. 1 у вигляді зірочок наведено точки перетину випадкових траєкторій складної системи із січною площиною PL_t , ортогональною циклу у точці $\zeta(t)$. Коваріація розподілу цих точок задана матрицею $W(t)$, яка є єдиним розв'язком вище наведеної системи рівнянь (1)–(4).

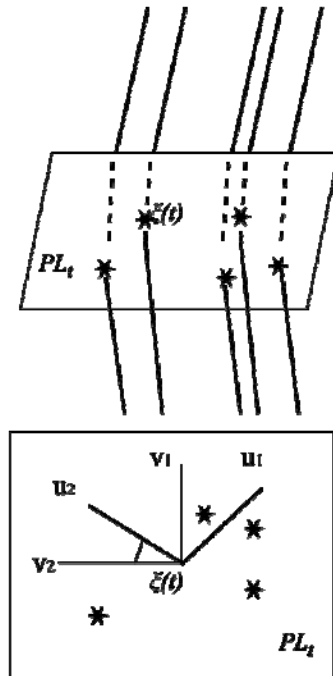


Рисунок 1 – Точки перетину випадкових траєкторій складної системи із гіперплощиною PL_t , ортогональною до циклу в точці $\zeta(t)$

Джерело: розроблено авторами

У розглянутому тривимірному просторі ($n=3$) для побудови рішення $V(t)$ рівняння (1) будемо використовувати наступний сингулярний розклад:

$$V(t) = \lambda_1(t)v_1(t)v_1^T(t) + \lambda_2(t)v_2(t)v_2^T(t) + \lambda_3(t)v_3(t)v_3^T(t),$$

де $\lambda_1(t) \geq \lambda_2(t) \geq \lambda_3(t)$ – власні значення, а $v_1(t)$, $v_2(t)$, $v_3(t)$ – власні вектори матриці $V(t)$. З умови (3) виходить, що для будь-якого t матриця $V(t)$ є виродженою і розподіл точок перетину випадкових траєкторій складної системи (зірки на рис. 1) зосереджений на площині PL_t . А це, в свою чергу, означає, що $\lambda_3(t)=0$ і відповідний власний вектор

$v_3(t)=r(t)/|r(t)|$ є дотичними до циклу. Тому розклад матриці $V(t)$ має наступний вигляд:

$$V(t) = \lambda_1(t)v_1(t)v_1^T(t) + \lambda_2(t)v_2(t)v_2^T(t). \quad (5)$$

Тут $V(t)$ задається векторами $v_1(t)$, $v_2(t)$ та скалярними функціями $\lambda_1(t)$, $\lambda_2(t)$. Функції $\lambda_1(t)$, $\lambda_2(t)$ у випадку невинорджених шумів строго позитивні і визначають при будь-якому t дисперсію випадкових траєкторій циклу вздовж векторів $v_1(t)$, $v_2(t)$. Значення $\lambda_1(t)$, $\lambda_2(t)$ задають розмір, а $v_1(t)$, $v_2(t)$ – напрямки осей еліпса розсіювання точок перетину випадкових траєкторій складної системи з площиною PL_t . Рівняння цього еліпса у площині PL_t має вигляд:

$$(x - \xi(t))^T W^+(t)(x - \xi(t)) = 2k^2,$$

де k – довірна ймовірність $P=1-e^{-k}$.

Позначимо через $u_1(t)$, $u_2(t)$ ортонормований базис площини PL_t . Цей базис може бути знайдений за відомим τ -періодичним розв'язком $\xi(t)$. Власні вектори $v_1(t)$, $v_2(t)$ можна отримати обертанням базису $u_1(t)$, $u_2(t)$ на деякий кут $\phi(t)$:

$$v_1(t) = u_1(t)\cos\phi(t) + u_2(t)\sin\phi(t), \quad (6)$$

$$v_2(t) = -u_1(t)\sin\phi(t) + u_2(t)\cos\phi(t). \quad (7)$$

В результаті рівняння (5)–(7) дозволяють виразити невідоме рішення системи (1)–(3) через три скалярні функції $\lambda_1(t)$, $\lambda_2(t)$, $\phi(t)$.

Позначимо:

$$P_1(t) = v_1(t)v_1^T(t), \quad P_2(t) = v_2(t)v_2^T(t).$$

Відзначено, що $P_i(t)$ ($i=1, 2$) є проекційними матрицями:

$$P_i v_i = v_i, \quad P_i v_j = 0 (i \neq j), \quad P = P_1 + P_2. \quad (8)$$

Представлено розклад (5) у вигляді:

$$V(t) = \lambda_1(t)P_1(t) + \lambda_2(t)P_2(t).$$

Зроблено наступне припущення. Для ортонормованих векторних функцій $v_i(t)$ і проекційних матриць $P_i(t)=v_i(t)v_i^T(t)$ ($i=1,2$) справедливі наступні тотожності:

$$v_1^T(t)\widehat{P}_1(t)v_1(t) \equiv 0, \quad (9)$$

$$v_1^T(t)\widehat{P}_2(t)v_1(t) \equiv 0, \quad (10)$$

$$v_2^T(t)\widehat{P}_1(t)v_2(t) \equiv 0, \quad (11)$$

$$v_2^T(t)\widehat{P}_2(t)v_2(t) \equiv 0, \quad (12)$$

$$v_1^T(t)\widehat{P}_1(t)v_2(t) = \mathcal{G}(t) + \mathcal{K}_1^T(t)u_2(t). \quad (13)$$

$$v_1^T(t)\widehat{P}_2(t)v_2(t) = \mathcal{G}(t) + \mathcal{K}_1^T(t)u_2(t). \quad (14)$$

Довести вказане припущення можна таким чином – тотожність (9)

безпосередньо впливає з наступного співвідношення:

$$v_1^T \widehat{P}_1 v_2 = v_1^T [v_1 \mathfrak{E}_1^T] v_1 = v_1^T [v_1 \mathfrak{E}_1^T + \widehat{v}_1 v_1^T] v_1 = v_1 \mathfrak{E}_1^T + \widehat{v}_1 v_1^T = [v_1 v_1^T] \equiv 0. \quad (15)$$

Тотожність (12) доводиться аналогічно. Тотожність (10) отримується з:

$$v_1^T \widehat{P}_2 v_2 = v_1^T [v_2 \mathfrak{E}_2^T + \widehat{v}_2 v_2^T] v_1 = v_2 v_1^T v_1 \mathfrak{E}_2^T + \mathfrak{E}_2 v_1^T v_1 v_2^T \equiv 0. \quad (16)$$

Тотожність (11) доводиться аналогічно.

Використаємо наступні рівності:

$$\begin{aligned} \mathfrak{E}_1 &= \mathfrak{E}_1 \cos \varphi + \mathfrak{E}_2 \sin \varphi + v_2 \mathfrak{E}, \\ \mathfrak{E}_1^T u_1 &\equiv 0, \mathfrak{E}_2^T u_2 \equiv 0, -(\mathfrak{E}_1^T u_2) = u_1^T u_2. \end{aligned}$$

Після цього можна сформулювати такий вираз:

$$\begin{aligned} v_1^T \widehat{P}_1 v_2 &= v_1^T [v_1 \mathfrak{E}_1^T + \widehat{v}_1 v_1^T] v_2 = v_2 \mathfrak{E}_1^T = (\mathfrak{E}_1^T \cos \varphi + \mathfrak{E}_2^T \sin \varphi + v_2^T \mathfrak{E}) v_2 = (\mathfrak{E}_1^T \cos \varphi + \mathfrak{E}_2^T \sin \varphi) v_2 + \mathfrak{E} = \\ &= -(\mathfrak{E}_1^T u_1 \cos \varphi \sin \varphi + \mathfrak{E}_1^T u_2 \cos^2 \varphi - \mathfrak{E}_2^T u_1 \sin^2 \varphi + \mathfrak{E}_2^T u_2 \cos \varphi \sin \varphi + \mathfrak{E} = \mathfrak{E}_1^T u_2 + \mathfrak{E}). \end{aligned}$$

З цих співвідношень слідує (13). Тотожність (14) доводиться аналогічно.

Доведене припущення надає набір тотожностей для ортонормованих векторних функцій і проєкційних матриць. Ці тотожності дозволяють суттєво спростити обчислення, пов'язані з аналізом чутливості циклів і взаємодій між проєкціями векторів у складній комп'ютерній системі. Оскільки матриці $P_i(t)$ є проєкційними та ортогональними, їх використання допомагає розділяти аналіз векторів у різних напрямках, що робить можливим більш ефективно моделювання та прогнозування станів складної комп'ютерної системи.

Використання проєкційних матриць і ортогональних векторів для вивчення поведінки компонентів складної комп'ютерної системи є відмінним підходом від існуючих моделей аналізу аномалій, таких як кореляційний аналіз або аналіз на основі кластеризації. Модель (9)–(16) надає можливість оцінювати зміни в ортогональності векторів, що дозволяє виявляти складні взаємодії між компонентами.

Ортогональні проєкції є основою для виявлення аномальних відхилень, які можуть вказувати на нові або несподівані зв'язки між процесами. Наприклад, втрачена ортогональність вказує на порушення незалежності компонентів, що може бути ознакою вторгнення або несправності.

Також модель дозволяє оцінювати, як різні компоненти системи взаємодіють один з одним. Наприклад, нормальний стан системи передбачає, що певні компоненти (такі як використання CPU та мережева активність) слабо корелюють. Використовуючи модель, можна визначити наявність небажаних взаємодій між компонентами системи через аналіз проєкційних матриць та їх поведінки з часом. Поява кореляцій між векторами, які мають бути ортогональними, може сигналізувати про спробу несанкціонованого доступу або впровадження нового шкідливого процесу, що впливає на кілька частин системи одночасно.

На рис. 2 представлені результати роботи моделі для виявлення аномалій у складній комп'ютерній системі. Графік відображає розподіл нормального стану складної комп'ютерної системи (позначено синіми точками) та аномалій (позначено червоними точками) у 3D просторі.

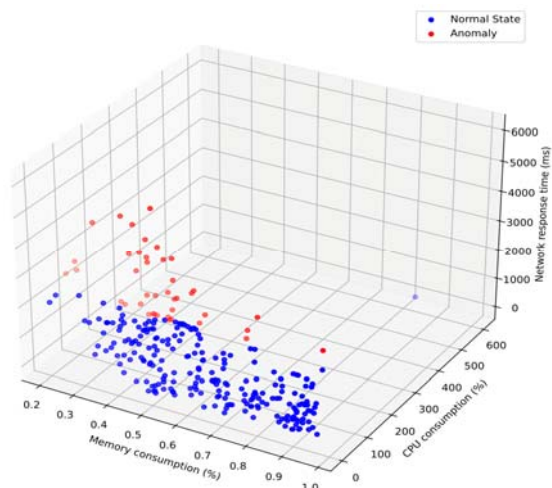


Рисунок 2 – Аттрактор поведінки складної комп’ютерної системи, отриманий на основі моделі ВАЗККС

Джерело: розроблено авторами

В табл. 1. наведені значення досліджених показників точності виявлення аномалій у складній комп’ютерній системі

Таблиця 1 – Показники точності виявлення аномалій у складній комп’ютерній системі з використанням запропонованої моделі, отримані в результаті моделювання

| № | Метрика | Значення | Час виконання |
|---|-------------------------------------|----------|---------------|
| 1 | Правильність (Accuracy) | 0,84 | 0,0023 мс |
| 2 | Точність (Precision) | 0,87 | |
| 3 | Повнота (Recall) | 0,74 | |
| 4 | Зважена середня точність (F1-Score) | 0,78 | |

Джерело: розроблено авторами

З рис. 2 та табл. 1 видно, що запропонований метод виділяє деякі аномальні точки, але вони значною мірою переплітаються з нормальними, що свідчить про наявність деяких помилок при визначенні аномалії. Це може бути наслідком невідповідності даних, отриманих з датасету CSE-CIC-IDS 2018 [11, 12]. Але слід зазначити, що використання розробленої моделі разом з моделями машинного навчання має перспективу в покращенні показників точності.

Для перевірки можливості покращення розробленої моделі за допомогою відомих методів машинного навчання слід зауважити, що основною моделлю оцінки даних на аномальність залишається розроблена модель виявлення аномальних зв’язків між компонентами складної комп’ютерної системи.

На рис. 3. представлені 3D-графіки результатів експериментів з використанням розробленої моделі у поєднанні з іншими моделями машинного навчання, а саме з Isolation Forest, Autoencoder та One-Class SVM [13–16].

На графіку, що ілюструє результати поєднання розробленої моделі з моделлю Isolation Forest (рис. 3а), можна помітити, що запропонована модель виявляє аномалії у складній комп’ютерній системі, розподілені по всіх осях, з меншою концентрацією в порівнянні з нормальними точками. Однак точність цієї комбінованої моделі не дуже висока (~0.88). Тобто деякі аномалії ця комбінована модель не виявляє, а частина нормальних даних може бути помилково класифікована як аномалії.

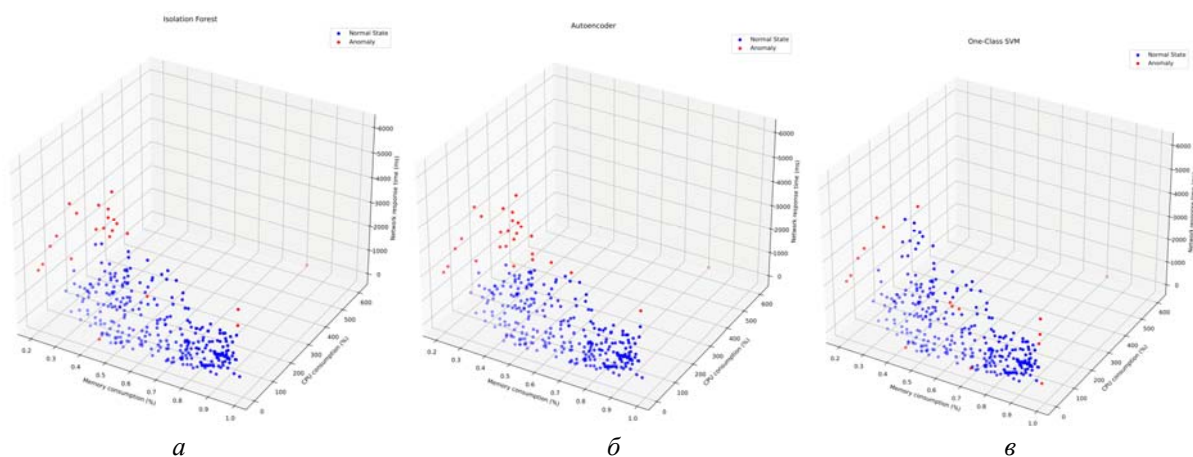


Рисунок 3 – 3D-графіки результатів експериментів з використанням розробленої моделі у поєднанні з іншими моделями машинного навчання (а – Isolation Forest, б – Autoencoder, в – One-Class SVM)

Джерело: розроблено авторами

Графік, що ілюструє результати поєднання розробленої моделі з моделлю Autoencoder (рис. 3б), показує, що аномалії розподілені досить рівномірно, але ця комбінована модель пропускає багато аномальних точок. Метрики ефективності також не показали високих значень. Це може свідчити про те, що Autoencoder не повністю навчився особливостям системи і, можливо, потребує подальшого налаштування гіперпараметрів або більшого обсягу навчальних даних, що в умовах реального часу є складним завданням.

Графік, який ілюструє результати поєднання розробленої моделі з моделлю One-Class SVM (рис. 3в) показує, що ця комбінована модель краще справляється в деяких аспектах, проте, з рисунку видно, що є області, в яких модель або пропускає аномалії, або помилково класифікує нормальні дані як аномальні.

У табл. 2 представлені значення показників точності запропонованих комбінованих моделей визначення аномалій у складних комп'ютерних системах.

Таблиця 2 – Показники точності виявлення аномалій у складній комп'ютерній системі з використанням запропонованих комбінованих моделей, отримані в результаті моделювання

| № | Метрика | Значення | Час виконання |
|--|-------------------------------------|----------|---------------|
| Розроблена модель у комбінації з моделлю Isolation Forest | | | |
| 1 | Правильність (Accuracy) | 0,95 | 787,36 мс |
| 2 | Точність (Precision) | 0,89 | |
| 3 | Повнота (Recall) | 0,65 | |
| 4 | Зважена середня точність (F1-Score) | 0,78 | |
| Розроблена модель у комбінації з моделлю Autoencoder | | | |
| 1 | Правильність (Accuracy) | 0,93 | 33020,25 мс |
| 2 | Точність (Precision) | 0,87 | |
| 3 | Повнота (Recall) | 0,73 | |
| 4 | Зважена середня точність (F1-Score) | 0,78 | |

Продовження таблиці 2

| <i>Розроблена модель у комбінації з моделлю One-Class SVM</i> | | | |
|---|-------------------------------------|------|---------|
| 1 | Правильність (Accuracy) | 0,99 | 5,11 мс |
| 2 | Точність (Precision) | 0,99 | |
| 3 | Повнота (Recall) | 0,76 | |
| 4 | Зважена середня точність (F1-Score) | 0,88 | |

Джерело: розроблено авторами

Як видно з результатів, наведених у табл. 1-2, найкращі часові характеристики показав розроблена комбінована модель з використанням One-Class SVM. Це говорить про можливість його використання й в складних комп'ютерних системах реального часу. При цьому розроблений модель має певні переваги в часі виконання, а точність виявлення аномалій співставна з моделями машинного навчання.

Таким чином, була запропонована модель виявлення аномальних зв'язків між компонентами складної комп'ютерної системи, яка є вдосконаленим інструментом для математичного аналізу поведінки комп'ютерних систем з метою захисту їх від дестабілізуючих факторів. Розроблена модель використовує ортогональні векторні функції та проєкційні матриці для аналізу аномалій. Це дозволяє створювати просторові розклади, які дають можливість виявляти складні взаємозв'язки між компонентами складної комп'ютерної системи, використовуючи тільки значення і вектори. Такий підхід поєднує математичний формалізм з реальними технічними даними, що робить його ефективним для глибокого аналізу аномалій у складній комп'ютерній системі. Крім того, дана модель дозволяє описати поведінку складної системи як геометричний еліпс у просторі, де параметри еліпсу відповідають рівням завантаженості процесора, пам'яті та інших ресурсів, а це забезпечує можливість детального аналізу взаємозв'язків між компонентами складної комп'ютерної системи.

Висновки. В результаті дослідження розроблено математичну модель виявлення аномальних зв'язків між компонентами складної комп'ютерної системи, яка на відміну від інших використовує геометричний підхід, де аномалії виявляються через зміну взаємної ортогональності між компонентами. Це дозволило зменшити час виявлення аномалій стану комп'ютерної системи до 10%. При цьому точність виявлення аномалій залишилась на заданому рівні.

Проведено дослідження використання розробленої моделі у комплексі з моделями Isolation Forest, Autoencoder, One-Class SVM. Результати досліджень показали суттєві (до 10 разів) збільшення швидкості виявлення аномалій поведінки комп'ютерної системи, при незначному зниженні точності цієї операції. Це дає можливість зробити висновки про доцільність використання розробленої моделі для виявлення аномалій поведінки високонавантажених складних комп'ютерних систем в режимі реального часу.

Список літератури

1. S. Yu, H. Jiang, S. Huang, X. Peng & A. Lu, "Compute-in-Memory Chips for Deep Learning: Recent Trends and Prospects," in IEEE Circuits and Systems Magazine, vol. 21, no. 3, pp. 31-56, thirdquarter 2021, doi: 10.1109/MCAS.2021.3092533. <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=26004&tip=sid&clean=0>
2. S. Kumar, S. Gupta and S. Arora, "Research Trends in Network-Based Intrusion Detection Systems: A Review," in IEEE Access, vol. 9, pp. 157761-157779, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3129775. <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21100374601&tip=sid&clean=0>
3. Lu, P.-J.; Lai, M.-C.; Chang, J.-S. A Survey of High-Performance Interconnection Networks in High-Performance Computer Systems. Electronics 2022, 11, 1369. <https://doi.org/10.3390/electronics11091369>

4. Semenov, S., Mozhaiev, O., Kuchuk, N., Mozhaiev, M., Tiulieniev, S., Gnusov, Y., Yevstrat, D., Chyrva, Y., Kuchuk, H. (2022). Devising a procedure for defining the general criteria of abnormal behavior of a computer system based on the improved criterion of uniformity of input data samples. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (4 (120)), 40–49. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.269128>
5. Meleshko, Y., Raskin, L., Semenov, S., & Sira, O. (2019). Methodology of probabilistic analysis of state dynamics of multi-dimensional semi-Markov dynamic systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(4 (102)), 6–13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.184637>
6. Semenov, S., Zhang, L., Cao, W., Bulba, S., Babenko, V., & Davydov, V. (2021). Development of a fuzzy GERT-model for investigating common software vulnerabilities. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(2 (114)), 6–18. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.243715>
7. Meleshko, Y.V., Yakymenko, M., & Semenov, S. (2021). A Method of Detecting Bot Networks Based on Graph Clustering in the Recommendation System of Social Network. *International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems*.
8. Semenov, S., Gavrylenko, S. and Chelak, V. (2016), “Developing parametrical criterion for registering abnormal behavior in computer and telecommunication systems on basis of economic test”, *Actual problems of economics*, Kyiv, Vol. 4(178), pp. 451-459.
9. Devaney, Robert. (2021). *An Introduction to Chaotic Dynamical Systems*. 10.1201/9780429280801.
10. Göcs, László & Johanyák, Zsolt. (2023). Identifying Relevant Features of CSE-CIC-IDS2018 Dataset for the Development of an Intrusion Detection System. 10.48550/arXiv.2307.11544.
11. Göcs, László & Johanyák, Zsolt. (2023). Identifying Relevant Features of CSE-CIC-IDS2018 Dataset for the Development of an Intrusion Detection System. 10.48550/arXiv.2307.11544.
12. IDS 2018 | Datasets | Research | Canadian Institute for Cybersecurity | UNB.” [Online]. Available: <https://www.unb.ca/cic/datasets/ids-2018.html>. [Accessed: 05-Nov-2024].
13. Mohammed, Mahmood & Telek, Miklos. (2023). Anomaly Detection using combination of Autoencoder and Isolation Forest. 25 - 30. 10.3311/WINS2023-005.
14. Ribeiro, D.; Matos, L.M.; Moreira, G.; Pilastrri, A.; Cortez, P. Isolation Forests and Deep Autoencoders for Industrial Screw Tightening Anomaly Detection. *Computers* 2022, 11, 54. <https://doi.org/10.3390/computers11040054>
15. Gavrylenko, S. Y., & Sheverdin, I. V. (2021). DEVELOPMENT OF METHOD TO IDENTIFY THE COMPUTER SYSTEM STATE BASED ON THE «ISOLATION FOREST» ALGORITHM. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, (1), 105–116. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2021-1-11>
16. Gavrylenko S., Semenov S., Sira O., Kuchuk N. Identification of the state of an object under conditions of fuzzy input data. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2019, Vol. 1, No. 4 (97), pp. 22–29. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.157085

References

1. S. Yu, H. Jiang, S. Huang, X. Peng and A. Lu, "Compute-in-Memory Chips for Deep Learning: Recent Trends and Prospects," in *IEEE Circuits and Systems Magazine*, vol. 21, no. 3, pp. 31-56, thirdquarter 2021, doi: 10.1109/MCAS.2021.3092533. <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=26004&tip=sid&clean=0>
2. S. Kumar, S. Gupta and S. Arora, "Research Trends in Network-Based Intrusion Detection Systems: A Review," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 157761-157779, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3129775. <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21100374601&tip=sid&clean=0>
3. Lu, P.-J.; Lai, M.-C.; Chang, J.-S. A Survey of High-Performance Interconnection Networks in High-Performance Computer Systems. *Electronics* 2022, 11, 1369. <https://doi.org/10.3390/electronics11091369>
4. Semenov, S., Mozhaiev, O., Kuchuk, N., Mozhaiev, M., Tiulieniev, S., Gnusov, Y., Yevstrat, D., Chyrva, Y., & Kuchuk, H. (2022). Devising a procedure for defining the general criteria of abnormal behavior of a computer system based on the improved criterion of uniformity of input data samples. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (4 (120)), 40–49. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.269128>
5. Meleshko, Y., Raskin, L., Semenov, S., & Sira, O. (2019). Methodology of probabilistic analysis of state dynamics of multi-dimensional semi-Markov dynamic systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(4 (102)), 6–13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.184637>
6. Semenov, S., Zhang, L., Cao, W., Bulba, S., Babenko, V., & Davydov, V. (2021). Development of a fuzzy GERT-model for investigating common software vulnerabilities. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(2 (114)), 6–18. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.243715>
7. Meleshko, Y.V., Yakymenko, M., & Semenov, S. (2021). A Method of Detecting Bot Networks Based on Graph Clustering in the Recommendation System of Social Network. *International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems*.

8. Semenov, S., Gavrylenko, S. & Chelak, V. (2016), "Developing parametrical criterion for registering abnormal behavior in computer and telecommunication systems on basis of economic test", Actual problems of economics, Kyiv, Vol. 4(178), pp. 451-459.
9. Devaney, Robert. (2021). An Introduction to Chaotic Dynamical Systems. 10.1201/9780429280801.
10. Göcs, László & Johanyák, Zsolt. (2023). Identifying Relevant Features of CSE-CIC-IDS2018 Dataset for the Development of an Intrusion Detection System. 10.48550/arXiv.2307.11544.
11. Göcs, László & Johanyák, Zsolt. (2023). Identifying Relevant Features of CSE-CIC-IDS2018 Dataset for the Development of an Intrusion Detection System. 10.48550/arXiv.2307.11544.
12. IDS 2018 | Datasets | Research | Canadian Institute for Cybersecurity | UNB." [Online]. Available: <https://www.unb.ca/cic/datasets/ids-2018.html>. [Accessed: 05-Nov-2024].
13. Mohammed, Mahmood & Telek, Miklos. (2023). Anomaly Detection using combination of Autoencoder and Isolation Forest. 25 - 30. 10.3311/WINS2023-005.
14. Ribeiro, D.; Matos, L.M.; Moreira, G.; Pilastrri, A.; Cortez, P. Isolation Forests and Deep Autoencoders for Industrial Screw Tightening Anomaly Detection. Computers 2022, 11, 54. <https://doi.org/10.3390/computers11040054>
15. Gavrylenko, S. Y., & Sheverdin, I. V. (2021). DEVELOPMENT OF METHOD TO IDENTIFY THE COMPUTER SYSTEM STATE BASED ON THE «ISOLATION FOREST» ALGORITHM. Radio Electronics, Computer Science, Control, (1), 105–116. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2021-1-11>
16. Gavrylenko S., Semenov S., Sira O., Kuchuk N. Identification of the state of an object under conditions of fuzzy input data. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2019, Vol. 1, No. 4 (97), pp. 22–29. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.157085

Yelyzaveta Meleshko, Prof., DSc., **Mykola Yakymenko**, Assoc. Prof., PhD phys.&math. sci.,
Volodymyr Mikhav, PhD, **Yaroslav Shulika**, post-graduate
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

A Mathematical Model of Detecting Anomalous Connections Between Components of a Complex Computer System

The object of the research is the process of detecting anomalies in high-load complex computer systems (HLCSS). The practical application area includes HLCSS such as banking transaction servers and cloud platforms, where stable operation must be ensured under heavy request loads. The problem addressed in the research is the lack of real-time anomaly detection models in HLCSS with a specified accuracy under resource constraints. Anomalies may signal system malfunctions, process mismatches, or potential cyberattacks. High-load systems are particularly sensitive to even minor disruptions, as they can cause significant delays or complete service unavailability for many users simultaneously, leading to financial losses and loss of customer trust.

Modern web services face issues such as attempts of DDoS attacks, significant fluctuations in user requests, database connection problems, memory leaks, and the impact of unexpected changes in network or hardware configuration. Therefore, ensuring timely anomaly detection is a critical aspect of high-load system security. Automating the analysis process and promptly identifying potential problems in real time help reduce risks and minimize downtime. Developing a mathematical model for anomaly detection in high-load web services aims not only to improve detection accuracy but also to ensure a timely response to potential threats under resource constraints. This helps avoid significant financial losses and enhances user trust in such services.

The paper creates and investigates a mathematical model for detecting anomalous connections between components of a complex computer system (HLCSS). The testing results of the model showed the following performance metrics: accuracy – 84%, precision – 87%, recall – 74%, F1-Score – 78%. The positive results of the study are explained by the following prerequisites: the HLCSS model uses projection matrices and orthogonal vector functions for anomaly analysis. This allows for the creation of spatial decompositions that reveal complex interconnections between components of a complex computer system using only eigenvalues and vectors. Thus, the model can be applied for operational data analysis and anomaly detection in resource-constrained environments.

high-load complex computer systems, anomaly detection, mathematical models, dynamic chaos, complex networks

Одержано (Received) 18.11.2024

Прорецензовано (Reviewed) 17.12.2024

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2024

КІБЕРБЕЗПЕКА ТА ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ

УДК 004.738.5:329.09.5 DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.23-31](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.23-31)

О.П. Доренський, доц., канд. техн. наук, **О.С. Улічев**, канд. техн. наук,
К. О. Задорожний, студ., **А.С. Коваленко**, асист., **Г.М. Дреєва**, докторка філософії
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: dorenskyiop@kntu.kr.ua, askin79@gmail.com, kostazadoroznij9@gmail.com

Концептуальна модель системи інформаційного протидіяння координаційного центру з питань національної безпеки і оборони

Стаття присвячена актуальній проблемі підвищення ефективності інформаційного протидіяння, що провадиться координаційним органом з питань національної безпеки і оборони – центром протидіяння дезінформації. Мета дослідження досягається шляхом синтезу концептуальної моделі системи інформаційного протидіяння, її застосування для виявлення слабких сторін та, як наслідок, удосконалення механізму протидіяння дезінформації задля підвищення його ефективності: забезпечення результативності протидіяння деструктивним інформаційним впливам і кампаніям, пропаганді, реальним та потенційним загрозам в інформаційній сфері, запобігання спробам маніпулювання громадською думкою. Означений механізм протидіяння передбачає реагування на дезінформаційні атаки шляхом створення і розміщення відповідного контенту в соціальних мережах. Водночас, результати цього дослідження показали недостатність охоплення цільової аудиторії WhatsApp, що формує недолік системи інформаційного протидіяння, який закономірно чинить негативний вплив на ефективність її функціонування. Крім того, аналіз результатів цього дослідження показала важливість удосконалення процесу детектування інформаційних загроз за допомогою ІТ, технологій і інструментів штучного інтелекту, що дозволить скоротити час виявлення загроз в інформаційній сфері. Тож, для вирішення існуючої проблеми пропонується розширити охоплення цільової аудиторії WhatsApp для підвищення ефективності протидіяння дезінформації координаційним органом, який бере участь в забезпеченні інформаційної безпеки держави, виявленні й протидіяння дезінформації, пропаганді, деструктивним інфопливам, проводить заходи для протидіяння загрозам в інформаційній сфері. Практична цінність отриманих результатів полягає в зменшенні вразливості органів виконавчої влади та суспільства до інформаційних загроз шляхом підвищення ефективності протидіяння дезінформації. Водночас, це забезпечить зростання результативності інформаційного реагування на дезінформацію, пропаганду і маніпуляції, скоротить час між появою фейкової інформації та її виявленням, забезпечить ефективне оцінювання ризиків для національної безпеки в інформаційному просторі.

інформаційна безпека, дезінформація, інформаційне протидіяння, концептуальна модель, соціальні мережі, WhatsApp

Постановка проблеми. Дезінформація є реальною загрозою безпеки громадянина, суспільства і держави, що закономірно робить протидіяння їй пріоритетним завданням системи забезпечення національної безпеки України. Зростання кількості та масштабів дезінформаційних кампаній, спрямованих на українське суспільство, вкрай гостро актуалізує потребу в максимально ефективній системі інформаційного протидіяння. Проблемою, яка виникає у протидіяння дезінформації та інформаційної безпеки, є відсутність комплексного підходу, концентрації на простих інструментах виявлення фейків та ігнорування системних рішень, що впливатимуть на весь спектр соціальної взаємодії в суспільстві. Система протидіяння дезінформації може охоплювати значний спектр ситуацій: не тільки дописи ботів у соціальних мережах або оплачені ворогами держави медіасюжети. Якщо поставитися до дезінформації ширше, як до

сукупності негативних впливів на інститути або індивідів, то інструменти протидії постануть в іншому світлі, як значно масштабніші від простих спростувань чи лекцій з медіаграмотності [1]. Отже, гостро стоїть задача забезпечення ефективності діяльності інституцій, які відповідають за протидію дезінформації, – координаційного органу з питань національної безпеки і оборони, до функцій якого належить участь в забезпеченні інформаційної безпеки держави, виявлення й протидія дезінформації, пропаганді, деструктивним інформаційним впливам, проведення заходів для протидії реальним і потенційним загрозам в інформаційній сфері, запобігання спробам маніпулювання громадською думкою [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій [3-7,12-16] показав широке коло прогалин та недоліків в ефективності системи інформаційного протиборства координаційного центру з питань національної безпеки і оборони, ґрунтовні дослідження проведені Інститутом інформаційної безпеки. В праці [4] аргументовано неефективність моніторингу ЦПД і запропонована матриця загроз, яка має сконцентрувати діяльність винятково на актуальних цілях: «в ній весь масив зібраних повідомлень поділяється на теми за «контентними» ознаками; тем не може бути більше шести-семи, оскільки для обслуговування кожної з них потрібна, щонайменше, окрема людина; до таких тем може бути віднесено війну та окупацію, історію; культуру (мову), дії та реформи держави, міжнародні відносини України; кожна тема складається із загальних дворівневих наративів» [4]; також є меседжі – неправдиві повідомлення. Деякі дослідження також вказують на проблему раннього виявлення фейків та повільного реагування на дезінформацію, пропонують автоматичну детекцію, за допомогою якої можна досягнути головної цілі – скорочення часу між розповсюдженням фейку і урядовим реагуванням на нього. Водночас, у дослідженнях не розглядається питання забезпечення стійкої ефективності системи інформаційного протиборства координаційного центру з питань національної безпеки і оборони в частині покриття цільової аудиторії у соціальних мережах задля реалізації результативної протидії дезінформації, пропаганді, деструктивним інформаційним впливам, маніпулюванню суспільною думкою. Разом з тим, у працях [14-15] запропоновані підходи підвищення ефективності протидії пропаганді сепаратизму і антиукраїнської ідеології в соціальних мережах.

Постановка мети й задач дослідження. У контексті забезпечення інформаційно-психологічної безпеки Центр протидії дезінформації при Раді національної безпеки і оборони (ЦПД) в Україні є ключовою державною інституцією. Проте існують суперечності та невизначеності щодо ефективності і дієвості його функціонування щодо забезпечення результативної протидії дезінформації у соціальних мережах.

Метою цієї праці є підвищення ефективності заходів протидії дезінформації шляхом синтезу і застосування концептуальної моделі системи інформаційного протиборства координаційного органу з питань національної безпеки і оборони держави (ЦПД).

Основні завдання дослідження: 1) аналіз діяльності ЦПД на основі публічно доступних даних та офіційних звітів, вивчення ефективності інструментів та стратегій, які використовує Центр протидії дезінформації, зокрема у сфері моніторингу й аналізу інформаційного простору; 2) оцінювання впливу роботи ЦПД на процеси протидії дезінформації в Україні та її ефективність у контексті сучасних викликів і загроз; 3) побудова концептуальної моделі системи інформаційного протиборства координаційного органу з питань національної безпеки і оборони (ЦПД); 4) застосування розробленої моделі для виявлення сильних та слабких сторін системи

протидії дезінформації, а також розроблення практичних пропозицій задля підвищення ефективності заходів протидії дезінформації.

Виклад основного матеріалу. Центр протидії дезінформації при РНБО виконує завдання проведення заходів з протидії поточним і передбачуваним загрозам національній безпеці та інтересам України в інформаційній сфері [2]. Цей координаційний орган з питань національної безпеки і оборони бере безпосередню участь в протидії російській агресії, тому його пріоритетною діяльністю є «оперативне інформування населення, розкриття дезінформації та маніпуляцій, забезпечення інформаційної безпеки, боротьба з інформаційним тероризмом» [2], а відповідно до завдань, визначених Указом Президента України від 7 травня 2021 року № 187/2021, ЦПД реалізовує такі основні функції:

- моніторинг та аналіз: оцінювання інформаційного простору України та загроз інформаційній безпеці;
- виявлення загроз: дослідження чинників, що формують загрози, прогнозування їх наслідків для національних інтересів;
- інформаційна підтримка: надання аналітичних матеріалів для протидії дезінформації і маніпуляціям громадською думкою;
- розроблення концептуальних пропозицій, створення підходів до протидії дезінформації та координації дій органів виконавчої влади;
- розширення спроможності сектору безпеки та оборони, проведення системних заходів для зміцнення можливостей протидії;
- правове забезпечення: удосконалення законодавства і наукових підходів в сфері інформаційної безпеки;
- стратегічні комунікації: розвиток системи стратегічних комунікацій та координація відповідних заходів;
- оцінювання загроз: створення інтегрованої системи для оцінки інформаційних загроз та оперативного реагування.

Синтез концептуальної моделі. Загалом ЦПД забезпечує реагування й протидію дезінформації. Перше – шляхом моніторингу (детектування) загроз інформаційній безпеці, друге – верифікацією результатів детектування кампаній з боку іноземних держав, пропаганди, дезінформації і деструктивних інформаційних впливів на українське суспільство (їх джерелами є, серед інших, інтернетні ресурси, радіомовлення, телебачення), прийняття управлінських рішень, створення контенту для інформаційного протидіювання. В межах своїх функцій ЦПД забезпечує взаємодію з громадськістю: просування створеного контенту у медіа, в інтернеті, поширення громадськими ініціативами й об'єднаннями. Із вебресурсів для розміщення дезінформаційного контенту застосовуються офіційні вебсайти Центру та РНБО, вебпортал АрміяInform [3], а також соціальні мережі: Facebook, TikTok, Instagram, Viber, X (Twitter), Telegram, YouTube, WhatsApp. У сукупності перелічені активності мають забезпечувати зниження вразливості органів виконавчої влади, загроз національним інтересам держави, довіра суспільства до української влади. Означене стало підґрунтям для побудови концептуальної моделі системи інформаційного протидіювання координаційного центру з питань національної безпеки і оборони – ЦПД, – яка представлена на рисунку 1.

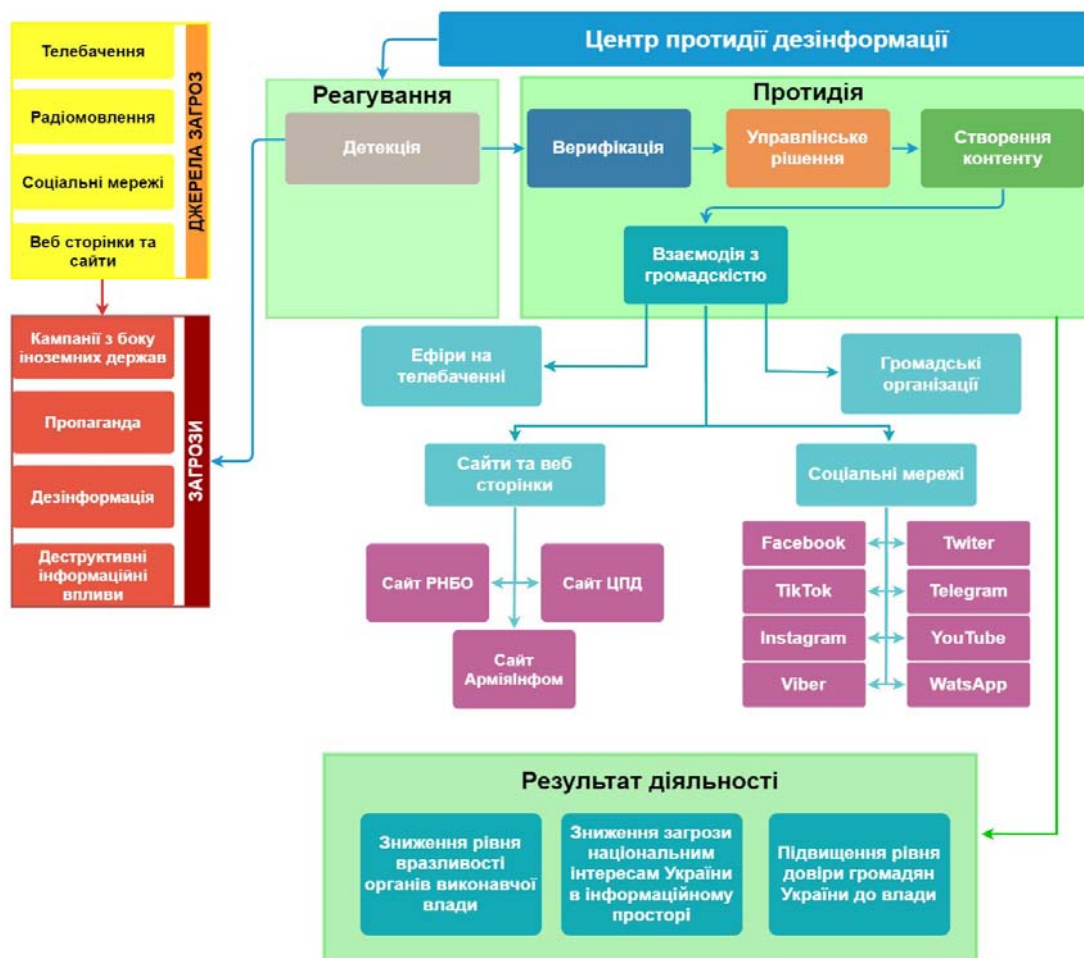


Рисунок 1 – Концептуальна модель системи інформаційного протидії дезінформації координаційного центру з питань національної безпеки і оборони

Джерело: розроблено авторами

Оцінювання ефективності системи протидії дезінформації. Відповідно до українського бюджетного законодавства, показниками роботи Центру загалом є двадцять звітів про результати виявлених інформаційних загрози у сфері національної безпеки та оборони України, проведення десяти заходів з інформаційної безпеки, спрямованих на підвищення захищеності суб'єктів сектору безпеки та оборони, подання п'ятидесяти (щотижневих) матеріалів до РНБОУ України за результатами моніторингу подій та явищ дезінформації, пропаганди та маніпулювання громадською думкою в інформаційному просторі України, а також одна науково-дослідницька робота з питань боротьби з дезінформацією.

Одним з основних факторів успішності кризових комунікацій у контексті спростування дезінформації є оперативність реагування на появу таких матеріалів. Ефективним вважається термін до 90 хвилин між поширенням неправдивої інформації та виходом офіційної реакції з боку уповноваженого представника держави [4]. Ще одним критерієм оцінки загрози в інформаційній сфері є «повторюваність повідомлення»: інтенсивність появи схожих повідомлень у різних медіа, соціальних мережах та месенджерах. При активному повторенні інформації фактор правдивості втрачає свою значимість і важливо надати швидку й комплексну відповідь на негативну інформацію або одночасно просунути позитивні меседжі. На цьому етапі ключовим

стає здатність доцільного спрямування своєї позиції до всіх цільових аудиторій, використовуючи повний спектр комунікаційних інструментів.

Із завдань та індикаторів роботи Центру випливає, що основною метою роботи є моніторинг інформаційного поля та подальше виявлення повідомлень, що містять дезінформацію. Наразі ЦПД функціонує як аналітична установа, здійснює моніторинг інформаційного простору з метою виявлення запланованих дезінформаційних атак, неправдивих новин та заяв, а також відстежує зовнішні деструктивні наративи, які поширює російська пропаганда. Центр реагує на дезінформаційні атаки шляхом розміщення спростувань та проведення інформаційно-аналітичних розвідок. Для поширення результатів своєї роботи зі створення контенту для протидії дезінформації Центр, серед інших інтернетних ресурсів, сторінки у соціальних мережах, які мають таку аудиторію: Instagram - 31,5 тис., X (Twitter) - 4953, Viber - 445 тис., Facebook - 38 тис., YouTube - 15,3 тис., Telegram - 63 тис., TikTok - 44,8 тис., WhatsApp – 107. Гістограма зазначеної кількості підписників представлена на рисунку 2.

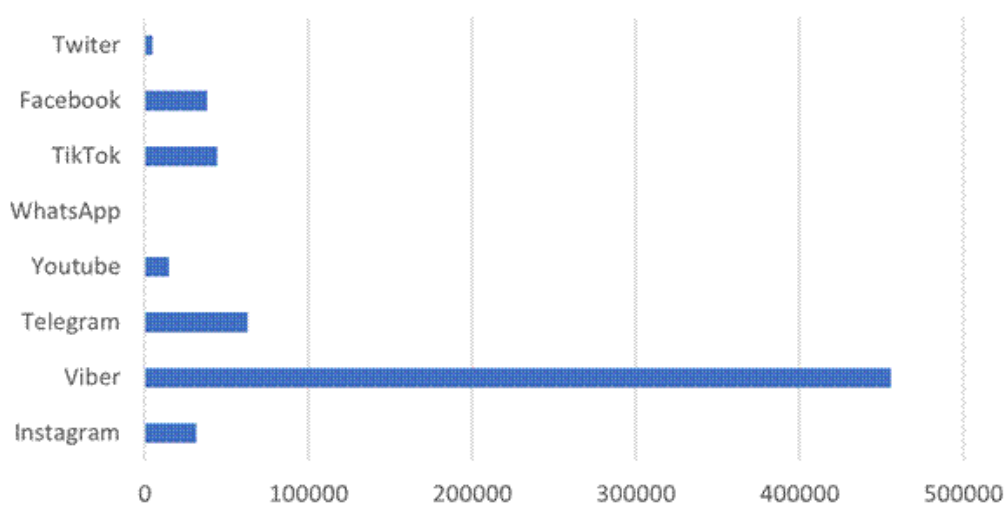


Рисунок 2 – Гістограма аудиторії ЦПД в соціальних мережах – цифрових засобах інформаційного протидія координативного органу з питань національної безпеки і оборони

Джерело: розроблено авторами

Охоплення цільової аудиторії є вкрай важливим критерієм у протидії дезінформації. Найменше покриття, як бачимо, забезпечено у пропріетарному месенджері для смартфонів WhatsApp. Тож, слід провести заходи для розширення (залучення) аудиторії у цьому сервісі. Варто зазначити, що за даними одного з українських операторів мобільного зв'язку WhatsApp використовують понад 5 млн абонентів [9], а згідно з результатами опитування Internews у 2023 році [10] – 11% українців. Також дослідження [10] вказує на світову тенденцію до збільшення застосування WhatsApp в задачах зв'язків з громадськістю, поширення інформації, тобто, що є очевидним, протидії дезінформації зокрема.

Реагування на факт дезінформації спростуванням загалом є лише одним з можливих інструментів. Так, майже повна відсутність проактивної роботи в цьому напрямі може свідчити або про відсутність налагодженої системи моніторингу інформаційних загроз і можливості прогнозувати ризики, або ж про вибіркового підхід до протидії дезінформації.

Із запропонованої моделі (рис.1) випливає завдання удосконалення функції детектування. Робота ЦПД має бути спрямована на створення і використання

інструментів, які дозволять відслідковувати інформаційні атаки на ранніх стадіях їх розгортання. Такі інструменти мають бути максимально автоматизовані, застосовувати складні алгоритми моніторингу інформаційного простору в усіх його сегментах, апаратний комплекс, що дозволить обробляти величезні масиви інформації, сучасні технології штучного інтелекту [11, 16]. Крім того, відповідно до результатів дослідження [3], для завдань, пов'язаних з моніторингом інформації та його аналітичним супроводом, а також підготовкою звітів, існують державні установи на кшталт Національного інституту стратегічних досліджень чи незалежного аналітичного центру «Український інститут майбутнього», який як спільний проєкт представників українського бізнесу, політики і громадського сектору «прогнозує зміни та моделює можливі сценарії розвитку подій в Україні, надає компетентну оцінку українським подіям, формує практичні рекомендації до дій, пропонує ефективні рішення, надає майданчик для дискусій на актуальні теми» [17], а у сфері факт-чекінгу та підвищення медіаграмотності населення згідно з [3] успішно діють команди, які вже продемонстрували свою спроможність і результативність.

Підвищення ефективності заходів протидії дезінформації. Аналіз отриманих результатів дослідження, зокрема моделі системи інформаційного протиборства координаційного центру з питань національної безпеки і оборони, вказує на необхідність удосконалення процесу детекції інформаційних загроз та фейкових повідомлень, а також гострої необхідності розширення інформаційної діяльності, збільшення цільової аудиторії ЦПД в месенджері WhatsApp.

Для розв'язку першої задачі пропонується впровадити концепцію інтегрованої системи оцінки та моніторингу інформаційних загроз та оперативного реагування на них, застосування технологій ШІ. Ця система має автоматично аналізувати великий обсяг даних, наближеному до реального часу, й порівнювати їх з історичними даними, виявляти патерни, спільні характеристики в повідомленнях, авторах, групах авторів. Крім того, удосконалення дозволить оцінювати оригінальність та повторюваність фрагментів текстів, створювати автоматичні реферати про інформаційні події на основі повідомлень. Основна мета застосування зазначеного підходу – скорочення часу між моментом появи інформації та моментом її виявлення системою.

Розв'язок задачі збільшення покриття у WhatsApp полягає в проведенні заходів збільшення аудиторії [12] в зазначеному пропрієтарному месенджері, що дозволить підвищити ефективність протидії дезінформації за рахунок збільшення охопленої медійної групи під час інформаційної діяльності координаційного органу з питань національної безпеки і оборони.

Висновки:

1. Представлені у цій праці результати аналізу існуючих досліджень і публікацій показали, що для підвищення ефективності заходів протидії дезінформації слід вирішити завдання синтезу концептуальної моделі інформаційного протиборства, що дозволить визначити слабкі й сильні сторони системи, запропонувати метод розв'язку науково-практичної задачі забезпечення ефективної діяльності інституцій, які відповідають за протидію дезінформації, – координаційного органу з питань національної безпеки і оборони.

2. Результати оцінювання ефективності діяльності ЦПД на процеси протидії дезінформації в Україні показали, що, попри фактично існуючий потенціал, пропрієтарний месенджер WhatsApp має найменше, критично мале охоплення аудиторії, хоча ним користуються значна частина абонентів мобільного інтернету в Україні. Крім того, недостатнім є рівень цифровізації моніторингу, який на сьогодні

вимагає аналізування великих обсягів інформації, зокрема з використанням технологій штучного інтелекту.

3. Для побудови концептуальної моделі системи інформаційного протиборства координаційного центру з питань національної безпеки і оборони проведено дослідження ЦДП. Тож, в її базис покладені функцію створення контенту для інформаційного протиборства та взаємодію з громадськістю через просування контенту в медіа і соціальних мережах, тобто реагування на загрози інформаційній безпеці шляхом моніторингу та верифікації дезінформаційних кампаній, зокрема від іноземних держав та інших джерел пропаганди і деструктивних інформаційних впливів, а також засоби, які для цього використовуються: інтернетні ресурси, радіо, телебачення, соціальні мережі.

4. Аналіз запропонованої моделі і результатів дослідження показав гостру необхідність розширення покриття цільової аудиторії через соціальні мережі та месенджери, удосконалення системи детектування інформаційних атак, зокрема за допомогою інформаційних систем, складних алгоритмів моніторингу і технологій штучного інтелекту, а також недостатню проактивність роботи координаційного органу з питань національної безпеки і оборони. Практичними результатами цієї праці є обґрунтована необхідність удосконалення детекції інформаційних загроз, задача використання технологій ШІ для виявлення і реагування на загрози, збільшення охоплення цільової аудиторії у WhatsApp. Це дозволить підвищити ефективність роботи координаційного органу з питань національної безпеки і оборони за рахунок скорочення часу між появою фейкової інформації та її виявленням, збільшення результативності реагування на дезінформацію завдяки розширенню цільової аудиторії і застосуванню сучасних ІТ.

За результатами цього дослідження сформульовано, обґрунтовано і внесено на розгляд ЦДП практичні рекомендації щодо розширення присутності в ключових месенджерах для забезпечення протидії дезінформації. Їх врахування дозволить розширити коло цільової аудиторії для протидії дезінформації, пропаганди, деструктивним інформаційним впливам та кампаній. Очікуваним ефектом цього є зниження рівня вразливості органів виконавчої влади та суспільства до загроз інформаційного характеру завдяки ефективним підходам до здійснення оцінювання ризиків і загроз національним інтересам України в інформаційному просторі шляхом імплементації підходів раннього попередження про загрози інформаційного характеру. Водночас, означене забезпечить скорочення інтервалу часу між настанням резонансної події (або появи інформації про неї) та інформаційним реагуванням на неї.

Список літератури

1. Біденко А., Золотухін Д., Тарабукін О. Біла книга протидії дезінформації. К.: Інститут інформаційної безпеки, 2022. 62 с. URL: <https://www.infosecurity.institute/Проекти-1/-2> (дата звернення: 17.04.2024).
2. Про Центр. Центр протидії дезінформації. URL: <https://cpd.gov.ua/documents/про-центр/> (дата звернення: 01.05.2024).
3. Біденко А. Центр протидії дезінформації: філософія проти менеджменту. ГО «Детектор медіа» : сайт. URL: <https://detector.media/infospace/article/185107/2021-02-22-tsentr-protydii-dezinformatsii-filosofiya-proti-menedzhmentu/> (дата звернення: 01.05.2024).
4. Золотухін Д. Центр протидії дезінформації: практика імплементації. ГО «Детектор медіа» : сайт. URL: <https://detector.media/infospace/article/185586/2021-03-08-tsentr-protydii-dezinformatsii-praktyka-implementatsii/> (дата звернення: 01.05.2024).
5. Золотухін Д. Матриця загроз інформаційної сфери. ГО «Детектор медіа» : сайт. URL: <https://detector.media/infospace/article/186798/2021-04-08-matrytsya-zagrozh-informatsiynoi-sfery/> (дата звернення: 01.05.2024).

6. Золотухін Д. Як має працювати Центр протидії дезінформації. ГО «Детектор медіа» : сайт. URL: <https://detector.media/infospace/article/185077/2021-02-20-yak-maie-pratsyuvaty-tsentr-protydii-dezinformatsii-poyasnennya-napaltsyakh/> (дата звернення: 01.05.2024).
7. Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 11 березня 2021 року «Про створення Центру протидії дезінформації» : Указ Президента України від 19.03.2021 №106/2021. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/106/2021#Text> (дата звернення: 01.05.2024).
8. Питання Центру протидії дезінформації : Указ Президента України від 07.05.2021 №187/2021. URL: <https://www.president.gov.ua/documents/1872021-38841> (дата звернення: 01.05.2024).
9. АрміяInform : сайт. Міністерство оборони України. URL: <https://armyinform.com.ua/> (дата звернення: 10.04.2024).
10. Коцофане О. Які соцмережі і месенджери найпопулярніші серед українців. Webpromo. URL: <https://web-promo.ua/ua/blog/kakie-socseti-i-messendzhery-samye-populyarnye-sredi-ukraincev/> (дата звернення: 01.05.2024).
11. Українські медіа, ставлення та довіра у 2023 р. : Опитування USAID-Internews щодо споживання медіа. Internews. URL: <https://internews.in.ua/wp-content/uploads/2023/10/Ukrainski-media-stavlennia-ta-dovira-2023r.pdf> (дата звернення: 01.05.2024).
12. Гбур З.В. Використання штучного інтелекту в інформаційній безпеці України. Державне управління: удосконалення та розвиток. 2022. № 1. DOI: 10.32702/2307-2156-2022.1.2.
13. Леонов Я. В., Васильківський Д. М., Бойко В. Д. Еволюція інформаційного маркетингу: стратегії та технології в сучасному бізнесі. Ефективна економіка. 2024. № 2. DOI: <http://doi.org/10.32702/2307-2105.2024.2.27>. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/efek_2024_2_29 (дата звернення: 02.09.2024).
14. Доренський О.П. Модель поведінки держави в умовах проявів ознак інформаційної експансії, агресії, війни. Інформаційна безпека держави, суспільства та особистості : Всеукр. наук.- практ. конф., 16 квіт. 2015 р., м. Кіровоград : зб. тез доп. – Кіровоград: КНТУ, 2015. С. 131-133. URI: <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/6100> (дата звернення: 17.04.2024).
15. Колодяжний І.О., Доренський О.П. Методологічні засади підвищення ефективності протидії антиукраїнській пропаганді в соціальних мережах. Інформаційні технології – 2019 : VI всеукр. наук.-практ. конф. молодих науковців, 16 трав. 2019 р., м. Київ. К. : Київ. унт ім. Б. Грінченка, 2019. С. 53-54. URL: https://fitm.kubg.edu.ua/images/stories/Departments/kitmd/zbirnik/zbirn_tez_materialiv_konf_IT_2019.pdf (дата звернення: 17.04.2024).
16. Трофименко О., Логінова Н., Соколов А., Чикунів П., Ахметьєва Г. Штучний інтелект у військовій сфері. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*. № 1(25). С. 161-176. DOI 10.28925/2663-4023.2024.25.161176.
17. Про інститут. Український інститут майбутнього. URL: <https://uifuture.org/pro-institut/> (дата звернення: 17.08.2024).

References

1. Bidenko, A., Zolotukhin, D., & Tarabukin, O. (2022). *Disinformation White Paper*. Kyiv: Institute of Information Security <https://www.infosecurity.institute/Проекти-1/-2>.
2. About the Center. (n.d.). Tsentr protydii dezinformatsii. <https://cpd.gov.ua/documents/про-центр/>.
3. Bidenko, A. (2021, February 22). Center for Countering Disinformation: Philosophy vs. Management. Detektor media. <https://detector.media/infospace/article/185107/2021-02-22-tsentr-protydii-dezinformatsii-filosofiya-protu-menedzhmentu/>.
4. Zolotukhin, D. (2021, March 8). Center for Countering Disinformation: Implementation Practice. Detektor media. <https://detector.media/infospace/article/185586/2021-03-08-tsentr-protydii-dezinformatsii-praktyka-implementatsii/>.
5. Zolotukhin, D. (2021, April 8). Matrix of threats to the information sphere. Detektor media. <https://detector.media/infospace/article/186798/2021-04-08-matrytsya-zagroz-informatsiynoi-sfery/>.
6. Zolotukhin, D. (2021, February 20). How the Center for Countering Disinformation Should Work. Detektor media. <https://detector.media/infospace/article/185077/2021-02-20-yak-maie-pratsyuvaty-tsentr-protydii-dezinformatsii-poyasnennya-napaltsyakh/>.
7. Decree of the President of Ukraine On the Decision of the National Security and Defense Council of Ukraine of March 11, 2021 “On the Establishment of the Center for Countering Disinformation” №106/2021. (2021, March 19). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/106/2021#Text>.
8. Question from the Center for Countering Disinformation: Decree of the President of Ukraine. (2021, May 7). №187/2021. <https://www.president.gov.ua/documents/1872021-38841>.

9. ArmyInform. (n.d.). Ministerstvo obrony Ukrainy. <https://armyinform.com.ua/>.
10. Kotsofane, O. (2021, February 15) What social networks and messengers are most popular among Ukrainians. Webpromo. <https://web-promo.ua/ua/blog/kakie-socseti-i-messendzhery-samye-populyarnye-sredi-ukraincev/>.
11. Ukrainian Media, Attitudes and Trust in 2023: USAID - Internews Media Consumption Survey. Internews. <https://internews.in.ua/wp-content/uploads/2023/10/Ukrainski-media-stavlennia-ta-dovira-2023r.pdf>.
12. Hbur, Z.V. (2022). The use of artificial intelligence in information security in Ukraine. Derzhavne upravlinnia: udoskonalennia ta rozvytok. № 1. [in Ukrainian]. <https://www.doi.org/10.32702/2307-2156-2022.1.2>.
13. Leonov, Ya.V., Vasyukivskiy, D.M., & Boiko, V.D. (2024). The Evolution of Information Marketing: Strategies and Technologies in Modern Business. *Efektivna ekonomika*, № 2. [in Ukrainian]. <http://doi.org/10.32702/2307-2105.2024.2.27>.
14. Dorenskiy, O.P. (2015) Model of state behavior in conditions of manifestations of signs of information expansion, aggression, war. *Informatsiina bezpeka derzhavy, suspilstva ta osobystosti : zbirnyk tez dopovidei vseukraïnskoi naukovo- praktychnoi konferentsii* (pp. 131-133) Kirovohrad: KNTU [in Ukrainian]. <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/6100>.
15. Kolodiaznyi, I.O., & Dorenskiy, O.P. (2019) Methodological principles for increasing the effectiveness of countering anti-Ukrainian propaganda in social networks. *Informatsiini tekhnologii – 2019 : vseukraïnska naukovo-praktychna konferentsiia molodykh naukovtsiv* (pp. 53-54). Kyiv : KU im. B. Hrinchenka [in Ukrainian]. https://fitm.kubg.edu.ua/images/stories/Departments/kitmd/zbirnyk/zbirn_tez_materialiv_konf_IT_2019.pdf.
16. Trofymenko, O., Lohinova, N., Sokolov, A., Chygunov, P., & Akhmetieva, H. (2024) Artificial intelligence in the military sphere. *Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika*, № 1(25), 161-176. <http://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.25.161176>.
17. About the Institute. (n.d.). Ukrainskiy instytut maibutnoho. <https://uifuture.org/pro-institut/>.

Oleksandr Dorenskiy, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksandr Ulichev**, PhD tech. sci.,
Kostiantyn Zadorozhnyi, student, **Anastasiia Kovalenko**, assistant, **Hanna Drieieva**, PhD
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

The Conceptual Model of the Information Counteraction System of the Coordination Center for National Security and Defense Issues

The article examines the pressing issue of enhancing the efficiency of information confrontation conducted by the coordination body responsible for national security and defense – the Center for Countering Disinformation. The goal of this study is achieved by synthesizing a conceptual model of the information confrontation system, applying this model to identify weaknesses, and improving the mechanism for countering disinformation to enhance its efficiency. This improvement ensures effective resistance to destructive informational influences and campaigns, propaganda, real and potential threats in the information sphere, and prevents attempts to manipulate public opinion.

The proposed mechanism for countering disinformation involves responding to disinformation attacks by creating and distributing content on social media platforms. The results revealed insufficient coverage of the target audience on WhatsApp, highlighting a deficiency in the information confrontation system that adversely affects the efficiency of countering disinformation. The research also demonstrates the importance of enhancing the detection process for informational threats using IT, advanced technologies, and artificial intelligence tools. This approach will reduce the time required to identify threats in the information sphere. To address the existing problem, the study suggests expanding the coverage of the target audience on WhatsApp to improve the efficiency of the coordination body's disinformation countermeasures. This body plays a key role in ensuring the state's informational security, identifying and countering disinformation, propaganda, and destructive informational influences, as well as conducting measures to mitigate threats in the information domain.

The practical value of this research lies in reducing the vulnerability of executive authorities and society to informational threats by enhancing the effectiveness of disinformation countermeasures. Additionally, it will improve the responsiveness to disinformation, propaganda, and manipulation, shorten the time between the emergence and detection of fake information, and ensure effective risk assessment for Ukraine's national security in the information space.

information security, disinformation, information counteraction, conceptual model, social media, WhatsApp

Одержано (Received) 08.11.2024

Прорецензовано (Reviewed) 10.12.2024

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2024

УДК 004.056:621.396.6

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.32-38](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.32-38)**Д.І. Прокопович-Ткаченко**, доц., канд. техн. наук*Університет митної справи та фінансів, м. Дніпро, Україна***В.П. Зверєв**, доц., канд. техн. наук, **В.Г. Бушков**, асп.*Державний торговельно-економічний університет, м. Київ, Україна***Б.С. Хрушков**, асп., **О.В. Черкаський**, студ.*Університет митної справи та фінансів, м. Дніпро, Україна*

Таргетовані атаки на супутникові інтернет-системи: виклики та підходи до захисту

У статті аналізується одна з наймасштабніших кібератак, спрямована на використання уразливостей супутникового інтернету Starlink, що широко застосовується для забезпечення зв'язку в умовах відсутності традиційної інфраструктури. Зловмисники, використовуючи шкідливе програмне забезпечення, здійснили таргетовані атаки на пристрої, що дозволило їм отримати доступ до конфіденційної інформації та порушити роботу критичних систем. Детально описано методи атак, включаючи впровадження шкідливих програм через PowerShell-дроппери, зміну конфігурацій мережевих пристроїв та збирання чутливих даних. Особливу увагу приділено наслідкам атак, серед яких втрати даних, дестабілізація роботи мережі та уразливість ключової інфраструктури. На основі проведеного аналізу запропоновано рекомендації щодо вдосконалення систем кіберзахисту, зокрема впровадження багаторівневих емерджентно-адаптивних нейромереж, здатних забезпечити моніторинг та реагування у реальному часі. Наголошено на важливості інтеграції міжнародних стандартів інформаційної безпеки, таких як ДСТУ ISO/IEC 27001:2023, для створення ефективної системи захисту, адаптованої до сучасних кіберзагроз.

кібербезпека, супутниковий інтернет, Starlink, шкідливе ПЗ, конфіденційність даних, адаптивні нейромережі, PowerShell-дроппери, таргетовані атаки, уразливості, багаторівневий захист, кіберзагрози

Постановка проблеми. У сучасних умовах цифрової трансформації супутниковий інтернет стає важливим елементом забезпечення стабільного зв'язку в регіонах із відсутністю традиційної інфраструктури або її пошкодженням. Однією з найпоширеніших систем, яка використовується в таких умовах, є Starlink, що забезпечує високу швидкість передачі даних навіть у віддалених районах. Однак, попри значні переваги, супутникові системи зв'язку створюють нові виклики в сфері кібербезпеки. Вразливості цих систем активно експлуатуються зловмисниками, які спрямовують свої зусилля на компрометацію критичної інфраструктури, збирання чутливих даних та дестабілізацію роботи комунікаційних мереж. Останні масштабні кібератаки на супутникові системи демонструють високий рівень організації хакерських угруповань, які використовують сучасні технології, зокрема шкідливе програмне забезпечення, для досягнення своїх цілей. Таргетовані атаки часто включають впровадження PowerShell-дропперів, зміну конфігурацій мережевих пристроїв та збирання даних, що призводить до значних втрат конфіденційної інформації та порушення роботи мереж. Особливу увагу привертає недостатня готовність традиційних систем кіберзахисту до протидії таким загрозам.

Це зумовлює необхідність розробки адаптивних підходів, які враховують динаміку сучасного кіберсередовища. Впровадження багаторівневих систем захисту,

що базуються на емерджентно-адаптивних нейромережах, є перспективним напрямом для забезпечення оперативного моніторингу та швидкого реагування на загрози. Метою даної роботи є аналіз сучасних методів таргетованих атак на супутникові системи зв'язку, оцінка їх впливу на критичну інфраструктуру та розробка рекомендацій щодо вдосконалення кіберзахисту. У роботі також акцентується увага на важливості інтеграції міжнародних стандартів, таких як ДСТУ ISO/IEC 27001:2023, для підвищення стійкості інформаційних систем до нових кіберзагроз.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Атака групи Secret Blizzard на інфраструктуру, що використовує супутниковий інтернет Starlink, підкреслює необхідність впровадження комплексних заходів кібербезпеки. Використання шкідливого програмного забезпечення Amadeu та Tavdig свідчить про високий рівень організації та координації зловмисників. Для ефективного захисту інформаційних систем необхідно впроваджувати емерджентно-адаптивні нейромережі, здатні динамічно реагувати на нові загрози та забезпечувати безпеку на всіх рівнях моделі OSI. Це дозволить підвищити конфіденційність, цілісність та доступність даних, особливо в екстремальних польових умовах. Важливим є дотримання національних стандартів, таких як ДСТУ ISO/IEC 27001:2023, що встановлює вимоги до систем управління інформаційною безпекою [1], та ДСТУ ISO/IEC 27002:2023, який надає рекомендації щодо контролю кібербезпеки [2]. Крім того, слід враховувати стандарти НАТО, зокрема STANAG 4586, що визначає вимоги до сумісності систем управління безпілотними літальними апаратами [3]. Дотримання цих стандартів сприятиме підвищенню рівня захисту інформаційних систем та ефективному протистоянню сучасним кіберзагрозам. Застосування методів супутникового моніторингу та геопросторового аналізу є важливим компонентом забезпечення безпеки критичних об'єктів. Зокрема, оперативний супутниковий геомоніторинг наслідків руйнування Каховської ГЕС показав ефективність використання супутникових даних для аналізу кризових ситуацій [6]. Аналогічно, використання супутникових кластерів Ionosats дозволяє покращити спостереження за станом іоносфери та потенційними загрозами [7]. Застосування методів супутникового агромоніторингу є перспективним підходом до контролю стану земної поверхні, виявлення загроз для сільського господарства та моніторингу критичної інфраструктури [8], [9].

Постановка завдання. Таким чином, метою роботи є аналіз методів таргетованих атак на супутникові інтернет-системи, оцінка їхнього впливу та розробка рекомендацій щодо кіберзахисту. Досліджуються вразливості Starlink, відомі випадки атак із застосуванням шкідливого ПЗ та методи компрометації мережевої інфраструктури. Оцінюється ефективність традиційних систем кібербезпеки у протидії сучасним загрозам. Пропонується концепція емерджентно-адаптивної нейромережі для виявлення та блокування атак у режимі реального часу. Обґрунтовується інтеграція міжнародних стандартів кібербезпеки, зокрема ДСТУ ISO/IEC 27001:2023, для підвищення стійкості супутникових мереж.

Виклад основного матеріалу. Сучасні кібератаки є складними, багатоетапними процесами, які потребують ретельного планування, координації та адаптації до змінних умов. У цьому дослідженні розглядається алгоритм атак (рис.1), застосований групою Secret Blizzard, яка здійснює таргетовані кібератаки на інформаційні системи, зокрема на ті, що використовують супутниковий інтернет Starlink. Представлений алгоритм є циклічним та гнучким, що дозволяє зловмисникам швидко пристосовуватися до нових контрзаходів і змінювати стратегії для досягнення своїх цілей.

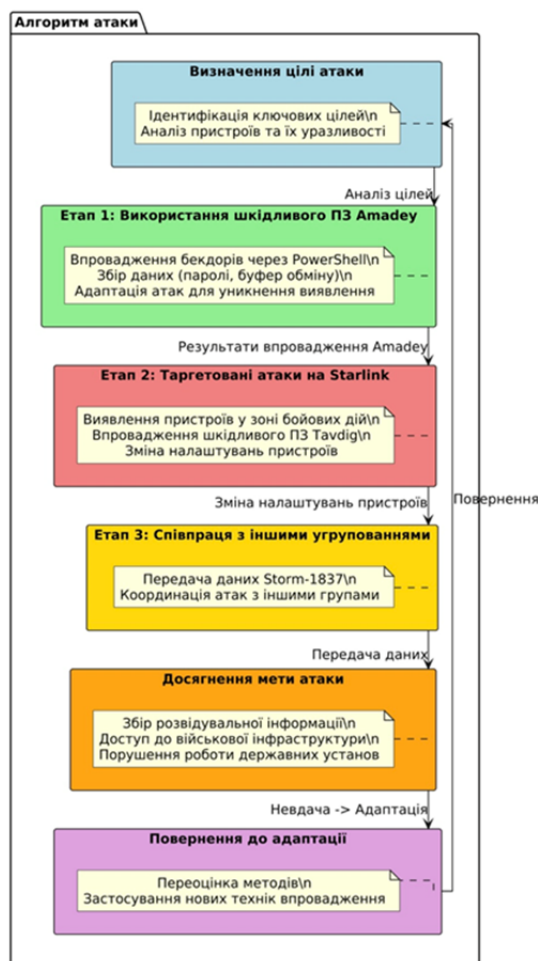


Рисунок 1 – Етапи алгоритму атаки

Джерело: розроблено авторами

Визначення цілі атаки

На початковому етапі здійснюється ідентифікація ключових цілей, зокрема інформаційних систем, що працюють через Starlink. Аналізується вразливість пристроїв для подальшого планування атаки.

Етап 1: Використання шкідливого ПЗ Amadey

Впроваджується шкідливе програмне забезпечення Amadey через PowerShell-скрипти та дроппери. Основними завданнями цього етапу є встановлення бекдорів для віддаленого доступу, збір чутливих даних (паролі, буфер обміну) та адаптація атак для обходу антивірусного захисту.

Етап 2: Таргетовані атаки на Starlink

Виконується пошук пристроїв у зоні бойових дій, після чого на них впроваджується шкідливе ПЗ Tavdig. Це дозволяє зловмисникам змінювати конфігурацію обладнання, що може призвести до збоїв або повної зупинки його роботи.

Етап 3: Співпраця з іншими угрупованнями

Зібрані дані передаються угрупованню Storm-1837, яке спеціалізується на відстеженні операторів дронів та військових комунікацій. Також здійснюється координація атак з іншими хакерськими групами для підвищення ефективності дій.

5. Досягнення мети атаки

Головними завданнями атак є:

Отримання розвідувальної інформації щодо діяльності ЗСУ.

Доступ до ключових компонентів військової інфраструктури.

Дестабілізація роботи державних установ.

6. Повернення до адаптації

У разі, якщо атака не досягла своїх цілей, алгоритм повертається на початковий етап. Проводиться переоцінка методів, впроваджуються нові техніки атак, адаптовані до виявлених контрзаходів. Запропонований алгоритм атак демонструє високу ступінь організованості та координації дій угруповання Secret Blizzard. Гнучкість і адаптивність їхніх атак дозволяють їм ефективно протистояти системам захисту, що робить їх надзвичайно небезпечними для інформаційних систем і критичної інфраструктури.

Математична модель виявлення атак та її використання в емерджентно адаптивних нейромережах кібербезпеки

Постановка задачі

у системі кіберзахисту є множина можливих загроз $\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$. Для кожної загрози T_i визначено:

- ймовірність виникнення загрози p_i (за статистикою чи аналітикою);
- ваговий коефіцієнт w_i , що відображає важливість та критичність загрози;
- функція виявлення (активності) $f_i(x)$, що залежить від вхідних даних моніторингу x (наприклад, трафік, логи, поведінкові ознаки).

Математична модель виявлення атак

Інтегральну ймовірність наявності атаки (або сумарний рівень загрози) можна представити у вигляді:

$$P_{\text{attack}} = \sum_{i=1}^n w_i p_i f_i(x) \quad (1),$$

тут $p_i \sim$ – ймовірність появи -тої загрози;

$w_i^{i\text{-тої загрози}}$ – ваговий коефіцієнт критичності;

$f_i(x) \sim$ – функція, що повертає (зазвичай у діапазоні $[0,1]$) рівень впевненості у наявності загрози T_i на основі поточних даних x .

Алгоритм оцінки ризику (CIA-параметри)

У класичній триаді безпеки конфіденційність, цілісність, доступність задаються:

$$P_C, P_I, P_A$$

де P_C – рівень (ймовірність) збереження конфіденційності;

P_I – рівень (ймовірність) збереження цілісності;

P_A – рівень (ймовірність) збереження доступності.

Базова формула для рівня ризику

Найчастіше інтегральний рівень ризику R беруть як ймовірність порушення принаймні одного з параметрів C, I, A :

$$R = 1 - (P_C \times P_I \times P_A) \quad (2)$$

Якщо відомі вагові коефіцієнти $\alpha_C, \alpha_I, \alpha_A$, що відображають різну важливість складових (за умови $\alpha_C + \alpha_I + \alpha_A = 1$), можна використовувати альтернативний варіант:

$$R = \alpha_C(1 - P_C) + \alpha_I(1 - P_I) + \alpha_A(1 - P_A)$$

Приклад із заданими параметрами

Припустимо, що маємо такі значення (згідно з Таблицею~1 дослідження):

$$P_C = 0.95, P_I = 0.90, P_A = 0.85$$

Тоді, скориставшись формулою (2):

$$R = 1 - (0.95 \times 0.90 \times 0.85) = 1 - 0.72675 \approx 0.27325$$

Отже, сумарний ризик складає приблизно 27,3%.

Застосування в емерджентно адаптивних нейромережах

Емерджентність

Емерджентна поведінка означає, що складна нейромережа, взаємодіючи з великою кількістю вхідних даних і внутрішніх елементів, може виявляти нові закономірності (наприклад, zero-day атаки або нестандартні сценарії) без жорстко визначеного алгоритму.

Адаптивність

Адаптивна нейромережа здатна динамічно коригувати вагові коефіцієнти w_i у формулі (1) та оновлювати функції виявлення $f_i(x)$ під впливом:

- змін у профілі загроз (нові вразливості, нові типи атак);
- результатів аналізу вхідних сигналів (трафік, логи, поведінкові патерни);
- зворотного зв'язку від спеціалістів з кібербезпеки (підтверджені атаки чи хибні спрацювання).

Переваги використання нейромережі

Проактивне виявлення атак: зниження ризику невчасного реагування, оскільки мережа навчається на великих обсягах даних та виявляє приховані патерни.

Зменшення хибних спрацювань: адаптивне налаштування порогу спрацювання та індивідуальна корекція вагових коефіцієнтів.

Оцінка ризику в реальному часі: підрахунок R з формули (2) чи (3) з урахуванням актуальних даних дає змогу автоматично активувати додаткові заходи кіберзахисту.

Висновок

Запропонована математична модель виявлення атак у вигляді:

$$P_{\text{attack}} = \sum_{i=1}^n w_i p_i f_i(x),$$

та використання показника ризику

$$R = 1 - (P_C \times P_I \times P_A)$$

(або його зваженого аналога) можуть бути ефективно реалізовані в емерджентно адаптивних нейромережах кібербезпеки.

Адаптивність дає можливість постійно підлаштовуватися до нових загроз, змінюючи ваги та пороги спрацювання в режимі реального часу. Це істотно підвищує загальний рівень захисту, знижує кількість хибних спрацювань та забезпечує інтегровану оцінку ризиків з урахуванням факторів конфіденційності, цілісності й доступності.

Обговорення. Проведений аналіз таргетованих атак на супутникові інтернет-системи показав високий рівень координації дій зловмисників та використання багаторівневих методів ураження. Атаки групи Secret Blizzard базувалися на використанні шкідливого програмного забезпечення Amadeu і Tavdig, що дозволило обійти традиційні системи кіберзахисту. Крім того, зловмисники застосовували PowerShell-дропери та змінювали конфігурацію мережевих пристроїв, що суттєво підвищувало ефективність атак.

Висновки. Таргетовані атаки на супутникові інтернет-системи, такі як Starlink, є складними та багаторівневими, що ускладнює їх виявлення. Зловмисники використовують сучасні техніки, зокрема Amadeu і Tavdig, що дозволяє їм досягати високої ефективності. Традиційні системи кіберзахисту не відповідають сучасним викликам, через що стають малоефективними. Емерджентно-адаптивні нейромережі показали високу ефективність у скороченні часу реакції та підвищенні точності виявлення атак. Інтеграція таких рішень з міжнародними стандартами, як-от ДСТУ ISO/IEC 27001:2023, забезпечує формалізацію та підвищення стійкості систем кіберзахисту. Впровадження емерджентно-адаптивних технологій дозволить створити надійний захист супутникових інтернет-систем, зменшити ризики атак і підвищити стійкість критичної інфраструктури до сучасних кіберзагроз.

Список літератури

1. ДСТУ ISO/IEC 27001:2023. Інформаційна безпека, кібербезпека та захист конфіденційності. Система керування інформаційною безпекою. Вимоги. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2023. 12 с.
2. ДСТУ ISO/IEC 27002:2023. Інформаційна безпека, кібербезпека та захист конфіденційності. Код практики для заходів контролю інформаційної безпеки. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2023. 21 с.
3. NATO STANAG 4586. Стандарт взаємодії систем управління безпілотними авіаційними комплексами. Брюссель: НАТО, 2023. 34 с.
4. Наказ Державного центру кіберзахисту Держспецзв'язку України № 79 від 10.11.2021. Правила обміну інформацією про кіберінциденти та перелік категорій кіберінцидентів. Київ: Держспецзв'язку, 2021. 22 с.
5. Наказ Адміністрації Держспецзв'язку України № 773 від 30.08.2023. Методичні рекомендації щодо підвищення рівня кібербезпеки систем електронного документообігу. Київ: Держспецзв'язку, 2023. 15 с.
6. Ліщенко Л. П., Філіпович В. Є. Оперативний супутниковий геомоніторинг наслідків руйнування греблі Каховської гідроелектростанції. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*. 2024. Т. 11, № 1. С. 14–20. DOI: 10.36023/ujrs.2024.11.1.25.
7. Ivchenko V. M., Korepanov V. Ye., Lizunov G. V., Fedorov O. P., Yampolski Yu. M. The ionospheric satellite cluster Ionosats. *Kosmična nauka i tehnologiya*. 2007. Т. 13, № 3. С. 55–66. DOI: 10.15407/knit2007.03.055.
8. Kussul N., Shelestov A., Kolotii A., Lavreniuk M., Butko I. Satellite agromonitoring in Ukraine. *Visnik Nacional'noi akademii nauk Ukraini*. 2016. № 2. С. 96–102. DOI: 10.15407/visn2016.02.096.
9. Shelestov A. Yu., Yailymov B. Ya., Yailymova H. O., Bilokonska Y. V., Nivievskiy O. V. Satellite crop monitoring for Ukraine. *Kosmična nauka i tehnologiya*. 2020. Т. 26, № 6. С. 27–37. DOI: 10.15407/knit2020.06.027.
10. Wang B., Kharchenko V., Grekhov A., Ali I. Оцінювання умов перевантаження при передаванні даних через супутниковий канал зв'язку. *Вісник Національного авіаційного університету*. 2016. Т. 66, № 1. DOI: 10.18372/9865.
11. Kavats O., Kavats Y., Dibrii D. Супутниковий моніторинг оцінки стану забруднення водних об'єктів на основі машинного навчання. *International Scientific and Technical Conference Information Technologies in Metallurgy and Machine Building*. 2024. С. 495–499. DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2024.01.095.
12. Ліщенко Л. П. Супутниковий моніторинг стану геосистеми локального рівня на прикладі Матвіївського лісу поблизу м. Миколаїв (Україна). *Ukrainian Journal of Remote Sensing*. 2023. Т. 10, № 2. С. 27–34. DOI: 10.36023/ujrs.2023.10.2.22.
13. Dudnik O. V. Satellite telescope of electrons and protons STEP-F of the space scientific project CORONAS-PHOTON. *Visnik Nacional'noi akademii nauk Ukraini*. 2017. Т. 11. С. 53–65. DOI: 10.15407/visn2017.11.053.
14. Kussul N. M., Shelestov A. Yu., Lavreniuk M. S., Kolotii A. V., Yailymov B. Ya., Yailymova G. O. Satellite agromonitoring in Ukraine: Results of Sentinel-2 for agriculture project and further prospects. *Visnik Nacional'noi akademii nauk Ukraini*. 2016. № 12. С. 99–104. DOI: 10.15407/visn2016.12.099.

References

1. DSTU ISO/IEC 27001:2023. (2023). Information security, cybersecurity and privacy protection. Information security management system. Requirements. Kyiv: DP 'UkrNDNC'.
2. DSTU ISO/IEC 27002:2023. (2023). Information security, cybersecurity and privacy protection. Code of practice for information security controls. Kyiv: DP 'UkrNDNC'.
3. NATO STANAG 4586. (2023). Standard for interoperability of unmanned aerial vehicle control systems. Brussels: NATO.
4. State Cyber Protection Center of the State Special Communications Service of Ukraine. (2021). Order No. 79 of 10.11.2021. Rules for exchanging information on cyber incidents and the list of categories of cyber incidents. Kyiv: State Special Communications Service.
5. Administration of the State Special Communications Service of Ukraine. (2023). Order No. 773 of 30.08.2023. Methodological recommendations for improving the level of cybersecurity of electronic document management systems. Kyiv: State Special Communications Service.
6. Lishchenko, L. P., & Filipovych, V. Ye. (2024). Operational satellite geomonitoring of the consequences of the destruction of the Kakhovka Hydroelectric Power Plant dam. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 11(1), 14–20. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2024.11.1.25>

7. Ivchenko, V. M., Korepanov, V. Ye., Lizunov, G. V., Fedorov, O. P., & Yampolski, Yu. M. (2007). The ionospheric satellite cluster Ionosats. *Kosmična nauka i tehnologiya*, 13(3), 55–66. <https://doi.org/10.15407/knit2007.03.055>
8. Kussul, N., Shelestov, A., Kolotii, A., Lavreniuk, M., & Butko, I. (2016). Satellite agromonitoring in Ukraine. *Visnik Nacional'noi akademii nauk Ukraini*, (2), 96–102. <https://doi.org/10.15407/visn2016.02.096>
9. Shelestov, A. Yu., Yailymov, B. Ya., Yailymova, H. O., Bilokonska, Y. V., & Nivievskiy, O. V. (2020). Satellite crop monitoring for Ukraine. *Kosmična nauka i tehnologiya*, 26(6), 27–37. <https://doi.org/10.15407/knit2020.06.027>
10. Wang, B., Kharchenko, V., Grekhov, A., & Ali, I. (2016). Evaluation of overload conditions during data transmission via satellite communication channels. *Visnyk of the National Aviation University*, 66(1). <https://doi.org/10.18372/9865>
11. Kavats, O., Kavats, Y., & Dibrii, D. (2024). Satellite monitoring of water pollution assessment using machine learning. International Scientific and Technical Conference on Information Technologies in Metallurgy and Machine Building, 495–499. <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2024.01.095>
12. Lishchenko, L. P. (2023). Satellite monitoring of the local geosystem state on the example of Matviyivskiy Forest near Mykolaiv (Ukraine). *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 10(2), 27–34. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2023.10.2.22>
13. Dudnik, O. V. (2017). Satellite telescope of electrons and protons STEP-F of the space scientific project CORONAS-PHOTON. *Visnik Nacional'noi akademii nauk Ukraini*, (11), 53–65. <https://doi.org/10.15407/visn2017.11.053>
14. Kussul, N. M., Shelestov, A. Yu., Lavreniuk, M. S., Kolotii, A. V., Yailymov, B. Ya., & Yailymova, G. O. (2016). Satellite agromonitoring in Ukraine: Results of Sentinel-2 for agriculture project and further prospects. *Visnik Nacional'noi akademii nauk Ukraini*, (12), 99–104. <https://doi.org/10.15407/visn2016.12.099>

Dmytro Prokopovych-Tkachenko, Assoc. Prof., PhD , tech. sci.

Customs and Finance University, Dnipro, Ukraine

Volodymyr Zverev, Assoc. Prof., PhD , tech. sci., **Valeriy Bushkov**, post-graduate

State University of Trade and Economics, Kyiv, Ukraine

Borys Khrushkov, post-graduate, **Oleksandr Cherkaskiy**, student

Customs and Finance University, Dnipro, Ukraine

Targeted Attacks on Satellite Internet Systems: Challenges and Protection Approaches

The purpose of this article is to analyze modern targeted cyberattacks on satellite internet systems, assess their impact on critical infrastructure, and develop recommendations for enhancing cybersecurity measures. The study focuses on identifying vulnerabilities within the Starlink system, widely used in remote areas and military operations. Given the increasing complexity of cyber threats, traditional protection methods prove ineffective against multi-vector attacks, emphasizing the necessity of adaptive defense mechanisms. The paper proposes an innovative approach based on emergent-adaptive neural networks, which can dynamically monitor and respond to cyber threats in real time. Furthermore, the integration of international cybersecurity standards, such as DSTU ISO/IEC 27001:2023, is considered essential for strengthening the resilience of satellite communication networks.

The research thoroughly examines documented cyber incidents targeting Starlink, highlighting the use of advanced malware like Amadey and Tavdig, as well as techniques such as PowerShell droppers and network configuration manipulation. The study details the attack cycle, including reconnaissance, payload deployment, data extraction, and system destabilization. The effectiveness of traditional cybersecurity measures is critically assessed, revealing their limitations in mitigating sophisticated cyber threats. To counteract these challenges, a multi-layered defense system based on emergent-adaptive neural networks is proposed.

The findings indicate that modern cyber threats targeting satellite communication systems require a paradigm shift in cybersecurity strategies. The proposed adaptive neural network approach improves the ability to identify and neutralize cyber threats in real time, offering a more resilient and efficient protection mechanism. Additionally, compliance with international cybersecurity standards is highlighted as a key factor in maintaining a robust security framework. Future research should explore the integration of AI-driven cybersecurity solutions with existing satellite monitoring and defense infrastructures, ensuring comprehensive protection against emerging cyber threats.

cybersecurity, satellite internet, Starlink, malware, targeted attacks, neural networks, PowerShell droppers

Одержано (Received) 18.11.2024

Прорецензовано (Reviewed) 18.12.2024

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2024

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

УДК 621.9.048.4

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.39-46](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.39-46)

О. Ф. Сіса, доц., канд. техн. наук, В. Я. Мірзак, доц., канд. техн. наук,

О. А. Кислун, доц., канд. техн. наук, Д. С. Тупаленко, асп.

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: sisaoleh@gmail.com

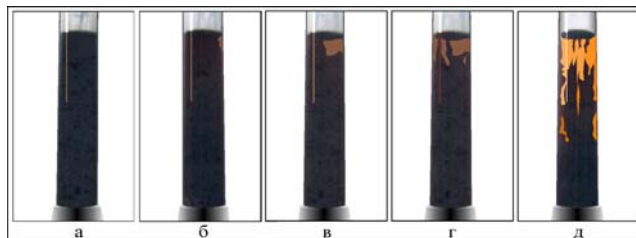
Удосконалення фільтра грубого очищення робочих рідин фільтрувальним елементом із металевої сітки

Запропоновано фільтр грубого очищення робочих рідин фільтрувальним елементом із металевої сітки із квадратним вічком, в якому фільтрувальний елемент має форму циліндричного стакана з невеликим фланцем та бічну і донну робочі поверхні. Розроблено технологію виготовлення фільтрувального елемента. Показано, що використання даного фільтра дозволяє зменшити вартість його виготовлення за рахунок спрощення технології виготовлення фільтрувального елемента, а також розширити область використання фільтра за рахунок наявності у фільтрувальному елементі не тільки бічної, але і донної робочої поверхні, що підвищує його пропускну здатність і робить його більш компактним.

фільтр грубого очищення, фільтрувальний елемент, металева сітка із квадратним вічком, робоча поверхня, витягування

Постановка проблеми. У будь-якому виді робочої рідини, наприклад: вода, паливо або мастило гідроприводу, присутні різні суспензії й домішки. Це дрібні й великі тверді частки іржі, металу, піску та інші забруднення. Вони попадають в гідросистему із зовні, або вже перебувають в ній. Для нормальної роботи механізмів та машин, що використовують різні робочі рідини, розміри механічних часток в ній повинні бути менше зазору в парах, що рухаються, або отворів в форсунках. У зв'язку з цим, робочі рідини попередньо фільтрують [1, 2, 3, 4]. Звичайно застосовують двоступеневу фільтрацію: спочатку грубе очищення, а далі тонке очищення. Дана робота присвячена удосконаленню системи грубого очищення.

Відомі фільтри грубого очищення, в яких рідина очищається за рахунок відстію (гравітаційні фільтри) [5, 6]. Вони являють собою баки великого об'єму, з перегородками. Об'єм рідини в баку рекомендують мати в межах не менше ніж від двох до трьох хвилин продуктивності насоса. Ця обставина різко обмежує область використання даних фільтрів. Крім того, в роботі [7, с. 439] показано, що процес відстію рідини, яка була задіяна у технологічному процесі, дуже повільний (рис. 1).



а – рідина після обробки; б – осад через один тиждень; в – осад через два тижні;
в – осад через три тижні; г – осад через чотири тижні

Рисунок 1 – Динаміка зміни забруднення органічної робочої рідини в залежності від часу відстію
Джерело: на підставі [7]

© О. Ф. Сіса, В. Я. Мірзак, О. А. Кислун, Д. С. Тупаленко, 2024

В цьому зв'язку, певний практичний інтерес для грубого очищення робочих рідин являють сітчасті фільтри, як більш компактні та зручні у користуванні [8, с. 21, рис. 2.7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сітчастим називається такий фільтр, в якому фільтрування відбувається при проходженні робочої рідини крізь вічка сітки фільтрувального елемента. В залежності від матеріалу фільтрувального елемента розрізняють металеві та неметалеві сітчасті фільтри. Для грубого очищення робочих рідин використовуються тільки металеві. В свою чергу розрізняють металеві сітки квадратного та саржевого плетіння [9, с. 127]. Для грубого очищення робочих рідин використовуються лише металеві сітки квадратного плетіння, тобто металеві сітки із квадратним вічком. Їх виготовляють із сталі з антикорозійним покриттям, нержавіючої сталі, латуні, фосфористої бронзи та інших матеріалів.

Типовий фільтр для грубого очищення робочих рідин з гладкою металевою сіткою показано на рис. 2.

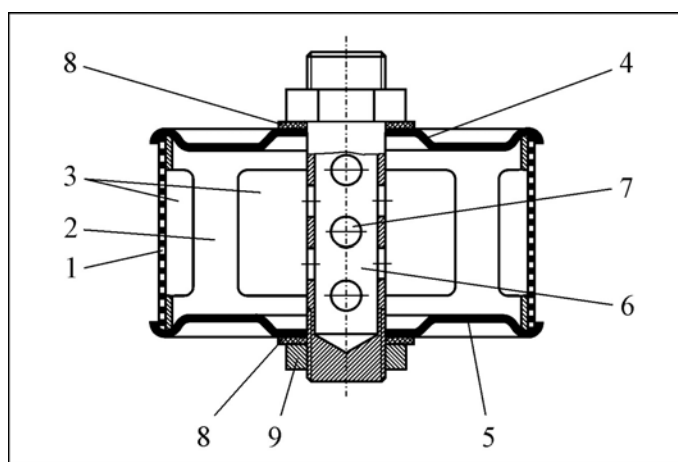


Рисунок 2 – Конструктивні елементи типового фільтра грубого очищення робочих рідин фільтрувальним елементом із металевої сітки шляхом всмоктування

Джерело: розроблено авторами

Фільтр складається із наступних деталей:

- фільтрувального елемента 1 із плоскої металевої сітки з квадратним вічком та з циліндричною робочою поверхнею;
- кільцевої опори 2 із листової сталі, яку виконано з вікнами 3;
- верхньої 4 та нижньої 5 кришки;
- центрального порожнього патрубку 6 з отворами 7;
- двох ущільнювальних шайб 8;
- гайки 9 для складання всього вузла.

Однак, для утворення циліндричної робочої поверхні фільтрувального елемента, плоску штабу металевої сітки не тільки вигинають, але й з'єднують її кінці за допомогою додаткових деталей або паянням припоями. Це здорожує виготовлення фільтрувального елемента. Крім того, для збільшення продуктивності рідини, що прокачується крізь фільтр, необхідність збільшення площі фільтрувального елемента може суттєво збільшити габарити фільтра. Останнє обмежує область його використання.

Постановка завдання. Як бачимо, усі недосконалості даного фільтра грубого очищення пов'язані з тим, що його фільтрувальний елемент має тільки одну робочу

поверхню (циліндричну). Тому подальше удосконалення фільтра спрямоване на розробку фільтрувального елемента з додатковою робочою поверхнею.

Метою дослідження є зменшення вартості виготовлення та розширення області використання фільтра.

Для досягнення поставленої мети необхідно запропонувати новий фільтр грубого очищення робочих рідин фільтрувальним елементом із металеві сітки із квадратним вічком з додатковою робочою поверхнею.

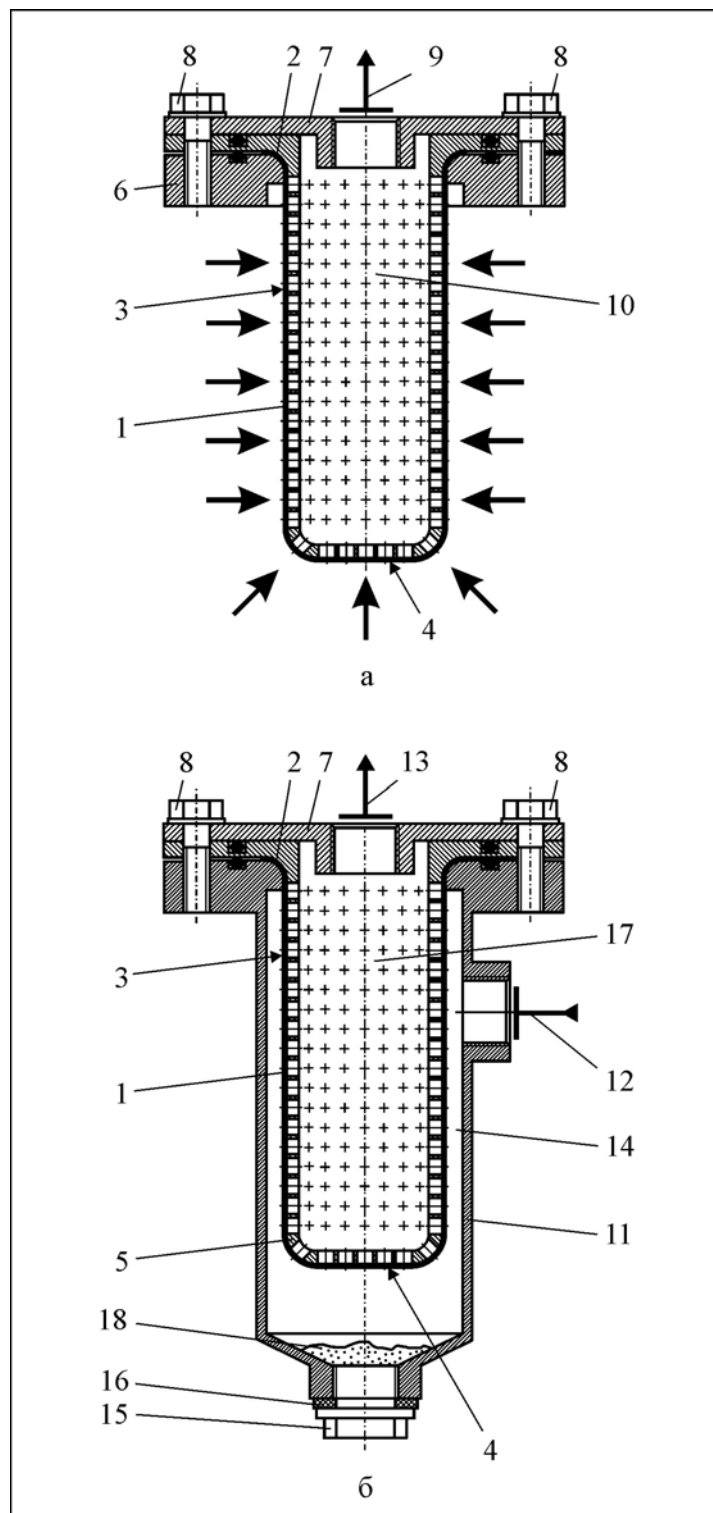
Виклад основного матеріалу. У новому фільтрі грубого очищення рідин (рис. 3), що пропонується, фільтрувальний елемент 1 виконано із плоскої металеві сітки із квадратним вічком методом холодного багатоопераційного витягування. Із усіх відомих металевих сіток тільки сітки з квадратним вічком піддаються такому виду деформування, тобто не рвуться. Після витягування фільтрувальний елемент 1 набуває форму циліндричного стакану з невеликим фланцем 2, який використовується для кріплення. Це достатньо жорстке об'ємне тіло, яке не має потреби в додатковому з'єднанні його елементів. Даний фільтрувальний елемент 1, порівняно з відомим, має не тільки бічну 3, але і донну 4 робочу поверхню, що підвищує його пропускну здатність і дозволяє зробити його більш компактним. Фільтрувальний елемент 1 щільно одягається на перфоровану опору 5, що не дозволяє сітці вигинатись під дією тиску рідини, яка очищається.

Фільтр може використовуватися для режиму роботи, коли рідина всмоктується в фільтр (рис. 3, а). Тоді фільтрувальний елемент 1 затискується у фланці 2 між кільцем 6 та перфорованою опорою 5 разом з кришкою 7 за допомогою болтів 8. Патрубок 9 очищеної рідини з'єднується із всмоктувальним патрубком насоса (на кресленні не показано). Для роботи фільтр занурюється в рідину бака. При вмиканні насоса у внутрішній порожнині 10 фільтрувального елемента 1 тиск падає, внаслідок чого очищена рідина із бака всмоктується в фільтр, а частки бруду, розміри яких більші розміру вічка сітки, залишаються зовні фільтрувального елемента 1. Для різних умов розташування фільтра в баку, фільтрувальний елемент 1 може бути виконано:

– великого зовнішнього діаметра та малої висоти. Це зручно при низьких баках. В цьому випадку основною робочою поверхнею є донна поверхня 4. Саме вона забезпечує максимальну компактність фільтрувального елемента 1;

- малого зовнішнього діаметра та великої висоти. Це зручно при високих баках. В цьому випадку основною робочою поверхнею є бічна поверхня 3.

Фільтр може використовуватися для режиму роботи, коли рідина нагнітається в фільтр (рис. 3,б). Для створення тиску навколо фільтрувального елемента 1 організовується корпус 11 з патрубком 12. Тоді фільтрувальний елемент 1 затискується у фланці 2 між корпусом 11 та перфорованою опорою 5 разом з кришкою 7 за допомогою болтів 8. Патрубок 13 очищеної рідини з'єднується з баком (на кресленні не показано), де вона зберігається. При вмиканні насоса (на кресленні не показано) рідина через патрубок 12 подається в порожнину 14 між корпусом 11 та фільтрувальним елементом 1. При цьому корпус 11 з низу герметично закритий пробкою 15 з ущільненням 16. В порожнині 14 створюється тиск, внаслідок чого рідина проходить крізь фільтрувальний елемент 1 в його внутрішню порожнину 17, очищається і далі вилучається із фільтра через патрубок 13. Частки бруду 18, розміри яких більші розміру вічка сітки, залишаються зовні фільтрувального елемента 1, накопичуються внизу корпусу 11 та періодично вилучаються із нього через отвір під пробку 15.



а – для режиму роботи, коли рідина всмоктується в фільтр;
 б – для режиму роботи, коли рідина нагнітається в фільтр

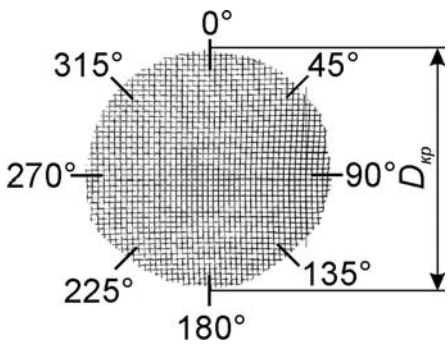
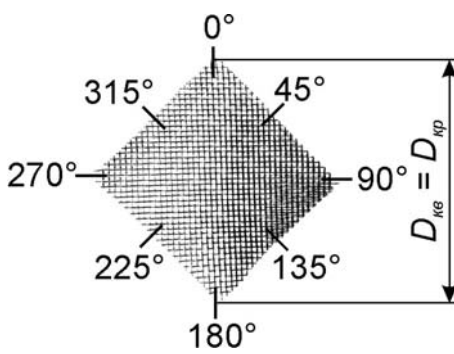
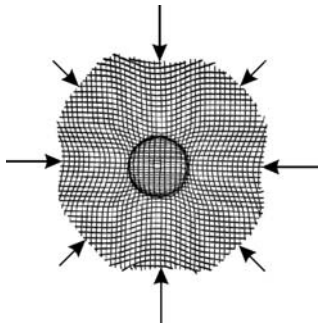
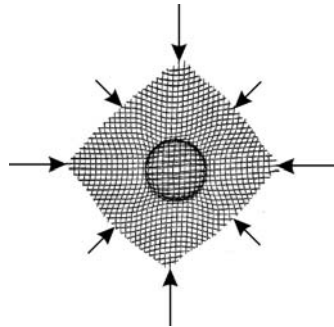
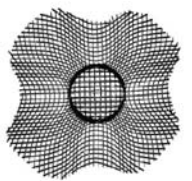
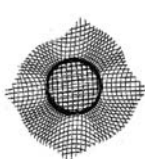
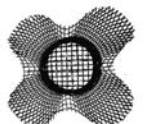
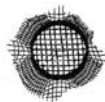
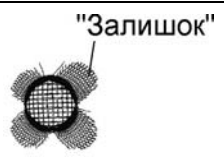

Рисунок 3 – Фільтр грубого очищення рідин фільтрувальним елементом із металевої сітки із квадратним вічком

Джерело: розроблено авторами

Слід відмітити, що спроба виготовити фільтрувальний елемент із металевої сітки із квадратним вічком за формою циліндричного стакана методом витягування робилася

раніше, але вона була невдалою. Звичайно витягування циліндричної деталі із суцільної листової сталі здійснюється із круглої вихідної заготовки [10, с. 57, рис. 3.32]. Але при застосуванні круглої вихідної заготовки із металевої сітки спостерігається ефект утворення в процесі витягування чотирьох «залишків» в напрямку діагоналей її вічка (табл. 1, фрагменти 1.1-1.5).



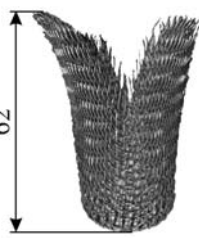
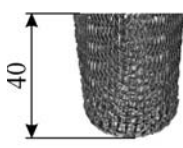
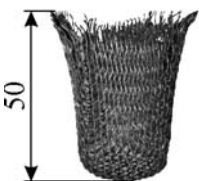
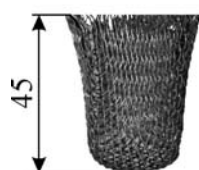
Таблиця 1 – Зміна форми фланця циліндричного стакана при різних висотах витягування

| Висота стакана h , мм | Форма фланця | |
|--------------------------|--|--|
| | Кругла заготовка із сітки | Квадратна заготовка із сітки |
| 0 (вихідна заготовка) | 1.1  | 2.1  |
| 10 | 1.2  | 2.2  |
| 20 | 1.3  | 2.3  |
| 30 | 1.4  | 2.4  |
| 40 | 1.5  | 2.5  |

Джерело: розроблено авторами

При подальшому витягуванні дані «залишки» переходять із поверхні фланця на бічну циліндричну поверхню та підлягають обрізуванню (табл.2, фрагменти 2.1, 2.2).

Таблиця 2 – Циліндричні стакани з різною формою вихідних заготовок при граничних висотах витягування h_2

| Вихідна заготовка | | Циліндричні стакани при $h = h_2$ | |
|--|---------------------|--|--|
| Матеріал | Поверхня, форма | Не обрізана торцева частина | Обрізана торцева частина |
| Сталь 08кп (лист, стрічка) | Плоска кругла | 1.1  | 1.2  |
| Металева сітка з нержавіючої сталі 12X18Н10Т (лист) | Плоска кругла | 2.1  | 2.2  |
| Металева сітка з нержавіючої сталі 12X18Н10Т (лист) | Плоска квадратна | 3.1  | 3.2  |

Джерело: розроблено авторами

Як бачимо, 35 % матеріалу за висотою стакана підлягає обрізуванню, що з економічної точки зору не доцільно.

Аналіз причини утворення «залишку» показав, що характер витягування металевої сітки суттєво відрізняється від характеру витягування суцільної листової сталі. При витягуванні суцільної листової сталі має місце пластична деформація, яка перерозподіляє матеріал плоскої заготовки в об'ємну, а при витягуванні металевої сітки відбувається гнуття кожного дроту сітки, яке супроводжується деформацією вічок сітки на бічній поверхні. Квадратне вічко на бічній поверхні набуває форму ромба. Сумарне збільшення діагоналей ромбів приводить до інтенсивного зростання висоти ковпачка у чотирьох точках краю витягнутого ковпачка, тобто до утворення чотирьох «залишків».

Дані «залишки» можна скасувати, якщо змінити форму вихідної заготовки з круглої на квадратну (табл. 1, фрагменти 2.1-2.5). При цьому додатково зменшується площа вихідної заготовки. В процесі витягування стакана із металевої сітки з квадратним вічком край заготовки формується більш рівномірно за висотою, тому обрізуванню підлягає не більше 10 % висоти стакана.

В запропонованому фільтрі фільтрувальний елемент із металевої сітки із квадратним вічком витягується із квадратної вихідної заготовки.

Висновки. Запропоновано новий фільтр грубого очищення робочих рідин фільтрувальним елементом із металевої сітки із квадратним вічком та технологія виготовлення фільтрувального елемента. Показано, що використання фільтра дозволяє зменшити вартість його виготовлення за рахунок спрощення технології виготовлення фільтрувального елемента, а також розширити область використання фільтра за рахунок наявності у фільтрувальному елементі не тільки бічної, але і донної робочої поверхні. Останнє підвищує його пропускну здатність і робить його більш компактним.

Список літератури

1. Миронюк О., Шевчук В., Паславський Р. Дослідження двоступінчатого фільтра тонкої очистки дизельного пального. *Вісник Львівського національного екологічного університету*. Сер. Агроінженерні дослідження. 2021. Вип. 25. С.49–56. URL: <https://doi.org/10.31734/agroengineering2021.25.049>
2. Paryanto, I.; Budianta, I.A.; Alifia, K.C.H.; Hidayatullah, I.M.; Darmawan, M.A.; Judistira; Prakoso, T.; Indarto, A.; Gozan, M. Modelling of Fuel Filter Clogging of B20 Fuel Based on the Precipitate Measurement and Filter Blocking Test. *ChemEngineering* 2022, 6, 84. URL: <https://doi.org/10.3390/chemengineering6060084>
3. Stone, W., Bessee, G., and Stanfel, C., "Diesel Fuel/Water Separation Test Methods—Where We Are and Where We Are Going," *SAE Int. J. Fuels Lubr.* 2(1):317-323, 2009, <https://doi.org/10.4271/2009-01-0875>.
4. Рязанцев Р. Ю. Гідравліка, гідро – та пневмоприводи: Навч. посіб.. Бар : Барський фаховий коледж транспорту та будівництва НТУ, 2022, 140 с.
5. Очисні споруди водопостачання. Цифрової репозиторій ХНУГХ ім. А.Н. Бекетова : веб-сайт. URL: https://eprints.kname.edu.ua/42467/1/2014%2040%D0%9B%20%D1%80%D0%B5%D0%BF%D0%BE%D0%B7%20%D0%92%D0%92%20_%D0%A0%D0%92%D0%92%D0%A0_.pdf (дата звернення: 12.10.2024).
6. Паливо-мастильні матеріали, технічні рідини та системи їх забезпечення / за ред. В. Я. Чабанного. Кіровоград : Центрально-Українське видавництво, 2008. 500 с.
7. Боков В. М. Фізичні процеси спецтехнологій. Експериментальні дослідження. Збірник статей: навчальний посібник . Кропивницький : ПП «Ексклюзив-Систем», 2022, 625 с.
8. Боков В. М. Технологія розмірної обробки дугою. Історичний нарис, верстати: навчальний посібник . Кропивницький : ПП «Ексклюзив-Систем», 2020, 316 с.
9. Сітки: класифікація, технічні характеристики та способи застосування. Prometr : веб-сайт. URL: <https://prometr.com.ua/stroitelstvo/s-tki-klasif-kac-ya-tehn-chn-harakteristiki-ta-sposobi-zastosuvannya/> (дата звернення: 16.10.2024).
10. Боков В. М. Технологія холодного штампування: підручник . Кропивницький: ПП «Ексклюзив-Систем», 2021, 213 с.

References

1. Myroniuk, O., Shevchuk, V., & Paslavskiy, R. (2021). *Research on a two-stage fine filter for diesel fuel*. *Visnyk Lvivskoho natsionalnoho ekolohichnoho universytetu*. Ser. Ahroinzhenerni doslidzhennia. 25. 49–56 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31734/agroengineering2021.25.049>
2. Paryanto, I.; Budianta, I.A.; Alifia, K.C.H.; Hidayatullah, I.M.; Darmawan, M.A.; Judistira; Prakoso, T.; Indarto, A.; & Gozan, M. (2022). *Modelling of Fuel Filter Clogging of B20 Fuel Based on the Precipitate Measurement and Filter Blocking Test*. *ChemEngineering*, 6, 84. <https://doi.org/10.3390/chemengineering6060084>
3. Stone, W., Bessee, G., & Stanfel, C., (2009). "Diesel Fuel/Water Separation Test Methods—Where We Are and Where We Are Going," *SAE Int. J. Fuels Lubr.* 2(1):317-323. <https://doi.org/10.4271/2009-01-0875>.
4. Ryazantsev, R.Yu. (2022). *Hydraulics, hydro and pneumatic drives*. Bar : Bar Vocational College of Transport and Construction NTU [in Ukrainian].
5. *Water treatment plants*. Tsyfrovoi repozytoryi KhNUHKh ym. A. N. Beketova : Retrieved from https://eprints.kname.edu.ua/42467/1/2014%2040%D0%9B%20%D1%80%D0%B5%D0%BF%D0%BE%D0%B7%20%D0%92%D0%92%20_%D0%A0%D0%92%D0%92%D0%A0_.pdf
6. Chabannyyi, V.Ia. (Ed.). (2008). *Fuels and lubricants, technical fluids and their supply systems*. Kirovohrad: Tsentralno-Ukrainske vydavnytstvo [in Ukrainian].

7. Bokov, V.M. (2022). *Physical processes of special technologies. Experimental research*. Kropyvnytskyi: PP «Ekskliuzyv-System» [in Ukrainian].
8. Bokov, V.M. *Tekhnolohiia rozmirnoi obrobky duhoiu. Istorychnyi narys, verstaty*. Kropyvnytskyi: PP «Ekskliuzyv-System» [in Ukrainian].
9. *Grids: classification, technical characteristics and methods of application*. Prometr. Retrieved from <https://prometr.com.ua/stroitelstvo/s-ty-klasif-kac-ya-tehn-chn-harakteristiki-ta-sposobizastosuvannya/>
10. Bokov, V.M. (2021). *Cold stamping technology*. Kropyvnytskyi: PP «Ekskliuzyv-System» [in Ukrainian].

Oleh Sisa, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Volodymyr Mirzak**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleh Kyslun**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Denys Tupalenko**, post-graduate

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Improvement of a Coarse Filtration System for Working Fluids with a Metal Mesh Filter Element

For normal operation of mechanisms and machines using various working fluids, the size of mechanical particles in it must be smaller than the gap in the moving pairs or the holes in the nozzles. In this regard, the working fluids are pre-filtered. Usually, two-stage filtration is used: first, coarse cleaning, and then fine cleaning. This work is devoted to improving the coarse cleaning system.

There are known coarse cleaning filters in which the liquid is cleaned due to sludge. They are large-volume tanks with partitions. This circumstance sharply limits the scope of use of these filters. Mesh filters are of certain practical interest for coarse cleaning of working fluids, as they are more compact and convenient to use. For coarse cleaning of working fluids, only square-weave metal meshes are used, that is, metal meshes with a square mesh. To form a cylindrical working surface of the filter element, the flat metal mesh is not only bent, but also its ends are connected using additional parts or soldering. This increases the cost of manufacturing the filter element. In addition, to increase the productivity of the liquid pumped through the filter, the need to increase the area of the filter element can significantly increase the dimensions of the filter. The latter limits the scope of its use. As we can see, all the imperfections of this coarse filter are associated with the fact that its filter element has only one working surface (cylindrical). Therefore, further improvement of the filter is aimed at developing a filter element with an additional working surface.

The purpose of the study is to reduce the cost of manufacturing and expand the scope of use of the filter. In the proposed new coarse liquid filter, the filter element is made of a flat metal mesh with a square mesh by the method of cold multi-operation drawing. Of all known metal meshes, only meshes with a square mesh are subject to this type of deformation, i.e. do not tear. After stretching, the filter element takes the form of a cylindrical cup with a small flange, which is used for fastening. An original technology for stretching a filter element from a square blank is proposed. This filter element, compared to the known one, has not only a side, but also a bottom working surface. The filter element is tightly put on a perforated support, which does not allow the mesh to bend under the pressure of the liquid being cleaned. The use of this filter allows you to reduce the cost of its manufacture by simplifying the technology for manufacturing the filter element, as well as expand the area of use of the filter due to the presence of not only a side, but also a bottom working surface in the filter element. The latter increases its throughput and makes it more compact.

coarse filter, filter element, metal mesh with square weave, working surface, drawing

Одержано (Received) 06.11. 2024

Прорецензовано (Reviewed) 09.12.2024

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2024

УДК 621.891

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.47-54](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.47-54)**А.Б. Гупка**, доц., канд. техн. наук*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна***В.В. Аулін**, проф., д-р техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна***Г.Б. Цьонь**, канд. техн. наук., ст. викладач, **В.М. Буховець**, доц., канд. техн. наук,**Т.Б. Пиндус**, асист.*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна**e-mail: Gupkab@gmail.com*

Оцінка величини і характеру зношування зірочок ланцюгових передач сільськогосподарських машин

У статті досліджено процес зношування зірочок ланцюгових передач бурякозбиральних машин, зокрема механізму викопування та очищення буряків. Встановлено, що основною причиною інтенсивного зношування зірочок є вплив абразивних частинок. Проаналізовано результати комплексних випробувань та визначено основні статистичні характеристики процесу зношування зірочок. Запропоновано використання розподілу Вейбулла-Гнеденка для опису закону розподілу експлуатаційного ресурсу зірочок. Обгрунтовано можливі шляхи підвищення ресурсу зірочок, зокрема впровадження зміцнювальних технологій та заходів щодо зниження впливу абразиву.

зношування, абразивні частинки, ресурс машин, ланцюгові передачі, зірочки

Постановка проблеми. Ланцюгові передачі широко застосовуються в трансмісіях бурякозбиральних машин, проте їх основним недоліком є інтенсивне зношування зірочок через вплив абразивних частинок, що призводить до зниження ресурсу роботи механізмів. Найбільшого зношування зазнають зірочки викопувально-очисного механізму, оскільки вони працюють у найбільш забрудненому середовищі. Відсутність ефективних методів прогнозування та зменшення зношування ускладнює подовження терміну служби цих деталей та підвищення надійності всієї машини [1,2]. Тому актуальним є дослідження закономірностей процесу зношування зірочок, розробка методів оцінки їх ресурсу та визначення заходів щодо підвищення зносостійкості для забезпечення більшої довговічності техніки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема зношування зірочок ланцюгових передач у сільськогосподарській техніці, є актуальною темою досліджень. Основними причинами втрати працездатності ланцюгових передач є знос шарнірів ланцюга, що призводить до подовження ланцюга та порушення його взаємодії із зірочками, а також знос зубів зірочок [3,4]. Для відновлення зношених зубів застосовують методи наплавлення спеціальними електродами або комбінованими шарами, що дозволяє продовжити термін служби даних деталей [5-7].

Важливим аспектом є правильний вибір конструктивних параметрів та способів виготовлення зірочок для ланцюгових передач. Зірочки можуть виготовлятися з різних матеріалів, таких як конструкційна вуглецева сталь марки 45, технічна нержавіюча сталь або чавун. Залежно від умов експлуатації та вимог замовника, зірочки можуть мати різні конструкційні особливості, включаючи наявність маточини, загартовані зуби або бути багатозубними. Правильний вибір та виготовлення зірочок сприяють підвищенню їх зносостійкості та експлуатаційної надійності [8-10].

Сучасні дослідження та публікації зосереджені на вивченні причин зношування зірочок ланцюгових передач, розробці методів їх відновлення та підвищення

зносостійкості, а також на оптимізації вибору матеріалів і конструкційних особливостей зірочок для забезпечення надійної та тривалої роботи сільськогосподарської техніки [11,12].

Постановка завдання. Метою даної роботи є дослідження закономірностей зношування зірочок ланцюгових передач бурякозбиральних машин, оцінка їх довговічності та розробка рекомендацій щодо підвищення зносостійкості. Для досягнення цієї мети аналізуються результати експериментальних випробувань, встановлюються статистичні характеристики зношування та моделюється розподіл ресурсу зірочок. Також розглядаються можливі методи зменшення інтенсивності зношування, зокрема шляхом використання нових матеріалів, впровадженням зміцнювальних технологій та оптимізацією експлуатаційних умов.

Виклад основного матеріалу. Ланцюгові передачі є невід'ємною складовою трансмісії сільськогосподарської техніки, зокрема машин для збирання коренеплодів. Основним недоліком цих передач є інтенсивне абразивне зношування зубців зірочок, що зумовлено потраплянням частинок ґрунту та інших твердих включень у робочу зону [1,8]. Особливо високі рівні зношування спостерігаються у викопувально-очисних механізмах, які працюють в умовах підвищеного запилення та постійного механічного контакту з ґрунтом і рослинними залишками.

Значний вплив на інтенсивність зношування має матеріал виготовлення зірочок, методи їх термообробки та умови експлуатації [9-11]. У сільськогосподарських машинах найбільша ступінь зношування зірочок зафіксована саме у вузлах, що взаємодіють із коренеплодами та ґрунтовими частинками. При цьому зміна робочого профілю зубців впливає на стабільність роботи передачі, викликаючи додаткові динамічні навантаження, вібрації що прискорюють процес руйнування деталей.

В загальному, швидкість зношування зубів зірочок в межах допустимих значень зношування змінюється по мірі збільшення тривалості роботи τ передачі і рівняння динаміки зношування має вигляд:

$$w = \left[\frac{a_n (1 + C_n \alpha) \sqrt{P}}{K_{zn}} \tau \right]^\beta, \quad (1)$$

де a_n – коефіцієнт інтенсивності зношування в середовищі технічно чистого повітря;

C_n – коефіцієнт, що враховує наявність пилу в повітрі біля передачі;

α – коефіцієнт відносної абразивності пилу, $\alpha=3\dots 8$;

P – колове зусилля;

K_{zn} – коефіцієнт відносної зносостійкості матеріалу вінця зірочки;

τ – час випробування;

β - степінь, що характеризує інтенсивність зношування, $\beta = 2/3$.

В процесі роботи зірочки в залежності від конкретних умов експлуатації параметри C_n , α , P , а також K_{zn} , змінюються в певних межах і можуть бути оцінені статистичними показниками.

Дослідження процесу зношування проводилось на основі аналізу даних періодичних випробувань бурякозбиральних машин. У ході досліджень зафіксовані значення зношування зубців зірочок після 165 годин роботи, які варіювалися у межах від 0,10 мм до 0,76 мм. Загальний розмах зношування склав $R_w = w_{max} - w_{min} = 0,66$ мм. Середнє арифметичне значення зношування склало $w_c = 0,4$ мм, середньоквадратичне відхилення становило $\sigma_w = 0,176$ мм, а коефіцієнт варіації – $v_w = \sigma_w / w_c = 0,44$.

Аналіз отриманих даних дозволив побудувати гістограму розподілу величини зношування зірочки, яка була розділена на шість груп із кроком $\Delta w = R_w / 6 = 0,11$ мм мм.

Встановлено, що найкращу апроксимацію отриманих статистичних даних забезпечує розподіл Вейбулла-Гнеденка, що підтверджується χ^2 - критерієм Пірсона. Це дає змогу більш точно прогнозувати зміну ресурсу зірочок залежно від умов їх експлуатації. Розподіл Вейбулла-Гнеденка ресурсу t зірок ланцюгової передачі сільськогосподарської машини має вигляд:

$$f(t) = b/a \cdot (t/a)^{b-1} e^{-(t/a)^b} \quad (2)$$

Коефіцієнти функції щільності розподілу зношування (2) відповідно становлять $b_w=2,42$; $a_w=0,45$. Графік зміни функції $f(t)$, узгоджений з масштабом гістограми, (рис. 1.)

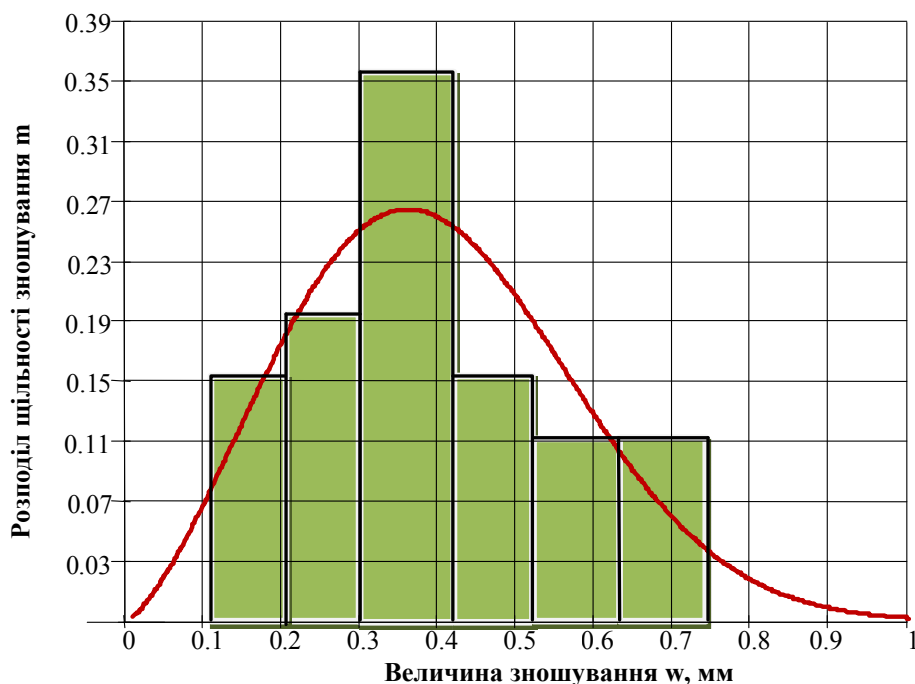


Рисунок 1 – Гістограма величини зношування зірочок та крива розподілу щільності зношування

Джерело: розроблено авторами

Правомірність використання вказаного розподілу наочно підтверджується відповідністю функцій ймовірності розподілу зірочок за величиною їх зношування для обох випадків (рис. 2).

Оскільки параметри роботи ланцюгової передачі змінюються в широких межах, оцінити вплив окремих факторів на зношування без додаткового моделювання складно. Водночас застосування статистичних методів дозволяє визначити середню швидкість зношування за період напрацювання $t = 160$ год становить $v_w = 0,0025$ мм/год, розмах $R_v = 0,0041$ мм/год, середньо-квадратичне відхилення швидкості зношування $\sigma_v = 0,0014$. Враховуючи закономірність динаміки зношування, термін служби зірочок T_d за даними випробувань базової поверхні (часом випробування τ_i) зв'язаний залежністю:

$$\frac{T_d}{\tau_i} = \left(\frac{w_n}{w_i} \right)^{1/\beta}, \quad (3)$$

де w_n - граничне зношування робочої поверхні зубів зірочки.

Застосування статистичних методів аналізу дозволяє змодельовати ресурс роботи зірочок методом Монте-Карло. Отримані результати показали, що середній ресурс експлуатації зірочок становить 444,4 год, при середньоквадратичному відхиленні 264,4 год, а коефіцієнт варіації $v_T = 0,53$.

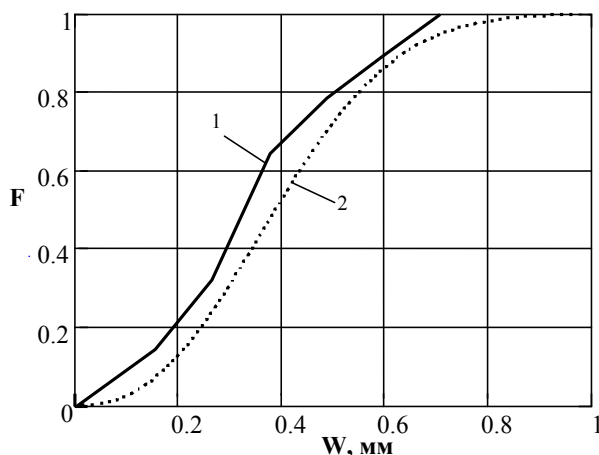


Рисунок 2 - Розподіл ймовірності зірочок за величиною зношування, відповідно, для досліджуваної вибірки (1) та за залежністю (2)

Джерело: розроблено авторами

Очікуваний розподіл ресурсу роботи зірочки можна вирівняти кривою розподілу Вейбулла-Гнеденка із параметрами $b_m=2$; $a_m=499,7$.

Розмах часу роботи зірочки за статистичною оцінкою величини зношування в першому наближенні можна визначити за залежністю

$$R_T = T_{\partial \max} - T_{\partial \min} = \tau w_{zp}^{1/\beta} \left(\frac{1}{w_{\min}^{1/\beta}} - \frac{1}{w_{\max}^{1/\beta}} \right), \quad (4)$$

де w_{\min} та w_{\max} – відповідно мінімальна та максимальна величина зношування зірочок за даними спостережень;

w_{zp} - гранична величина зношування;

Графічне відображення функції розподілу щільності зношування для випадку абразивного зношування зірочки ланцюгової передачі бурякозбирального комбайну наведено на рис. 3.



Рисунок 3 - Крива розподілу часу напрацювання зірочки до досягнення граничного зношування

Джерело: розроблено авторами

Для підвищення довговічності зірочок у складі ланцюгових передач запропоновано впровадження сучасних зміцнювальних технологій. Зокрема, ефективними методами підвищення зносостійкості є вібраційне накатування профілю зубців, лазерне або плазмове загартування робочої поверхні, а також застосування композитних матеріалів при виготовленні деталей [1]. Крім того, важливими заходами щодо зменшення інтенсивності зношування є вдосконалення системи змащення, використання захисних кожухів для мінімізації впливу абразивних частинок та оптимізація профілю зубців, що сприяє зниженню питомого навантаження.

Результати проведених досліджень підтверджують, що комплексний підхід до вибору матеріалів, методів термообробки та оптимізації експлуатаційних умов дозволяє значно зменшити інтенсивність зношування деталей ланцюгових передач, що сприяє підвищенню експлуатаційної надійності та збільшенню терміну строку служби сільськогосподарської техніки.

Аналіз випробувань засвідчив реальні можливості суттєвого покращення ресурсу роботи зірочок і ланцюгових передач загалом, зокрема у виконувально-очисних механізмах бурякозбиральних машин та аналогічних вузлах сільськогосподарської техніки. Практичний досвід доводить, що завдяки підвищенню технологічної дисципліни, суворому дотриманню технічних вимог механічної та термічної обробки зірочок, а також стабілізації параметрів зносостійкості матеріалів можна досягти зниження середньої величини зношування зірочок на 5–10%, при цьому зменшуючи його середньоквадратичне відхилення на 7–15%.

Застосування зміцнювальних технологій, зокрема вібраційного накатування поверхні профілю зубців, дозволяє суттєво зменшити середню величину зношування зірочок на 40–60%. Це відкриває перспективи значного збільшення терміну служби ланцюгових передач, що є особливо актуальним для інтенсивно навантажених механізмів сучасної сільськогосподарської техніки.

Мінімальний термін служби зірочок визначаємо за результатами випробувань. Оскільки за період напрацювання $t = 60$ год, максимальне зношування зірочок становило $W_{\max} = 0,76$ мм, то

$$T_g^{\min} = t \left(\frac{W_{cp}}{W_i} \right)^{\frac{1}{\beta}} = 241,5 \text{ год.}$$

Довірча ймовірність розсіювання значення мінімального терміну служби визначається квантиллю розподілу Вейбулла-Гнеденка:

$$\frac{H}{2}(\alpha) = \frac{C_{em} T_g^{\min}}{v_m T_g}, \quad (5)$$

де $C_{em} = 0,46$ – параметр розподілу терміну служби зірочки із заданим коефіцієнтом варіації $v_m = 0,53$.

Відповідно довірча ймовірність розсіювання α становить 20%.

Аналіз отриманих результатів свідчить, що середній ресурс роботи зірочок до досягнення граничного зношування становить приблизно третину від загального терміну їхньої служби, який коливається в межах 1200–1500 мотогодин. Водночас мінімальний ресурс роботи є недостатнім, що створює значний ризик виходу зірочок із ладу безпосередньо в період збирання врожаю, що може призводити до простоїв техніки та зниження продуктивності сільськогосподарських машин.

Значний коефіцієнт варіації ресурсу свідчить про високу нерівномірність зношування зірочок, що зумовлено різними експлуатаційними факторами, зокрема режимами навантаження, якістю матеріалу, станом змащувальної системи та рівнем абразивного впливу. При цьому швидкість зношування визначається функціонально залежністю від сукупності зазначених факторів, що потребує детальшого аналізу для розробки ефективних заходів щодо підвищення довговічності даних деталей:

$$V_w = \frac{dW}{d\tau} = \frac{\beta K_v P^2}{\tau^{1-\beta}}, \quad (6)$$

де $K_v = \left[\frac{a_n(1 + C_n \alpha)}{K_{zn}} \right]^\beta$ – коефіцієнт швидкості зношування.

Для випадку відкритих ланцюгів передач швидкість зношування зірочок дорівнює:

$$V_w = \frac{2}{3} K_v \sqrt[3]{\frac{P}{\tau}}. \quad (7)$$

Крім цього впровадження простих та ефективних конструкцій протипилового захисту ланцюгових передач та їх надійного змащення в період експлуатації за попередніми розрахунками дозволяє збільшити ресурс роботи зірочок і ланцюгів у 3...4 рази, а γ -відсоткове напрацювання ($\gamma=10$) - у 5...8 раз.

Техніко-економічний ефект від зменшення зношування зірочок проявляється не тільки в підвищенні ресурсу їх роботи, але й в суттєвому зменшенні динамічних навантажень в приводі і підвищенню експлуатаційної надійності всієї машини в цілому.

Висновки:

1. Аналіз процесу зношування зірочок ланцюгових передач бурякозбиральних машин підтвердив значний вплив абразивних частинок, що потрапляють у зону контакту зубців із ланцюгом, спричиняючи нерівномірне зношування та зменшення ресурсу роботи.

2. Середній ресурс роботи зірочок до досягнення граничного зношування становить близько 1200–1500 мотогодин, що відповідає приблизно третині загального терміну служби. Водночас мінімальний ресурс є недостатнім і створює ризик передчасного виходу зірочок із ладу під час експлуатації.

3. Результати випробувань показали значний коефіцієнт варіації ресурсу, що свідчить про високу нерівномірність зношування зірочок залежно від експлуатаційних умов, зокрема навантаження, абразивного середовища та якості матеріалів.

4. Застосування зміцнювальних технологій, таких як вібраційне накатування, лазерне або плазмове загартування, а також використання композитних матеріалів, дозволяє зменшити середню величину зношування зірочок на 40–60%, що значно продовжує термін їх експлуатації.

5. Вдосконалення системи змащення та застосування протипилових кожухів дає можливість збільшити ресурс зірочок і ланцюгів у 3–4 рази, а зменшення динамічних навантажень у приводі сприяє підвищенню довговічності всієї машини.

6. Використання методів прогнозування ресурсу, зокрема моделювання за розподілом Вейбулла-Гнеденка, дозволяє точніше оцінити тривалість роботи зірочок залежно від умов експлуатації, що є важливим для технічного обслуговування, ремонту та планування заміни деталей.

7. Зниження зношування зрічок сприяє не лише підвищенню їхнього ресурсу, а й покращенню надійності всієї бурякозбиральної техніки, що позитивно впливає на продуктивність та економічну ефективність її використання

Список літератури

1. Аулін В. В. Трибофізичні основи підвищення зносостійкості деталей та робочих органів сільськогосподарської техніки : Дисертація д-ра техн. наук: 05.02.04. Хмельницький, 2015. 360 с.
2. Аулін В.В., Бобрицький В.М. До проблеми видів та природи зношування робочих органів машин, що працюють з ґрунтами Матеріали II наукової конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки», (Миколаїв 22-24 жовтня 2012 р.) Миколаїв: НУК. С. 88-89.
3. Прасолов Є. Я., Лапенко Т. Г., Бондаренко О. Ю. Підвищення стійкості деталей проти зношування двигунів сільськогосподарської техніки. Вісник Полтавської державної аграрної академії. 2014. № 4. С. 95–101.
4. Гевко Р. Б., Ткаченко І. Г., Синій С. В. та ін. Напрямки вдосконалення бурякозбиральної техніки. Луцьк: ЛДТУ, 1999. 168 с.
5. Денисенко М.І., Зазимко О.В., Лабунець В.Ф. Дослідження поверхонь тертя робочих органів ґрунтобробних сільськогосподарських машин. Проблеми тертя та зношування. 2016. № 1 (70). С. 150-153.
6. Dvoruk V. I., Borak K. V., Buchko I. A. Destruction of Steel, by the Work-Hardened Speed Electrothermal Treatment at Wear by Friction of Skidding at the Non-Rigid Envisaged Abrasive // Journal of Friction and Wear, 2022, Vol. 43, No. 3, pp. 255–264
7. Dvoruk V. I., Borak K. V., Buchko I. A., and N. A. Kirienko N. A. Influence of Soil Type on Breaking of Low-Alloy Steels during Wear // Journal of Friction and Wear, 2022, Vol. 43, No. 6, pp. 383–390
8. В.І. Дворук, М.В. Кіндрачук, О.В. Герасимова. Визначення поверхневої енергії металів при абразивному зношуванні. Фізика і хімія твердого тіла. 2006. Т.7, № 3. С. 560 – 563.
9. Вишневецький О. А., Давидов О. С. Вплив деформації та площі поверхні тертя на процес зношування. Системи озброєння і військова техніка. 2023. № 2 (74). С. 68-71.
10. Rogovskii I. L., Titova L. L., Trokhaniak V. I., Haponenko O. I., Ohienko 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. DOI: 10.35633/INMATEH-60-05.
11. Роговський І. Л. Алгоритмічність визначення періодичності відновлення працездатності сільськогосподарських машин за ступенем витрат їх ресурсу. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 2020. Vol. 11. No 1. P. 155-162. DOI: 10.31548/machenergy.2020.01.155-162.
12. Аулін, В. В., Ляшук, О. Л., Гупка, А. Б., Лисенко, С. В., Гриньків, А. В. Фізична модель для виявлення впливу масштабного фактору на трибологічні процеси в зоні контакту зразків та деталей. Кропивницький. 2020. ЦНТУ, С. 16-18.

References

1. Aulin V. V. (2015). Tribophysical foundations of increasing the wear resistance of parts and working bodies of agricultural machinery: Dissertation of Dr. Tech. Sciences: 05.02.04. Khmelnytskyi, 360 p. [in Ukrainian]
2. Aulin V.V., & Bobrytskyi V.M. Do problemy vydiv ta pryrody znoshuvannia robochykh orhaniv mashyn, shcho pratsiuiut z hruntamy Materialy II naukovoї konferentsii «Aktualni problemy inzhenernoї mekhaniky», (Mykolaiv 22-24 zhovtnia 2012 r.) Mykolaiv: NUK. P. 88-89. [in Ukrainian]
3. Prasolov, E. Ya., Lapenko, T. G., & Bondarenko, O. Yu. (2014). Increasing the resistance of parts to wear of agricultural equipment engines. Scientific Progress & Innovations, (4), 95–101. <https://doi.org/10.31210/visnyk2014.04.17>[in Ukrainian]
4. Gevko R. B., Tkachenko I. G., Syniy S. V., etc. (1999). Directions for improving beet harvesting equipment. Lutsk: LDTU. 168 p. [in Ukrainian]
5. Denisenko M.I., Zazimko O.V., & Labunets V.F. (2016) Research of friction surfaces of working bodies of tillage agricultural machines. Problems of friction and wear.. No. 1 (70). P. 150-153. [in Ukrainian]
6. Dvoruk V. I., Borak K. V., & Buchko I. A. (2022) Destruction of Steel, by the Work-Hardened Speed Electrothermal Treatment at Wear by Friction of Skidding at the Non-Rigid Envisaged Abrasive // Journal of Friction and Wear, Vol. 43, No. 3, pp. 255–264 [in English]

7. Dvoruk V. I., Borak K. V., Buchko I. A., and N. A. & Kirienko N. A. (2022) Influence of Soil Type on Breaking of Low-Alloy Steels during Wear // Journal of Friction and Wear, Vol. 43, No. 6, pp. 383–390 [in English]
8. V.I. Dvoruk, M.V. Kindrachuk, & O.V. Gerasimova. (2006) Determination of the surface energy of metals during abrasive wear. Physics and Chemistry of Solids. Vol. 7, No. 3. P. 560 – 563. [in Ukrainian]
9. Vyshnevskiy O. A., & Davydov O. S. (2023) The influence of deformation and friction surface area on the wear process. Armament Systems and Military Equipment.. No. 2 (74). P. 68-71. [in Ukrainian]
10. 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. DOI: 10.35633/INMATEH-60-05. [in English]
11. Rogovsky I. L. (2020) Algorithmic determination of the periodicity of restoration of the working capacity of agricultural machines by the degree of their resource consumption. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine.. Vol. 11. No. 1. P. 155-162. DOI: 10.31548/machenergy.2020.01.155-162. [in Ukrainian]
12. Aulin, V. V., Liashuk, O. L., Hupka, A. B., Lysenko, S. V., Hrynkiv, A. V., Aulyn, V. V., & Hrynkiv, A. V. (2020). Fizychna model dlia vyivlennia vplyvu masshtabnoho faktor na trybolohichni protsesy v zoni kontaktu zrazkiv ta detalei. [in Ukrainian]

Andrii Gypka, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil Ukraine

Victor Aulin, Prof., DSc.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Ann Tson, PhD tech. sci., Senior Lecturer,

Valeriy Buhovets, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Tetyana Pyndus**, Assistant

Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil Ukraine

Assessment of the Magnitude and Nature of Wear of Sprockets of Chain Drives of Agricultural Machines

The article investigates the wear process of sprockets of chain drives of beet harvesters, in particular the mechanism for digging and cleaning beets. It was found that the main cause of intensive wear of sprockets is the influence of abrasive particles contained in the soil and plant residues. This leads to a change in the geometry of the sprocket teeth, disruption of interaction with the chain and, accordingly, a decrease in the operational resource of the transmission.

Based on experimental studies, an analysis of the statistical characteristics of the wear process was carried out, the average wear rate, the range of oscillations and the coefficient of variation were determined. To describe the wear patterns, the Weibull-Gnedenko distribution was used, which allows predicting the durability of sprockets depending on the operating conditions. In particular, it was found that the average service life of sprockets before reaching the limit of wear is about 1200–1500 engine hours, however, a significant coefficient of variation indicates uneven wear in different operating conditions.

The influence of materials and processing methods on the wear resistance of sprockets is considered. It was determined that the use of structural steels with hardened teeth significantly reduces the level of wear, and the use of special hardening technologies, such as vibration rolling, laser or plasma hardening, allows you to reduce the average wear rate by 40–60%. Measures to reduce the impact of abrasive particles are also proposed, in particular, improving the lubrication system and using protective covers to minimize dust and soil from entering the working area of the chain transmission.

The results of the research confirm that a comprehensive approach to increasing the wear resistance of chain transmission sprockets allows you to significantly improve their operational characteristics. The use of developed resource prediction methods, optimization of materials and the introduction of the latest hardening technologies can increase the service life of sprockets by 3–4 times, which directly affects the reliability and durability of agricultural machinery.

wear, abrasive particles, machine life, chain drives, sprockets

Одержано (Received) 11.11.2024

Процеженовано (Reviewed) 13.12.2024

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2024

О.Ю. Стібайло, асп.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна

e-mail: oleh.stibailo@gmail.com

Технологічні та конструктивні особливості виготовлення гвинтових елементів сільськогосподарської техніки

Проведено дослідження технологічних та конструктивних особливостей виготовлення гвинтових ножів-подрібнювачів та лопатей на шнекових спіралях сільськогосподарської техніки, які мають широке застосування у якості подрібнювачів, змішувачів, пресувальників, транспортерів, очисників, готувальників кормів тощо. Розроблено класифікацію гвинтових спіралей за способом виготовлення, напрямком руху, формою, профілем та функціональним призначенням. Запропоновано пристрої для виготовлення ножів-подрібнювачів та лопатей на гвинтовій заготовці. Обґрунтовано способи виготовлення лопатей та ножів-подрібнювачів на шнекових спіралях і визначено їх основні технологічні та конструктивні особливості. Також запропоновано раціональні конструктивно-технологічні параметри способів виготовлення лопатей і ножів-подрібнювачів на гвинтових спіралях

спосіб, технологія, технологічний процес, лопаті, ножі-подрібнювачі, оправка, ролик

Постановка проблеми. Розширення технологічних можливостей шнекових механізмів забезпечує збільшені спроможності їх застосування у різних галузях економіки. Це стосується сільськогосподарського виробництва, де вони найбільш широко застосовуються у якості гвинтових технологічних елементів сільськогосподарської техніки, а особливо при виробництві різних кормів для годівлі тварин і птиці [17, 19]. Враховуючи те, що значний відсоток виробничих витрат в загальній структурі продукції тваринництва припадає на частку приготування різних кормів з використанням коренеплодів [17], проблема їх виготовлення із використанням спеціальних транспортно-технологічних гвинтових елементів, які поєднують різноманітні операції, є особливо актуальною. Так, при використанні спеціальних гвинтових елементів, оснащених лопатями чи ножами, можна одночасно проводити подрібнення, змішування, пресування і транспортування, що особливо є важливим у сільськогосподарському виробництві. Тому розроблення нових способів виготовлення гвинтових елементів сільськогосподарської техніки оснащених лопатями і ножами-подрібнювачами є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розробці і дослідженню технологічних способів виготовлення різних типів шнекових спіралей присвячені праці вітчизняних і закордонних науковців [1-12, 14-16, 18-20]. Свою увагу вони концентрували на специфіці отримання шнекових спіралей різними типами технологічних процесів, зокрема навиванням, штампуванням, розгинанням і зварюванням окремих витків спіралі, прокатуванням тощо. Значна кількість праць присвячена специфіці виготовлення нестандартних гвинтових елементів, зокрема лопатевих, гофрованих, Г-подібних, U-подібних, з еластичними поверхнями та інших [3, 5, 7, 8, 11, 12, 14, 20].

При виготовленні шнекових спіралей чільна увага приділялась забезпеченню технологічності їх конструкцій і конструктивним особливостям необхідного для їх виготовлення технологічного оснащення та інструменту [3, 5, 7, 9-11, 14, 15, 18-20].

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження технологічних та конструктивних особливостей виготовлення гвинтових елементів сільськогосподарської техніки.

Виклад основного матеріалу. Гвинтові робочі органи у сільськогосподарському виробництві широко використовуються у якості подрібнювачів, змішувачів, калібрувальників, пресувальників, сортувальників, підбирачів, транспортерів, очисників, дозувальників, нагнітальників, ворошильників, готувальників кормів тощо [17, 19]. Тому на практиці існує ціла гамма спіралей шнеків, які доцільно класифікувати за способом виготовлення, напрямком руху, формою, профілем і згідно функціонального призначення (рис. 1).

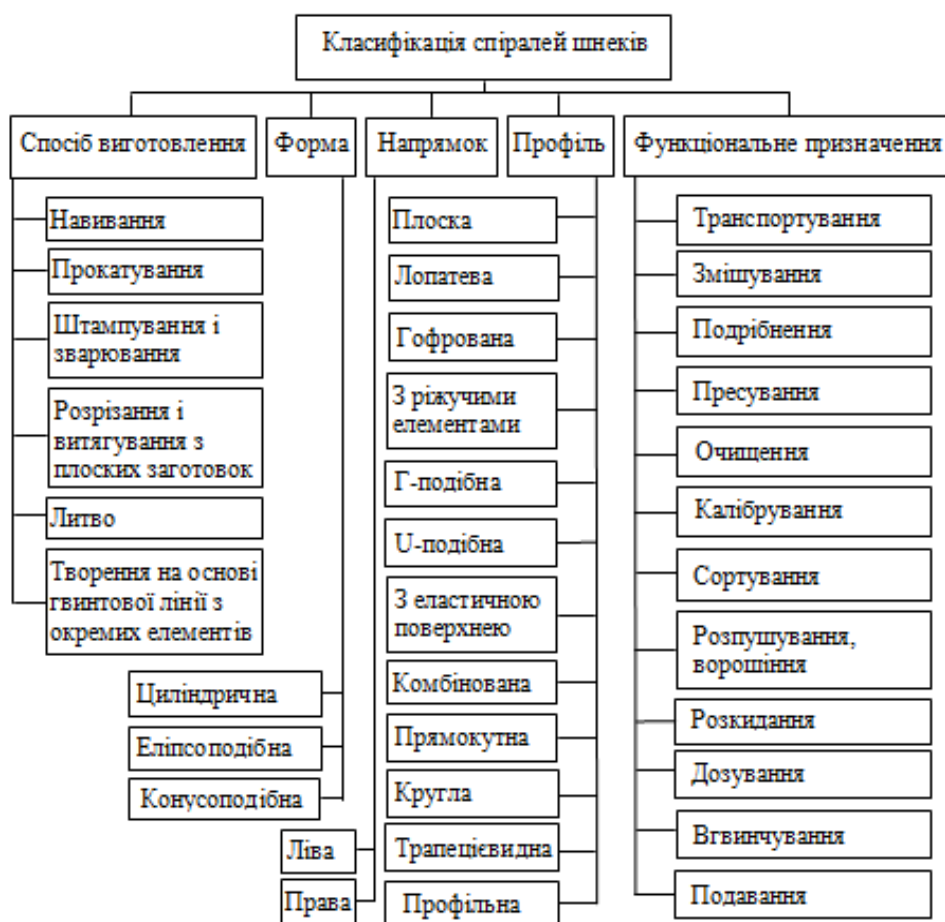


Рисунок 1 – Класифікація спіралей шнеків

Джерело: розроблено автором

Виготовлення спіралей шнеків є складний, енерговитратний і трудомісткий процес. Залежно від функціонального призначення технологія виготовлення має певні особливості [3, 5, 7, 8, 11, 12, 14, 20]. До таких особливих способів виготовлення належить виготовлення шнекових спіралей оснащених лопатями і ножами-подрібнювачами. Існують різні способи виготовлення шнекових спіралей оснащених

лопатями і ножами-подрібнювачами, окремі з яких були обґрунтовані у праці [14]. Ці способи передбачають відгинання лопатей чи ножів-подрібнювачів на певний кут при використанні ручного інструменту. З метою вдосконалення функціональних можливостей гвинтових елементів сільськогосподарської техніки розроблено нові механізовані способи виготовлення шнекових спіралей оснащених лопатями і ножами-подрібнювачами, які реалізуються з допомогою технологічного обладнання і оснащення.

На рис. 2 представлено пристрій для виготовлення ножів-подрібнювачів на шнековій спіралі. Такі спіралі у засобах сільськогосподарського призначення широко використовуються для подрібнення і змішування сільськогосподарських продуктів при приготуванні різних видів кормів для годівлі тварин.

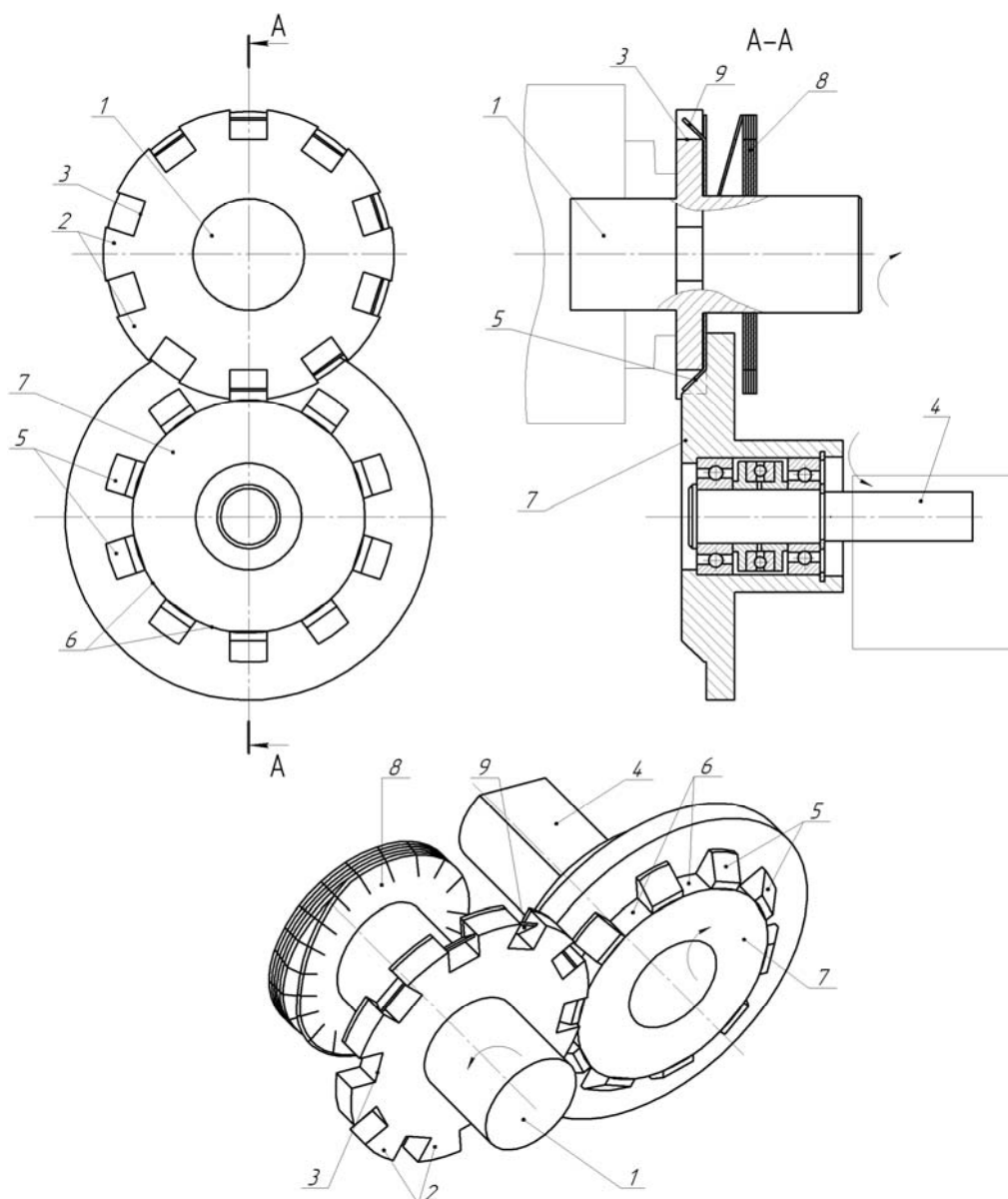


Рисунок 2 – Пристрій для виготовлення ножів-подрібнювачів на гвинтовій заготовці
Джерело: розроблено автором

Пристрій для виготовлення ножів-подрібнювачів 9 на шнековій спіралі 8 (рис. 2) передбачає використанням формувальних інструментів у вигляді оправи 1, яку

кріпиться в шпинделі токарного верстату, та ролика 4, який кріпиться у різцетримачі токарного верстату, оснащених спеціальними формувальними втулками 2 і 7. На зовнішній поверхні формувальної втулки 2 виконані вирізи 3, для загинання ножів-подрібнювачів 9 на гвинтовій заготовці 8. А на торцевій поверхні формувальної втулки 7, яка забезпечена можливістю кругового обертання, виконані вирізи 6 та нахилені виступи 5, які відповідають формі ножів-подрібнювачів 9. Слід відмітити, що особливістю пристрою (рис. 1) є точне попадання нахилених виступів 5 формувальної втулки 7 ролика 4 у вирізи 3 формувальної втулки 2 оправи 1.

Спосіб виготовлення ножів-подрібнювачів 9 на шнековій спіралі 8 (рис. 2) передбачає виконання таких технологічних операцій:

1. Навивання щільним пакетом на ребро шнекової спіралі 8 відомим способом.
2. Надрізання по зовнішньому контуру торцевої поверхні навитої щільним пакетом шнекової спіралі 8 на потрібну глибину зі встановленим кроком.
3. Виставлення і закріплення спіральної заготовки 8 на оправі 1, яка закріплена в шпинделі токарного верстата.
4. Виставлення і закріплення в різцетримачі токарного верстата ролика 4.
5. Загинання крайнього ножа-подрібнювача 9 на шнековій спіралі 8 шляхом подачі різцетримача, точного попадання і притискання нахилених виступів 5 формувальної втулки 7 ролика 4 до вирізів 3 формувальної втулки 2 оправи 1.
6. Приведення зі встановленою частотою в обертовий рух шпинделя із оправою 1 і спіральною заготовкою 8, та зі встановленою швидкістю у рух подачі різцетримача з роликом 4, що забезпечує виготовлення ножів-подрібнювачів 9 на всій довжині шнекової спіралі 8 шляхом попадання нахилених виступів 5 формувальної втулки 7 ролика 4 у вирізи 3 формувальної втулки 2 оправи 1. По завершенні операції зупинка усіх рухів.
7. Відведення різцетримача; зняття з нього спеціального ролика 4; закріплення у різцетримачі спеціального затискного інструменту (на рис. 2 не показано); підведення різцетримача із спеціальним затискним інструментом до спіральної заготовки 8; закріплення у спеціальному затискному інструменті крайнього витка спіральної заготовки 8.
8. Калібрування на заданий крок спіральної заготовки 8 із виготовленими ножами-подрібнювачами 9 шляхом вмикання руху подачі різцетримача. По завершенні операції зупинка усіх рухів.

9. Відкріплення готової спіральної заготовки 8 із виготовленими ножами-подрібнювачами 9 від спеціального затискного інструменту та оправи 1 і її зняття.

На рис. 2 представлено конструктивні схеми пристроїв для виготовлення лопатей на шнековій спіралі із застосуванням калібрувально-загинальних інструментів із використанням зворотно-поступального руху.

Пристрої для виготовлення лопатей 6 на шнековій спіралі 2 з надрізами 3 (рис. 3) із застосуванням калібрувально-загинальних інструментів 8 із використанням зворотно-поступального руху передбачає використання оправи 1, яку кріпиться в шпинделі 13 токарного верстату, та ролика 7, який кріпиться у різцетримачі 12 токарного верстату. Оправа 1 оснащена формувальною втулкою 4, на торцевій поверхні якої виконано заглиблення 5. Ролик 7 оснащено з можливістю здійснення зворотно-поступального руху калібрувально-загинальним інструментом 8, який містить або калібрувальний пуансон 9 (рис. 3 а), або формувальну втулку з можливістю кругового обертання з виступами 9 (рис. 3 б), форма яких є дзеркальним відображенням формі заглиблень 5 формувальної втулки 4. Зворотно-поступальний рух калібрувально-загинального інструменту 8 реалізується підтисканням пружини розтягу-стиснення 10 і

пальцем 11, який дозволяє калібрувально-загинальному інструменту 8 не повертатися відносно ролика 7 (рис. 3 а) і основи калібрувально-загинального інструменту 8 (рис. 3 б), забезпечуючи, при цьому, можливість осевого зміщення при загинах лопатей.

На відміну від попередньо представленої конструкції пристрою для виготовлення ножів-подрібнювачів на гвинтовій заготовці (рис. 2), де особливістю є точне попадання нахилених виступів 5 формувальної втулки 7 ролика 4 у вирізи 3 формувальної втулки 2 оправи 1, дані конструктивні рішення не потребують точного співпадання заглиблень та виступів формувальних елементів, позаяк воно регулюється пружиною розтягу-стиснення 10 (рис. 3).

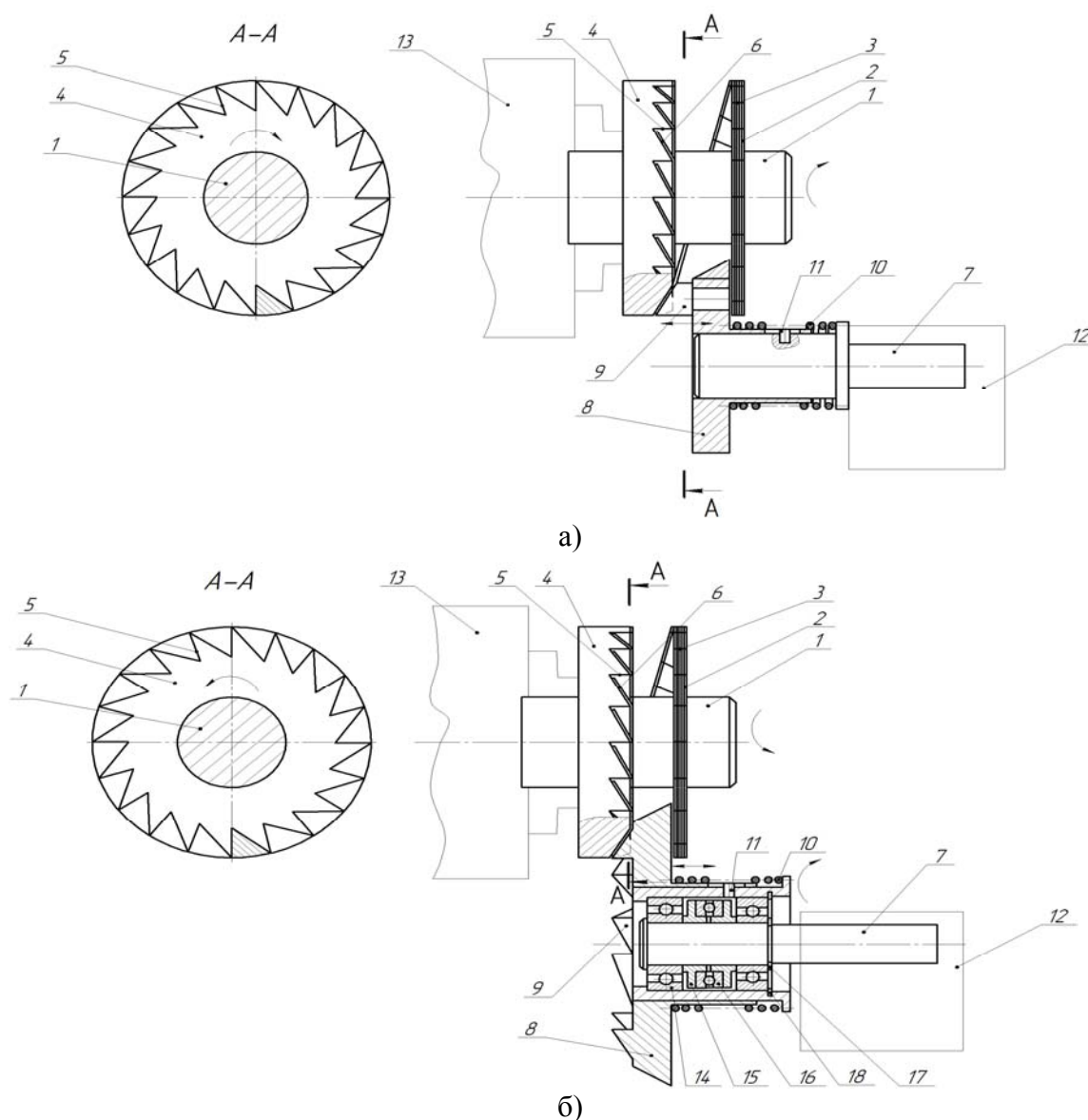


Рисунок 3 – Пристрої для виготовлення лопатевих спіралей передбачає виконання

Джерело: розроблено автором

Розроблений спосіб виготовлення лопатевих спіралей передбачає виконання наступної послідовності технологічних операцій:

1. Навивання щільним пакетом на ребро шнекової спіралі 2 відомим способом.
2. Виконання надрізів 3 по зовнішньому контуру торцевої поверхні навитої щільним пакетом шнекової спіралі 2 на потрібну глибину зі встановленим кроком.

3. Встановлення і закріплення підготовленої спіральної заготовки 2 на оправі 4 із заглибленнями 5, що відповідають формі лопатей, із забезпеченням співпадання надрізів 3 спіральної заготовки 2 із заглибленнями 5 оправу 4.

4. Встановлення і закріплення оправу 4 із наперед встановленою і закріпленою спіральною заготовкою 2 у шпинделі 13 токарного верстата.

5. Встановлення і закріплення в різцетримачі 12 токарного верстата ролика 7, оснащеного калібрувально-загинальним інструментом 8.

6. Відгинання крайнього витка спіральної заготовки 2 і заведення калібрувально-загинального інструменту 8 у міжвитковий простір.

7. Приведення з наперед визначеною частотою в обертовий рух шпинделя 13 із оправою 4 і спіральною заготовкою 2, та з наперед розрахованою швидкістю у рух подачі різцетримача 12 зі калібрувально-загинальним інструментом 8, що забезпечує підведення останнього до першого витка спіральної заготовки 2 у місці її кріплення на оправі 4. Після досягнення цілі зупинка усіх рухів.

8. Приведення у рух подачі різцетримача 12 зі калібрувально-загинальним інструментом 8 до створення загину першої лопаті 6 спіральної заготовки 2 у заглиблення 5 оправу 4. Після досягнення цілі зупинка усіх рухів.

9. Приведення з наперед визначеною частотою в обертовий рух шпинделя 13 із оправою 4 і спіральною заготовкою 2 (у зворотному напрямку в порівнянні з операцією 7), та з наперед розрахованою швидкістю у рух подачі різцетримача 12 зі калібрувально-загинальним інструментом 8 (у зворотному напрямку в порівнянні з операцією 7), що забезпечує виготовлення загинів лопатей 6 по усій довжині спіральної заготовки 2 у заглиблення 5 оправу 4. Після досягнення цілі зупинка усіх рухів.

10. Відведення різцетримача 12; зняття з нього калібрувально-загинального інструменту 8; закріплення у різцетримачі 12 спеціального затискного інструменту (на рис. 3 не показано); підведення різцетримача із спеціальним затискним інструментом до спіральної заготовки 2; закріплення у спеціальному затискному інструменті крайнього витка спіральної заготовки 2.

11. Калібрування на заданий крок лопатевої спіральної заготовки 2 шляхом вмикання руху подачі різцетримача 12. Після досягнення цілі зупинка усіх рухів.

14. Відкріплення готової лопатевої спіральної заготовки 2 від спеціального затискного інструменту та оправу 4 з заглибленнями 5 і її зняття.

Сила, яку необхідно прикласти для загину лопаті калібрувально-загинальним інструментом, визначається за формулою:

$$F_{C3} = \frac{1,15 \cdot B \cdot \left[\sigma_{TO} \cdot \frac{s^2}{4} + \Pi \cdot \left(\frac{(r+s)^2 + r^2}{4} \cdot \ln \sqrt{\frac{r+s}{r}} - \frac{(r+s)^2 - r^2}{8} \right) \right] (1 + \mu \cdot \sin \alpha)}{L \cdot \cos \alpha}, \quad (1)$$

де B – довжина лінії згину заготовки, мм;

σ_{TO} – екстрапольована границя текучості матеріалу заготовки, МПа;

s – товщина заготовки, мм;

Π – лінійний модуль зміцнення матеріалу заготовки, МПа;

r – радіус кромки інструмента, по якій відбувається згин матеріалу, мм;

μ – коефіцієнт тертя між поверхнями заготовки та інструменту;

α – кут нахилу лопаті, град;

L – довжина лопаті, мм.

Сила підтиску пружини розтягу-стиснення калібрувально-загинального

інструменту визначається за формулою [13]:

$$F_{np} = C \cdot (X_1 - \Delta), \quad (2)$$

де F_{np} – сила затиску пружини, Н;

C – жорсткість пружин, Н/мм;

Δ – попередній натяг пружини, мм;

X_1 – величина відгину лопаті від основної лінії шнекової спіралі, мм.

Відтак, попередній натяг пружини розтягу-стиснення у запропонованих пристроях для виготовлення лопатей визначатиметься за формулою:

$$\Delta = \frac{1,15 \cdot B \cdot \left[\sigma_{то} \cdot \frac{s^2}{4} + \Pi \cdot \left(\frac{(r+s)^2 + r^2}{4} \cdot \ln \sqrt{\frac{r+s}{r}} - \frac{(r+s)^2 - r^2}{8} \right) \right] (1 + \mu \cdot \sin \alpha)}{C \cdot L \cdot \cos \alpha} + X_1 \quad (3)$$

В таблиці 1 представлені раціональні конструктивно-технологічні параметри способів виготовлення шнекових спіралей оснащених лопатями і ножами-подрібнювачами. При цьому повздовжня подача ролика повинна відповідати товщині спіральної заготовки.

Таблиця 1 – Раціональні конструктивно-технологічні параметри способів виготовлення шнекових спіралей оснащених лопатями і ножами-подрібнювачами

| № | Частота обертання, оправи, об/хв. | Повздовжня подача ролика, мм/об. | Діаметр оправи, мм | Висота спіралі, мм | Товщина заготовки, мм | Кут сегменту (лопаті, ножа-подрібнювача), град. |
|---|-----------------------------------|----------------------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|---|
| 1 | 0,05...0,15 | 0,8 | 30...250 | 30...100 | 0,8 | 0,1...0,45 |
| 2 | 0,05...0,15 | 1,0 | 35...250 | 30...100 | 1,0 | 0,12...0,5 |
| 3 | 0,05...0,15 | 1,5 | 40...250 | 30...125 | 1,5 | 0,15...0,55 |
| 4 | 0,05...0,20 | 2,0 | 45...250 | 30...250 | 2,0 | 0,15...0,65 |
| 5 | 0,05...0,25 | 3,0 | 50...250 | 30...250 | 3,0 | 0,15...0,75 |

Джерело: розроблено автором

Для виготовлення шнекових спіралей оснащених лопатями і ножами-подрібнювачами слід використовувати холоднокатаний прокат сталей марок 08 кп ДСТУ 2834-94, Ст 3 ДСТУ 4651:2005 (аналоги є марки: 040A10,1449-1HR, 1HR, 2HR, DC01, DD13 (Англія); 1008, 1010, A619, A622, G10080, G10120 (США); 1.0322, 1.0335, DC01, DC04, DC04G1, DD11, DDB, St12, St 14, St22, StW24, USt3, USt4 (Німеччина), 3С, DC01, DC04, DD13, FB8, Fd4, FR8, XC6 (Франція)), а також сталь 20, 30, 45, 09Г2С, 08Х17Т, 12Х17, AISI 304, AISI 316 та інші аналоги [5, 14]. Стандартна товщина смуги, яку доцільно використовувати для виготовлення шнекових спіралей оснащених лопатями і ножами-подрібнювачами, повинна становити від 1 до 3 мм (1, 1,5; 2,5; 3) і шириною від 30 до 250 мм (30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 125, 250). Також з метою зменшення зусиль та усунення прилипання деталей, утворення задирів, заїдання тощо, доцільно використовувати індустріальні та синтетичні силіконові мастила різних марок (И-20, И-20А, И-40, И-50, ПМС-20 і ПМС-50) [5, 14].

Висновки. Розроблено класифікацію спіралей шнеків, яка передбачає їх поділ за способом виготовлення, напрямком руху, формою, профілем і згідно функціонального призначення. Запропоновано пристрої для виготовлення ножів-подрібнювачів та

лопатеї на гвинтовій заготовці. Розроблено способи виготовлення гвинтових елементів сільськогосподарської техніки оснащених лопатями і ножами-подрібнювачами, й визначено їх основні технологічні та конструктивні особливості. Запропоновано формули для визначення сили, яку необхідно прикласти калібрувально-загинальним інструментом для загину лопаті на спіралі шнека, та попереднього натягу пружини розтягу-стиснення у запропонованих пристроях для виготовлення лопатеї. Встановлено раціональні конструктивно-технологічні параметри способів виготовлення шнекових спіралей оснащених лопатями і ножами-подрібнювачами.

Список літератури

1. Feng Guang-liang, Bai Yin-shan. Some moulding ways of spiral vane. *Coal Mine Machinery*. 2006 Vol. 27 No. 9, P. 835-849.
2. Gheorghe Pleșu. Package of calculus, drawing and design of the rolling tools for manufacturing of the helical surfaces. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*. 2014. No. 1. P. 65–70. ISSN 2067–3604.
3. Hevko I.B., Dyachun A.Ye., Lyashuk O.L., Martsenko S.V., Gypka A.B. Research the force parameters of forming the screw cleaning elements. *INMATEH - Agricultural Engineering*. Polytechnic University of Bucharest, 2016, Vol. 49, № 2, P.77-82.
4. Li Zheng Feng, Li Qiang Jiang. Design of combined helical blade manufacturing device. *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 753–755. P. 1386–1390. Crossref. Doi: 10.4028/www.scientific.net/amr/753-755.1386. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR>
5. Peculiarities of technological design of U-shaped screw transport and technological working bodies Ivan Hevko, Andriy Pik, Roman Komar, Oleh Stibaylo, Serhiy Koval' // *Scientific Journal of TNTU*. Tern.: TNTU, 2024. Vol 113. No 1. P. 5–15.
6. Quan-Quan Han and Ri-Liang Liu. Mathematical model and tool path calculation for helical groove whirling. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 6 (19): 3584–3587, 2013. <https://doi.org/10.19026/rjaset.6.3563>
7. Rogatinskiy R., Hevko I., Gypka A., Garmatyk O., Martsenko S. Feasibility study of the method choice of manufacturing screw cleaning elements with the development and use of software. *Acta Technologica Agriculturae*. Slovaca Universitas Agriculturae Nitriae. 2017. No. 2. P. 36–41. <https://doi.org/10.1515/ata-2017-0007>
8. Study of Dynamic and Power Parameters of the Screw Workpieces with a Curved Profile Turning // [Ivan Hevko, Andrii Diachun, Oleg Lyashuk, Yuriy Vovk, Andriy Hupka] *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV*. Proceedings of the 4th International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2021, June 8–11, 2021, Lviv, Ukraine Volume 1: Manufacturing and Materials Engineering, P. 385-394.
9. Васильків В. В. Розвиток науково-прикладних основ розроблення технологій виробництва гвинтових і шнекових заготовок з використанням уніфікації: автореф. дис. д-ра техніч. наук: спец. 05.02.08. Львів, 2015. 48 с.
10. Васильків В. В. Технологічні та конструктивні особливості виготовлення гвинтових заготовок з листового прокату / В. В. Васильків, Л. Д. Радик, І. Б. Гевко // *Міжвузівський збірник (за напрямом «Інженерна механіка»): «Наукові нотатки» ЛДТУ*. 2004. Вип. 14. С. 12–18.
11. Гевко Б. М., Пилипець М. І., Васильків В. В., Радик Д. Л. Технологічні основи формотворення різнопрофільних гвинтових заготовок. Тернопіль: Вид-во ТДТУ ім. І. Пулюя, 2009. 457 с. ISBN966-305-014-4.
12. Гевко І. Б., Ляшук О. Л., Цьонь О. П., Станько А. І. Технологія виготовлення еластичних шнеків. Збірник наукових праць X Міжнародної науково-технічної конференції «*Прогресивні технології у машинобудуванні ОТМЕ-2022*» (Івано-Франківськ Яремче, 1-5 лютого 2022 р.). Івано-Франківськ, 2022. С. 69-71.
13. Гевко І.Б. Розробка і дослідження низькочастотних пристроїв для виконання технологічних процесів гнучкими гвинтовими конвеєрами: дис. к-та техніч. наук: спец. 05.20.01. Луцьк, 1997. 139 с.
14. Гевко І.Б., Лещук Р.Я., Брикса А.О., Стібайло О.Ю., Коваль С.О. Особливості конструкцій і технологічного проєктування робочих органів лопатеєвих гвинтових змішувачів // *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 8(39). Част.2. С. 24-34.
15. Гевко Ів. Технологічність конструкцій гвинтових секційних робочих органів. *Вісник ТНТУ* //

- Ів. Гевко, В. Клендій Тернопіль : ТНТУ, 2015. Том 79. № 3. С. 148-155.
16. Гнучкі гвинтові конвеєри: проектування, технологія виготовлення, експериментальні дослідження / Гевко І. Б., Лещук Р. Я., Гудь В. З., Дмитрів О. Р., Дубиняк Т. С., Навроцька Т. Д., Круглик О. А. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2019. 207 с.
 17. Грицай Ю. В. Обґрунтування параметрів комбінованого шнекового транспортера-подрібнювача коренеплодів: дис. ... к-та техніч. наук: спец. 05.05.11. Тернопіль, 2020. 137 с.
 18. Пилипець М. І. Науково-технологічні основи виробництва навивних заготовок деталей машин : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук : спец. 05.03.01. Львів, 2002. 35 с.
 19. Рогатинський Р.М. Науково-прикладні основи створення гвинтових транспортно-технологічних механізмів : монографія / Р.М. Рогатинський, І.Б. Гевко, А.Є. Дячун Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2014. 280 с.
 20. Технологічні основи формоутворення спеціальних профільних гвинтових деталей / Гевко Б.М., Ляшук О.Л., Гевко І.Б., Драган А.П., Новосад І.Я. Тернопіль: ТДТУ імені Івана Пулюя, 2008. 367 с.

References

1. Feng Guang- liang, Bai Yin-shan. Some moulding ways of spiral vane. *Coal Mine Machinery*. 2006 Vol. 27 No. 9. P. 835-849.
2. Gheorghe Pleșu. Package of calculus, drawing and design of the rolling tools for manufacturing of the helical surfaces. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*. 2014. No. 1. P. 65–70. ISSN 2067–3604.
3. Hevko. I.B., Dyachun A.Ye., Lyashuk O.L., Martsenko S.V., & Gypka A.B. (2016) Research the force parameters of forming the screw cleaning elements. *INMATEH - Agricultural Engineering*. Polytechnic University of Bucharest, 2016, Vol. 49, № 2, P.77-82 [in Ukrainian]
4. Li Zheng Feng, Li Qiang Jiang. Design of combined helical blade manufacturing device. *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 753–755. P. 1386–1390. Crossref. Doi: 10.4028/www.scientific.net/amr/753-755.1386. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR>
5. Peculiarities of technological design of U-shaped screw transport and technological working bodies / Ivan Hevko, Andriy Pik, Roman Komar, Oleh Stibaylo, Serhiy Koval // *Scientific Journal of TNTU*. — Tern.: TNTU, 2024. Vol 113. No 1. P. 5–15.
6. Quan-Quan Han and Ri-Liang Liu. Mathematical model and tool path calculation for helical groove whirling. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 6 (19): 3584–3587, 2013. <https://doi.org/10.19026/rjaset.6.3563>
7. Rogatinskiy R., Hevko I., Gypka A., Garmatyk O., & Martsenko S. (2017) Feasibility study of the method choice of manufacturing screw cleaning elements with the development and use of software. *Acta Technologica Agriculturae*. Slovaca Universitas Agriculturae Nitriae. 2017. No. 2. P. 36–41. <https://doi.org/10.1515/ata-2017-0007>
8. Study of Dynamic and Power Parameters of the Screw Workpieces with a Curved Profile Turning // [Ivan Hevko, Andrii Diachun, Oleg Lyashuk, Yuriy Vovk, Andriy Hupka] – *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV*. Proceedings of the 4th International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2021, June 8–11, 2021, Lviv, Ukraine Volume 1: Manufacturing and Materials Engineering, P. 385-394.
9. Vasylykiv V. V. (2015) Development of the scientific and applied foundations of the development of technologies for the production of screw and auger blanks using unification: autoref. thesis ... Dr. Tech. Sciences: specialist 05.02.08. Lviv. 48 p. [in Ukrainian]
10. Vasylykiv V.V. (2004) Technological and constructive features of the production of screw blanks from rolled sheet / V.V. Vasylykiv, L.D. Radik, I.B. Gevko // *Interuniversity collection (in the direction of "Engineering Mechanics")*: "Scientific notes" LDTU. Issue 14. pp. 12–18. [in Ukrainian]
11. Hevko B.M., Pylypets M.I., Vasylykiv V.V., & Radyk D.L.. (, 2009) Technological bases of shaping of various profile screw blanks. Ternopil: Publication of TDTU named after I. Pulyuya, 457 p. ISBN966-305-014-4. [in Ukrainian]
12. Hevko I. B., Lyashuk O. L., Tsyon O. P., & Stanko A. (2022) AND. Technology of production of elastic screws. Collection of scientific works of the X International scientific and technical conference "Progressive technologies in mechanical engineering OTME-2022" (Ivano-Frankivsk - Yaremche, February 1-5, 2022). Ivano-Frankivsk. P. 69-71. [in Ukrainian]
13. Hevko I.B. (1997). Development and research of low-frequency devices for the execution of technological processes by flexible screw conveyors: dissertation. ... technical college Sciences: specialist 05.20.01. Lutsk. 139 p. [in Ukrainian]

14. Hevko I.B., Leshchuk R.Ya., Briksa A.O., Stibailo O.Yu., & Koval S.O. (2023) Peculiarities of structures and technological design of working bodies of bladed screw mixers // Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical sciences. Issue 8(39). Part 2 WITH. 24-34. [in Ukrainian]
15. Hevko Iv. (2015). Technological features of designs of helical sectional working bodies / Bulletin of TNTU // Iv. Hevko, V. Klendiy Ternopil: TNTU. Volume 79. No. 3. P. 148-155. [in Ukrainian]
16. Flexible screw conveyors: design, manufacturing technology, experimental studies / Hevko I.B., Leshchuk R.Ya., Gud V.Z., Dmytriv O.R., Dubynyak T.S., Navrotska T.D. O. A. Kruglyk – Ternopil: V. A. Palyanitsa FOP, 2019. 207 p. [in Ukrainian]
17. Hrytsai Yu. IN. (2020). Justification of the parameters of the combined screw conveyor-shredder of root crops: thesis. technical college Sciences: special 05.05.11. Ternopil. 137 p. [in Ukrainian]
18. Pylypets M. I. (2002). Scientific and technological basis of production of winding blanks of machine parts: autoref. thesis for obtaining sciences. degree of doctor of technology Sciences: spec. 05.03.01. Lviv. 35 p. [in Ukrainian]
19. Rohatynskiy R.M. (2014) Scientific and applied foundations of the creation of screw transport and technological mechanisms: monograph / R.M. Rohatynskiy, I.B. Hevko, A.E. Dyachun – Ternopil: Publishing House of Ivan Pulyuy TNTU. 280 p. [in Ukrainian]
20. Technological bases of forming of special profile screw parts / Hevko B.M., Lyashuk O.L., Hevko I.B., Dragan A.P., Novosad I.Ya. – Ternopil: TDTU named after Ivan Pulyu, 2008. 367 p. [in Ukrainian]

Oleg Stibailo, post-graduate

Ternopil National Technical University named after Ivan Pulyu, Ternopil, Ukraine

Technological and Constructive Features of the Production of Screw Elements of Agricultural Machinery

Expanding the technological capabilities of screw mechanisms provides increased opportunities for their application in various sectors of the economy. This applies to agricultural production, where they are most widely used as screw technological elements of agricultural machinery, and especially in the production of various fodder for feeding animals and poultry. Given that a significant percentage of production costs in the overall structure of animal husbandry production is accounted for by the share of preparation of various feeds using root crops, the problem of their production using special transport-technological screw elements that combine various operations is particularly relevant. Thus, when using special screw elements equipped with blades or knives, it is possible to carry out grinding, mixing, pressing and transportation at the same time, which is especially important in agricultural production. Therefore, the development of new methods of manufacturing screw elements of agricultural machinery equipped with blades and chopper knives is an urgent task.

In practice, there is a whole range of screw spirals, which should be classified according to the method of manufacture, direction of movement, shape, profile and according to the functional purpose. The production of screw spirals is a complex, energy-consuming and time-consuming process. The main methods of manufacturing screw spirals include winding, rolling, stamping and welding, cutting and drawing spirals from flat blanks, casting, creating a helical line from separate elements on a certain basis. Depending on the functional purpose, the manufacturing technology has certain features. Such special production methods include the production of auger spirals equipped with blades and chopper knives. There are methods of manufacturing auger spirals equipped with blades and chopper knives, which involve bending the blades or chopper knives to a certain angle when using a hand tool. In order to improve the functionality of screw elements of agricultural machinery, new mechanized methods of manufacturing screw spirals equipped with blades and chopper knives have been developed, which are implemented with the help of technological equipment and equipment.

The article presents a device and a method of manufacturing shredder knives on a screw spiral, shredder knives on a screw spiral, which involves the performance of certain technological operations. Such spirals in agricultural equipment are widely used for grinding and mixing agricultural products in the preparation of various types of fodder for animal feeding. The article also presents devices and a method of manufacturing blades on a screw spiral using calibration-bending tools using reciprocating motion.

The article also presents a formula for determining the force that must be applied to bend the blade with a calibration-bending tool, and the force of spring pressure. After carrying out the transformation, the formula for determining the pretension of the spring in the proposed devices for the manufacture of blades was derived. The work presents rational structural and technological parameters of the methods of manufacturing screw spirals equipped with blades and chopper knives. It was determined that the longitudinal feed of the roller should correspond to the thickness of the spiral workpiece.

method, technology, technological process, blades, chopper knives, mandrel, roller

Одержано (Received) 05.11.2024

Прорецензовано (Reviewed) 06.12.2024

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2024

К.К. Щербина, доц., канд. техн. наук, **В.А. Годорожа**, асп., **А.М. Кириченко**, проф., д-р техн. наук, **А. Р. Апаракін**, канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: kir2912s@ukr.net

Дослідження параметрів точності виготовлення зубчатого зачеплення гідравлічних шестеренних насосів групи 1

У статті представлено результати дослідження параметрів точності виготовлення зубчатого зачеплення гідравлічних шестеренних насосів групи 1. Актуальність роботи зумовлена високими вимогами до точності геометричних параметрів зубчатого зачеплення, що забезпечує ефективну роботу насосів, мінімізацію витоків і втрат потужності.

У дослідженні розглянуто основні похибки, що виникають під час виготовлення зубчастих коліс, зокрема відхилення профілю, кроку, концентричності та бокового зазору. Проведено аналіз впливу цих похибок на гідромеханічні параметри насосів, включаючи коефіцієнт корисної дії, рівень шуму та зносостійкість. Застосовано сучасні методи контролю точності, такі як оптична та контактна профілометрія, що дозволило отримати кількісну оцінку параметрів точності.

Результати дослідження можуть бути використані для підвищення ефективності та надійності гідравлічних шестеренних насосів, що є важливим для галузей машинобудування та гідравлічної техніки. Одним із шляхів є дослідження взаємовпливу вихідних параметрів функціонування шестеренної гідравлічної машини.

зубообробка, шевінгування, зубчате зачеплення, шестеренний гідравлічний насос, точність

Постановка проблеми. Точність виготовлення зубчатого зачеплення гідравлічних шестеренних насосів відіграє ключову роль у забезпеченні їхньої ефективної та довговічної роботи. Ці насоси широко застосовуються в різних галузях промисловості, де стабільність і надійність роботи обладнання мають критичне значення. Відхилення у параметрах зачеплення можуть призводити до підвищених рівнів шуму, вібрацій, надмірного зносу деталей, а також до зниження коефіцієнта корисної дії. Особливе значення для забезпечення точності має процес шевінгування зубців, що є важливим етапом фінішної обробки зубчастих коліс. Він дозволяє мінімізувати похибки профілю, підвищити якість поверхонь і забезпечити стабільність зачеплення в умовах експлуатації.

Актуальність детального вивчення шевінгування обумовлена необхідністю оптимізації технологічного процесу, спрямованого на досягнення високої точності виготовлення при мінімальних виробничих витратах. Поглиблений аналіз параметрів точності виготовлення та розробка методів їхнього контролю сприятимуть не лише підвищенню якості гідравлічних насосів, а й удосконаленню наявних технологій обробки. Удосконалення процесів обробки зубчастих зачеплень є важливим кроком для розширення наукових знань у цій галузі, що водночас забезпечує економічну та технологічну конкурентоспроможність виробництва.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На підставі аналізу публікацій вчених, що шестерня несе на собі основні навантаження в процесі функціонування гідравлічних шестеренних насосів [1,2,3]. При цьому шестерня оснащена функціональними елементами, зокрема комплектом робочих поверхонь і крайок, утворених ними (рис.1):

- торці зубчастого вінця (ТЗВ);
- евольвентна циліндрична поверхня зубчастого вінця (ЕЦПЗВ);
- опорні цапфи (ОЦ);
- зовнішня поверхня зубчастого вінця (НПЗВ);
- евольвентні крайки (ЕК), утворені перетином ЕЦПЗВ і ТЗВ;
- циліндричні крайки (ЦК), утворені перетином ЕЦПЗВ і НПЗВ;
- торцеві крайки (ТК), утворені перетином НПЗВ і ТЗВ.

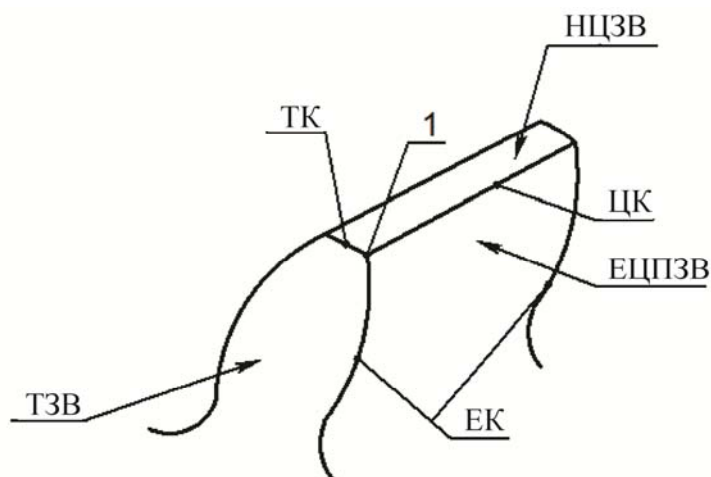


Рисунок 1 – Схема розміщення функціональних елементів на зубі шестерні

Джерело: розроблено авторами

Перераховані елементи повинні відповідати вимогам експлуатації, визначеним у конструкторській документації.

Однак низка вимог, не врахованих у конструкторській документації, потребує додаткового узгодження. Це пов'язано з тим, що такі вимоги необхідно забезпечити технологічними прийомами, які є визначальними для оцінки.

Найбільше функціональне навантаження несуть крайки ЕК і ЦК. Це пояснюється тим, що вони розділяють напірну зону насоса від зони всмоктування.

У зв'язку з цим, до них висуваються особливі вимоги щодо формоутворення та динамічної міцності.

Крайки ЕК і ЦК зазнають контактних навантажень під час роботи насоса і за певних умов можуть руйнуватися. Тому при їх формуванні необхідно уникати застосування технологічних прийомів, які можуть спричинити появу напружень на крайках через зазначені технологічні процеси.

Крім того, крайки повинні мати геометричну точність (відсутність просторових відхилень) для забезпечення чіткого контакту із сполученими поверхнями. Відсутність належного контакту може призвести до додаткових витоків і зниження ККД насоса.

Дослідження функціональних показників гідравлічних шестеренних машин є актуальним, що підтверджується значною кількістю наукових праць як вітчизняних дослідників [4, 5], так і зарубіжних [7, 8, 9]. Крім того, варто відзначити активну патентну діяльність, спрямовану на вдосконалення конструкції гідравлічних шестеренних машин [10].

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження процесу чистової обробки зубчатого зачеплення шестерень гідравлічного шестеренного насоса, а саме шевінгування з дотриманням показників закладених в DIN 3962.

Виклад основного матеріалу. Дослідження будемо проводити на зубошевінгувальному верстаті мод. ВСН-732NC22-7745 (рис.2) та виконувати замір деталей на координатно-вимірювальній машині Carl-Zeiss Contura G2 (рис.3)



Рисунок 2 – Зубошевінгувальний верстат мод. ВСН-732NC22-7745

Джерело: на підставі [11]



Рисунок 3 – Координатно-вимірювальна машина Carl-Zeiss Contura G2

Джерело: на підставі [12]

Шевінгування партії в кількості 98 шт. буде відбуватися з наступним режими обробки, котрі були отримані в процесі на підставі обробки партії, як найоптимальніші та наведені в таблиці 1 з дотриманням наступних показників у відповідності до DIN 3962, а саме:

- $f_{f\alpha}$ – відхилення профілю зуба;
- $f_{N\alpha}$ – відхилення направлення профілю зуба;
- F_r – накопичена похибка кроків зубців;
- F_r – радіальне биття зубчастого вінця.

Таблиця 1 – Режими шевінгування зубчастого зачеплення

| № | Параметр | Значення |
|---|--|-------------|
| 1 | Подача радіальна $S_{рад}$, мм/хід | 0,02 |
| 2 | Кількість проходів | 5 |
| 3 | Подача повздовжня $S_{пр}$, мм/хід | 90 |
| 4 | Частота обертів шевера $n_{ш}$, об/хвл. | 63 |
| 5 | Припуск, мм | 0,04...0,05 |

Джерело: розроблено авторами

Всі контрольовані показники будуть приведені в протоколі, котрий формує координатно-вимірвальна машина Carl-Zeiss Contura G2 з дотриманням вимог відповідності до DIN 3962 (рис.4).

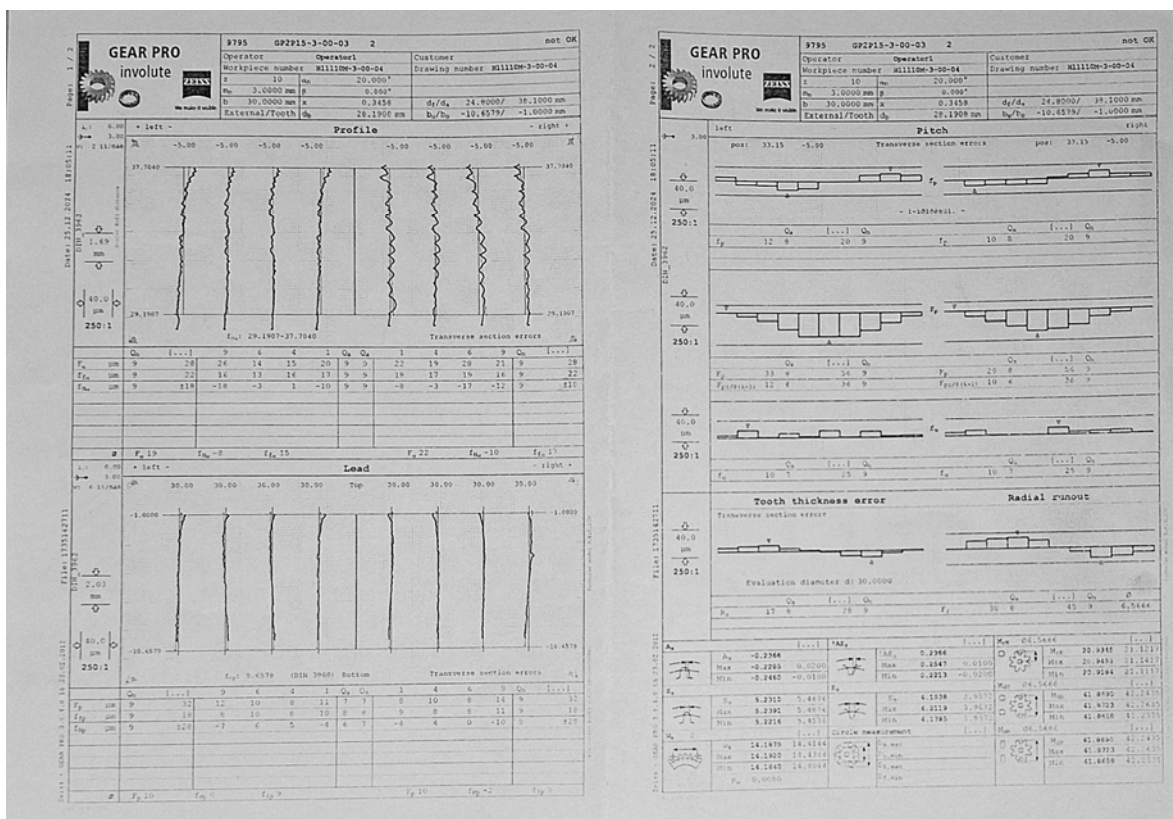


Рисунок 4 – Протокол вимірювання деталі на координатно-вимірвальній машині Carl-Zeiss Contura G2

Джерело: [12]

Отже під час шевінгування шестерень з малою кількістю зубців спостерігається порушення мікрорельєфу оброблюваної поверхні у вигляді періодично повторюваних виривів на профілі (рис. 5, а). Основною причиною його утворення є підвищення швидкості ковзання між ріжучими крайками інструмента та оброблюваною поверхнею зубців. Це явище зумовлене використанням кута схрещування осей інструмента і деталі, що впливає на характер контакту між ними. При збільшенні кута схрещування понад оптимальне значення до 15° відбувається нерівномірний розподіл контактних навантажень уздовж робочої поверхні зуба. Це призводить до перемінної глибини врізання ріжучих крайок, локального перегріву та мікроривів матеріалу, що формує характерний розірваний мікрорельєф. Дослідження показують, що зменшення кута схрещування з 15° до 10° дає змогу усунути цей ефект (рис. 5, б). При меншому куті схрещування покращується стабільність контакту між інструментом і деталлю, зменшується швидкість ковзання, а також рівномірно розподіляється навантаження уздовж поверхні зуба. Це сприяє формуванню однорідного мікрорельєфу, зменшенню шорсткості та покращенню якості обробленої поверхні.

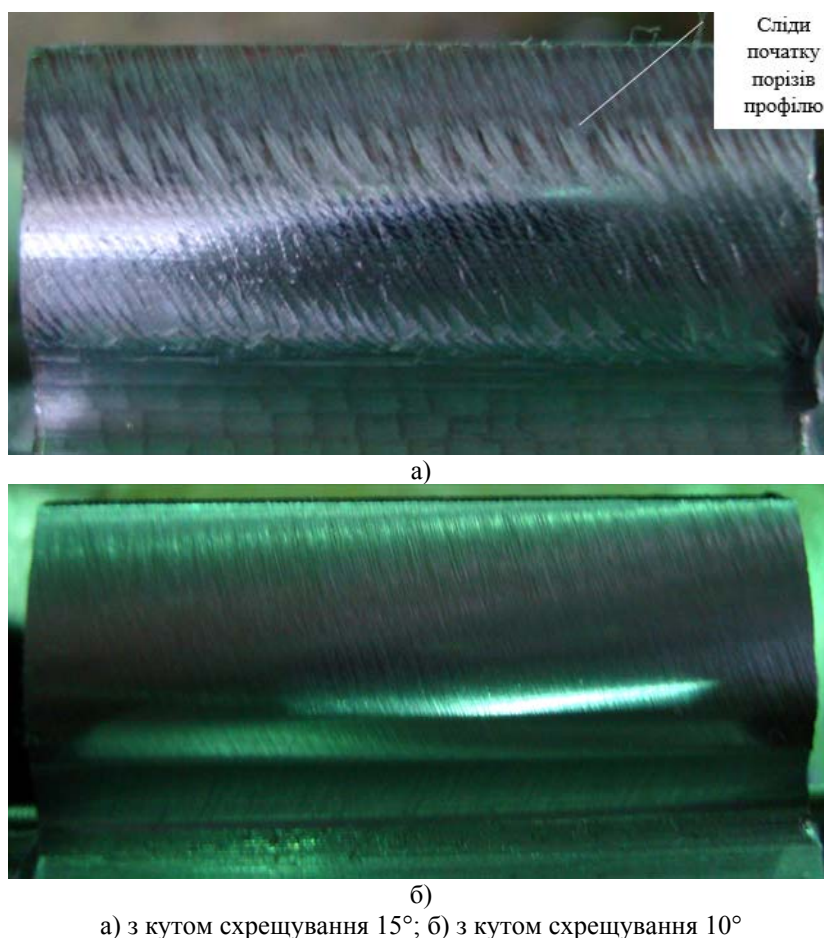
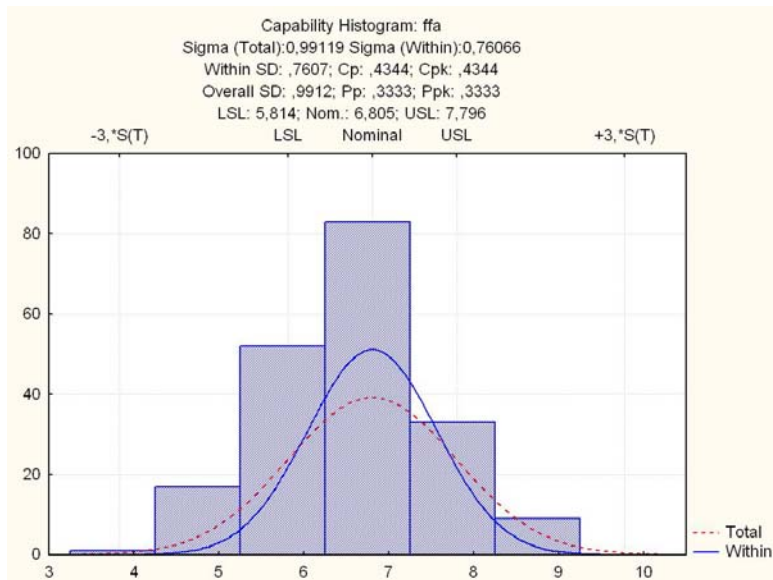


Рисунок 5 – Мікрорельєф евольвентного профілю деталі після шевінгування

Джерело: розроблено авторами

Результати обробки обумовленої партії представлено у вигляді гістограм на рисунку 6-9 на підставі вимог DIN 3962. Гістограма на рис.6 показує відхилення параметра профілю $f_{f\alpha}$, відображаючи частотний розподіл вимірних значень. З коефіцієнтом групування 6.805, але присутній значне розсіювання значень. Верхня та нижня межі коефіцієнту групування на рівні 7.796 та 5.814 відповідно. Видно, що

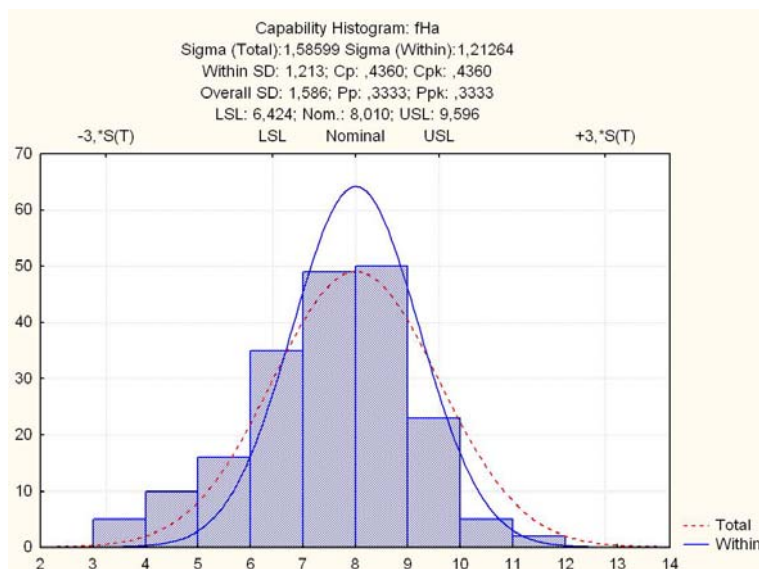
частина значень виходить за ці межі, що може призводити до браку продукції. Загалом гістограма на рис.6 відображає процес, який має нормальний розподіл, але широка дисперсія значень призводить до виходу за межі допустимих значень відхилень. Це свідчить про необхідність оптимізації – або шляхом зменшення розкиду значень, або шляхом коригування центру розподілу, щоб забезпечити стабільність і відповідність встановленим межам.



total – загальний розподіл відхилення параметру ffa ; within – внутрішню варіабельність процесу відхилення параметру ffa

Рисунок 6 – Гістограма та закон нормального розподілу відхилення параметру профілю зуба ffa

Джерело: розроблено авторами

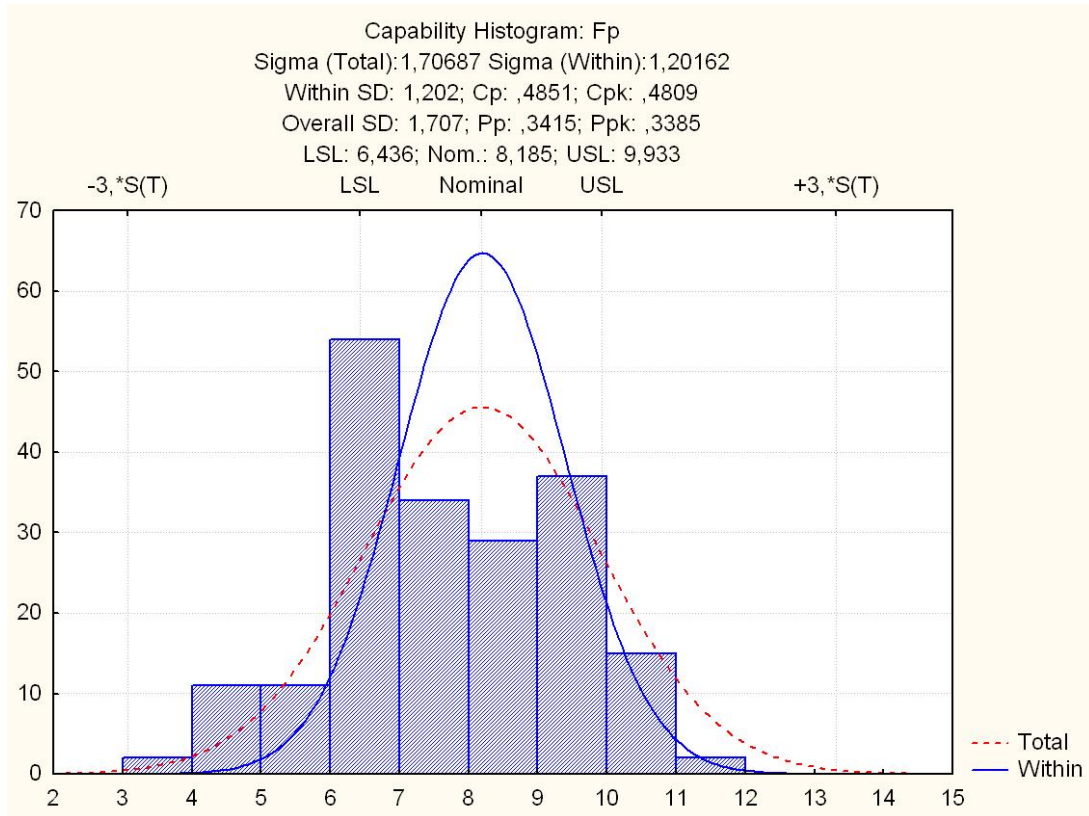


total – загальний розподіл відхилення параметру fHa ; within – внутрішню варіабельність процесу відхилення параметру fHa

Рисунок 7 – Гістограма закон нормального розподілу відхилення у параметру направлення профілю зуба fHa

Джерело: розроблено авторами

Гістограма демонструє відхилення параметра направлення профілю fHa, показуючи розподіл значень відносно коефіцієнту групування 8.010 та контрольних меж, встановлених на рівні 6.424 і 9.596. Розподіл даних має форму, близьку до нормального, але спостерігається значний розкид. Більшість значень концентрується поблизу центру, проте частина даних може виходити за допустимі межі, що впливає на якість готової продукції.



total – загальний розподіл відхилення параметру Fp; within – внутрішню варіабельність процесу відхилення параметру Fp

Рисунок 8 – Гістограма та закон нормального розподілу відхилення параметру накопиченої похибки кроків зубців Fp

Джерело: розроблено авторами

Гістограма на рис. 8 ілюструє відхилення параметра накопичена похибка кроків Fp, відображаючи частотний розподіл вимірних значень. Коефіцієнт групування становить 8,185, проте спостерігається значне розсіювання даних. Встановлені межі коефіцієнта групування визначені на рівні 9,933 та 6,436. Аналіз гістограми показує, що частина значень виходить за ці границі, що може спричинити збільшення відсотка браку та негативно вплинути на стабільність технологічного процесу. Гістограма на рис. 9 відображає відхилення параметра накопичене радіальне биття зубчастого вінця Fg, демонструючи частотний розподіл вимірних значень. Коефіцієнт групування становить 8,184, проте спостерігається значне розсіювання результатів. Встановлені межі коефіцієнта групування визначені на рівні 10,12 та 6,245. Аналіз розподілу показує, що частина значень виходить за встановлені границі, що може призводити до підвищеної кількості браку та негативного впливу на точність і надійність роботи зубчастого вінця.

Загалом гістограма на рис.7-9 відображає процес, який має нормальний розподіл, але широка дисперсія значень призводить до виходу за межі допустимих значень відхилень. Це свідчить про необхідність оптимізації – або шляхом зменшення розкиду значень, або шляхом коригування центру розподілу, щоб забезпечити стабільність і відповідність встановленим межам.

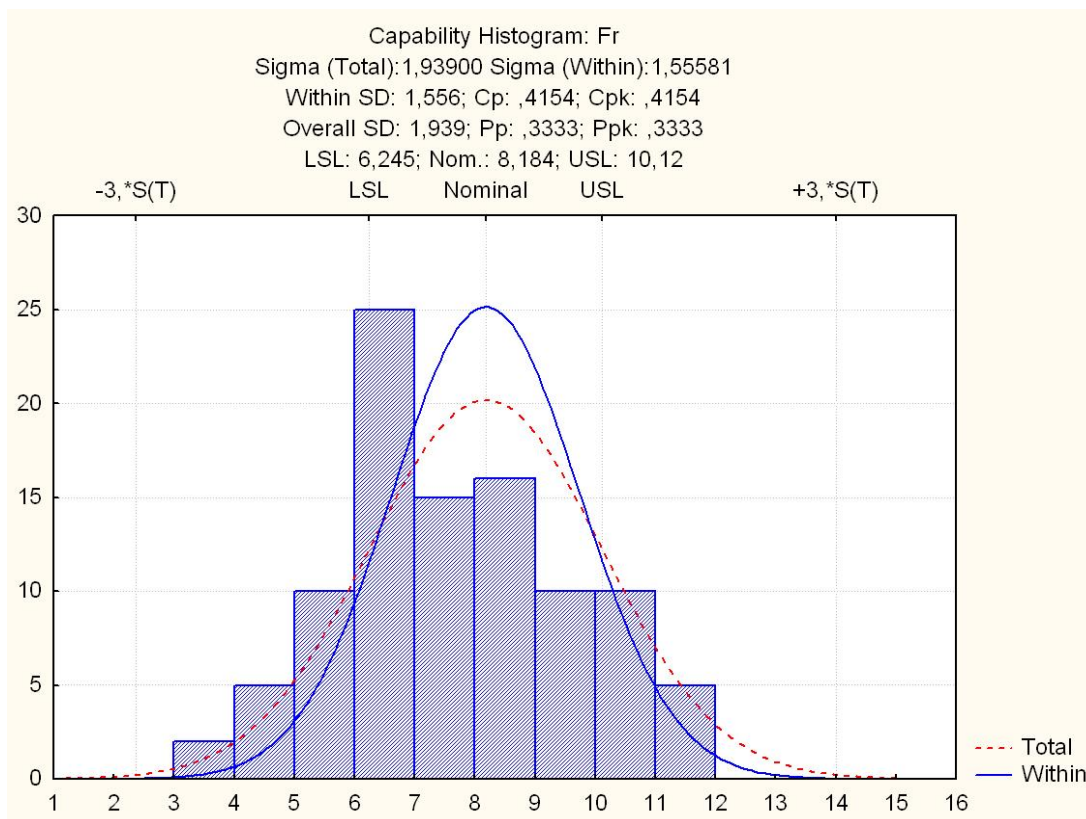


Рисунок 9 – Гістограма та закон нормального розподілу відхилення параметру радіального биття зубчастого вінця Fr

Джерело: розроблено авторами

Висновки. 1. Аналіз обробки шевінгуванням зубчастого зачеплення шестеренних насосів групи 1 показав, що цей метод дозволяє суттєво підвищити точність геометричних параметрів зубців та забезпечити якість їх поверхні. Завдяки цьому зменшується шорсткість профілю, що позитивно впливає на контактну витривалість та експлуатаційні характеристики деталей.

2. За результатами проведеного дослідження в процесі шевінгування визначено, що фактична точність шестерень відповідає 7-8 квалітету точності за DIN 3962.

3. Найбільше розходження показників мають накопичена похибка кроків зубців та радіальне биття зубчастого вінця, що зумовлені рядом невирішених проблем, серед яких варто виокремити наступні. Так, причиною низького рівня якості за параметром f_{Na} є необхідність підбору форми припуску під шевінгування, а також потреба усунення похибок вимірювання. В той же час періодично повторювана похибка базування деталей на зубофрезерній операції спричиняє отримання значних обсягів деталей з відхиленнями Fr. Також не менш важливою причиною впливу на параметр Fr можна назвати відсутність жорсткої фіксації столу зубофрезерного верстата.

Список літератури

1. Функціональний портрет шестеренної гідравлічної машини / М. М. Підгаєцький, К.К. Щербина та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. № 8 (39) . С. 3–10.
2. Апаракін А. Р. Модульно-параметричний принцип розробки проектів шестеренних гідравлічних машин. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки : зб. наук. пр. Кропивницький : ЦНТУ*, 2023. Вип. 7(38). Ч. 2. С. 51-58.
3. Матвієнко О.О. Математична модель втрат робочої рідини через радіальний зазор шестеренного насоса типу НШ. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: *зб. наук. праць КНТУ*. 2005. Вип. 16. С. 235-240.
4. Підвищення подачі шестеренних насосів засобів транспорту та сільськогосподарської техніки / Кулешков Ю. В. та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2022. Вип. 4 (36). Ч. 1. С. 197–203. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.197-203](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.197-203)
5. Кулешков Ю. В. Підвищення технічного рівня шестеренного насоса на основі нових фізичних і математичних моделей робочого процесу подачі : дис. д-ра техн. наук : 05.05.17. Харків, 2013. 442 с.
6. Кириченко А.М. Функціональний портрет шестеренного гідравлічного насосу / А.М. Кириченко, К.К. Щербина, В.А. Годорожа // *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС - 2023): Матер. XIII міжнар. наук.-практ. конф. (25-26 травн., 2023р., м. Чернігів)*. – Чернігів: НУ "Чернігівська політехніка", 2023. Т. 1. С. 288-289.
7. Yang Zhou, Bowen Che, Ci Yuan. The design and analysis of a high-speed circular arc gear pump *journal bearing. Advances in Mechanical Engineering*. 2018. Vol. 10(12) P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1177/1687814018819288>.
8. Zardin B, Natali E, Borghi M. Evaluation of the Hydro-Mechanical Efficiency of External Gear Pumps. *Energies*. 2019. Vol. 12(2468). DOI: <https://doi.org/10.3390/en12132468>.
9. Fang Guo, Zongde Fang, Experimental and theoretical study of gear dynamical transmission characteristic considering measured manufacturing errors. *Hindawi. Shock and Vibration*. 2018. P. 1-20. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/9645453>.
10. Gear pump cavitation reduction : пат. 7878781 B2 United States : МПК FOIC 2L/00. № 12/001,279 ; заявл. 11.12.2007 ; опубл. 01.02.2011.
11. Expert tools: веб-сайт. URL: <https://www.etum.in.ua/product-category/zuboobrobni-verstaty/page/1/> дата звернення 20.01.2025
12. Carl-zeiss: веб-сайт. URL <https://www.zeiss.co.in/metrology/products/systems/coordinate-measuring-machines/bridge-type-cmms/contura-g2.html> дата звернення 20.01.2025

References

1. Funktsionalnyi portret shesterennoi hidravlichnoi mashyny/ M. M. Pidhaietskyi, K.K. Shcherbyna et al. *Tsentralkoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*. 2023. № 8 (39) . P. 3–10. [in Ukrainian].
2. Aparakin, A. R. Modulno-parametrychnyi pryntsyp rozrobky proektiv shesterennykh hidravlichnykh mashyn / A. R. Aparakin // *Tsentralkoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky : zb. nauk. pr. - Kropyvnytskyi : TsNTU*, 2023. Vyp. 7(38). Ch. 2. P. 51-58. [in Ukrainian].
3. Matvienko, O.O. (2005). Matematichna model' vtrat robochoi ridini cherez radial'nij zazor shesterennogo nasosa tipu NSH [Mathematical model of losses of the working fluid due to the radial clearance of the gear pump type NSH]. *Zbirnik naukovih prac' KNTU. Tekhnika v sil'skogospodars'komu virobnictvi, galuzeve mashinobuduvannya, avtomatizaciya* – Collected Works of Kirovohrad National Technical University. Machinery in Agricultural Production, Industry Machine Building, Automation, Issue 16, 235-240 [in Ukrainian].
4. Kuleshkov, Y.V., Krasota, M.V., Rudenko, T.V., et al. (2022). Pidvishhennja podachi shesterennykh nasosiv zasobiv transportu ta sil'skogospodars'koyi tehniky [Increasing the Supply of Gear Pumps for Vehicles and Agricultural Machinery]. *Central'noukrayins'kij naukovij visnyk. Tehnichni nauki - CentralUkrainian National Technical University*. Technical sciences, Issue 4(36), Part. 1, 197–203 [in Ukrainian]. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.197-203](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.197-203) [in English].
5. Yu.V. Kulieshkov (2013) Pidvyshchennia tekhnichnoho ravnja shesterennogo nasosa na osnovi novykh fizychnykh i matematychnykh modelei robochoho protsesu podachy [Increasing the technical level of the gear pump on the basis of new physical and mathematical models of the working process of feeding]. *Dysertatsiia na zdobuttia naukovooho stupenia doktora tekhnichnykh nauk*, Kharkiv, 2013 442 p [in Ukrainian].
6. Kyrychenko A.M. (2023) Funktsionalnyi portret shesterennogo hidravlichnoho nasosu [Functional portrait of a gear hydraulic pump] / A.M. Kyrychenko, K.K. Shcherbyna, V.A. Hodorozha // *Комплексне забезпечення*

- yakosti tekhnolohichnykh protsesiv ta system (KZIaTPS - 2023): Mater. KhIII mizhnar. nauk.-prakt. konf. (25-26 travn., 2023r., m. Chernihiv). Chernihiv: NU "Chernihivska politekhnika", 2023. T. 1. P. 288-289.
7. Yang Zhou, Bowen Che & Ci Yuan. (2018). The design and analysis of a high-speed circular arc gear pump journal bearing. *Advances in Mechanical Engineering*, 10(12), P.1–11. DOI: <https://doi.org/10.1177/1687814018819288> [in English].
 8. Zardin, B., Natali, E. & Borghi, M. (2019). Evaluation of the Hydro-Mechanical Efficiency of External Gear Pumps. *Energies*, 12(2468). DOI: <https://doi.org/10.3390/en12132468> [in English].
 9. Fang Guo & Zongde Fang. (2018). Experimental and theoretical study of gear dynamical transmission characteristic considering measured manufacturing errors. *Hindawi. Shock and Vibration*. P. 1-20. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/9645453> [in English].
 10. Gear pump cavitation reduction (United States Patent № 7878781 B2). (2011) [in English].
 11. Expert tools: veb-sait. URL: <https://www.etum.in.ua/product-category/zuboobrobni-verstaty/page/1/> data zvernennia 20.01.2025
 12. Carl-zeiss: veb-sait. URL <https://www.zeiss.co.in/metrology/products/systems/coordinate-measuring-machines/bridge-type-cmms/contura-g2.html> data zvernennia 20.01.2025

Kyryl Shcherbyna, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Andrii Kyrychenko**, Prof., DSc., **Anton Aparakin**, PhD tech. sci., **Viktor Hodorodozha**, post-graduate

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Study of the Accuracy Parameters of the Production of Gear Wheels for Hydraulic Gear Pumps Size 1

The article presents the results of the study of the accuracy parameters of the manufacturing of gears for hydraulic gear pumps of group 1. The relevance of the work is due to the high requirements for the accuracy of the geometric parameters of the gears, which ensure the efficient operation of the pumps, minimising leakage and power losses.

The study considers the main errors that occur in the manufacture of gears, in particular deviations in profile, pitch, concentricity and side clearances. The influence of these errors on the hydromechanical parameters of the pumps, including efficiency, noise level and wear resistance, is analysed. Modern methods of accuracy control, such as optical and contact profilometry, have been used to provide a quantitative assessment of the accuracy parameters.

On the basis of the results obtained, recommendations for improving the technological processes of gear machining, including the optimisation of shaving and finishing, are proposed. The article also discusses the influence of heat treatment modes on the accuracy and stability of geometric parameters of gears. The analysis of the gear teeth of Group 1 gear pumps by chamfering shows that this method can significantly improve the accuracy of the geometric parameters of the teeth and the quality of their surface. This reduces the roughness of the profile, which has a positive effect on the contact life and performance characteristics of the parts. Shaving also helps to reduce the level of residual stress in the surface layer of the teeth, which increases their resistance to fracture during metal fatigue, especially under variable loads. As a result of the study, the following results were obtained: in fact, the 7th to 8th degree of accuracy according to DIN 3962 is achieved after chamfering. The greatest difference in the indicators is in the accumulated error of the steps and the radial runout of the gear ring.

The results of the study can be used to improve the efficiency and reliability of hydraulic gear pumps, which is important for the fields of mechanical engineering and hydraulic engineering. One of the important issues in the development of mechanical engineering is to improve the efficiency of the functional performance of various mechanisms, including hydraulic gear pumps and motors. Special attention should be paid to the following indicators.

shovel, gearbox, gear, gear hydraulic pump, precision

Одержано (Received) 08.11.2024

Прорецензовано (Reviewed) 12.12.2024

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2024

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 621.793.724

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.75-81](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.75-81)

В.М. Гвоздецький, ст. дослідник, канд. техн. наук, **М.М. Студент**, проф., д-р. техн. наук, пров.наук. співр., **Х.Р. Задорожна**, наук. співр., канд. техн. наук
Фізико-механічний інститут НАН України, м. Львів, Україна

С.І. Маркович, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: gvosdetcki@gmail.com, 880988@ukr.net, student.phmi@gmail.com
markob0@ukr.net

Вплив матеріалу металевої основи на механічні характеристики електродугових покриттів

В роботі проведено дослідження впливу матеріалу металевої основи (алюмінієвого сплаву Д16 та сталі Ст 3) на механічні характеристики електродугових покриттів. Покриття з порошкового дроту наносились в режимах дозвукового (тиск 0,6 МПа) та надзвукового повітряного струменю (тиск 1,2 МПа). При цьому виявлено наявність дисперснійшої структури, меншу кількість пор і мікротріщин. Для оцінки роботоздатності покриттів введено новий параметр, а саме – співвідношення між величинами залишкових напружень розтягу I роду та когезивної міцності – $\sigma_{\text{кол}}/\sigma_{\text{в}}$. Визначено, що утворення тріщин починається при значеннях цього показнику $\sigma_{\text{кол}}/\sigma_{\text{в}} > 0,75$, тоді як за $\sigma_{\text{кол}}/\sigma_{\text{в}} > 0,85$ у покриттях виникає мережа тріщин. Рівень напружень розтягу першого роду у покриттях напилених на алюмінієву основу є меншим ніж у покриттях напилених на сталь, що зумовлено більшим коефіцієнтом термічного розширення алюмінієвого сплаву ніж сталі.

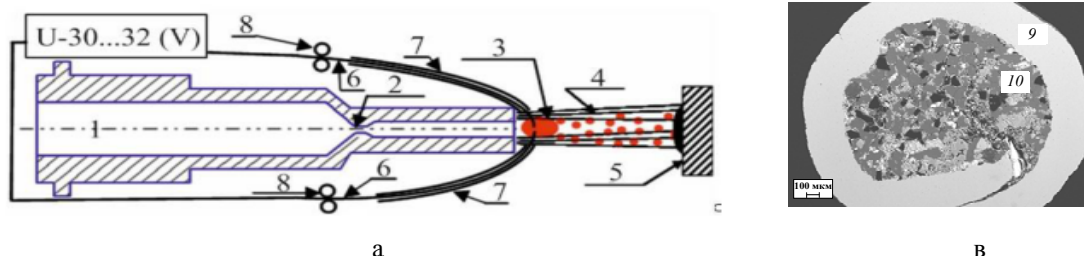
електродугові покриття, режим напилення, залишкові напруження, когезивна міцність

Постановка проблеми. Алюмінієві сплави широко використовують у промисловості завдяки їх високій конструкційній міцності, ливарним властивостям, низькій питомій вазі та температурі плавлення. Разом з тим алюмінієві сплави характеризуються низькою абразивною зносостійкістю, що суттєво стримує їх широке використання в технологічних середовищах, особливо за наявності в них абразивних часточок. Останнім часом склалась тенденція на заміну сталей алюмінієвими сплавами із зносостійкими покриттями. Це дає змогу зменшити, по-перше, вагу деталей, а по-друге, викиди вуглекислого газу в атмосферу та парниковий ефект [1-3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Газотермічні методи напилення широко використовуються для відновлення та підвищення зносостійкості сталевих а також алюмінієвих сплавів. Серед них метод електродугового напилення покриттів (ЕДНП) є найдешевшим та технологічно найпростішим, а використання спеціальних порошкових дротів (ПД) дозволяє отримувати покриття на рівні плазмових [4-7]. В процесі ЕДНП на сталеву основу виникають значні напруження розтягу, які можуть зумовити появу мікро та макротріщин у покриттях [8 -9]. В літературних джерелах відсутні дані про когезивну міцність та рівень напружень, які формуються у покриттях із ПД напилених на основу із алюмінієвих сплавів, що стримує розроблення технології відновлення деталей із алюмінієвих сплавів методом ЕДНП із ПД [10 -12].

Постановка завдання. Мета роботи: дослідити механічні характеристики ЕДНП напилених на зразки із алюмінієвого сплаву Д16 та порівняти з механічними характеристиками покриттів напилених на сталеву основу за однакових параметрів.

Виклад основного матеріалу. Методика наплення ЕДНП. Для наплення ЕДП використано електрометалізатор із системою розпилювання покриттів з двома вертикально розташованими повітряними каналами для формування надзвукової швидкості повітряного потоку (з числом Маха 2) рис. 1. Для розрахунку характерних розмірів такого сопла використовувалися формули, наведені в [13].



1 – потік повітря; 2 – критичний переріз сопла; 3 – розплав лектродних матеріалів; 4 – металоповітряний потік; 5 – сталева або алюмінієва підкладка з напилюваним покриттям; 6 – порошкові дроти; 7 – направляючі плашки; 8 – ролики для подачі дроту; 9 –оболонка ПД; 10 –шихта ПД

Рисунок 1 – Схема сопла (а) для отримання надзвукового потоку при ЕДНП з порошкового дроту (б)

Джерело: розроблено авторами

ПД, поперечний переріз яких наведено на (рис. 1 б), виготовляли з шихтових матеріалів (феросплави та чисті метали) в оболонці, товщиною 0,4 мм і шириною 10 мм, зі сталі 08кп. Коефіцієнт заповнення ПД шихтою становив 24%. Покриття напиляли за наступних режимів: струм 150 А, напруга дуги 30...32 В. Розпилення розплаву ПД здійснювалося потоком стисненого повітря під тиском 0,6 та 1,2 МПа на дистанції наплення покриттів 130 мм.

Залишкові напруження розтягу I роду ($\sigma_{\text{кол}}$) в покриттях були визначені на кільці діаметром 60 мм, висотою 20 мм і товщиною стінки 4 мм. Нанесення ЕДНП товщиною $1 \pm 0,1$ мм на зовнішню поверхню кільця відбувалося під час переміщення країв поздовжнього наскрізного його перерізу один відносно одного. Їхнє зміщення ΔK вимірювали експериментально, а залишкові напруження в напиленому покритті розраховували за методикою, запропонованою для біметалевого кільця з відношенням радіуса в центрі товщини його стінки до її товщини не менше десяти [14,15].

Експериментальні результати. Структура ЕДНП із ПД за використання дозвукового (тиск 0,6 МПа) та надзвукового повітряного струменю (тиск 1,2 МПа). ЕДНП із досліджуваних ПД напилени на сталеву або алюмінієву основу мають типову ламелярну будову рис. 2., рис. 3.

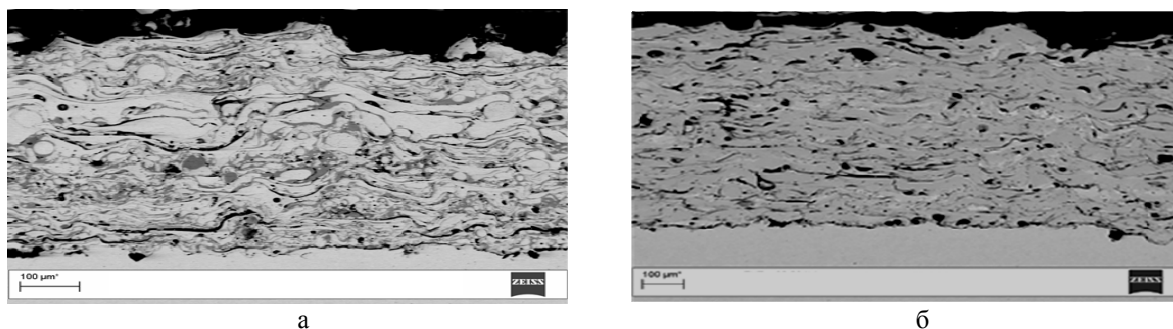
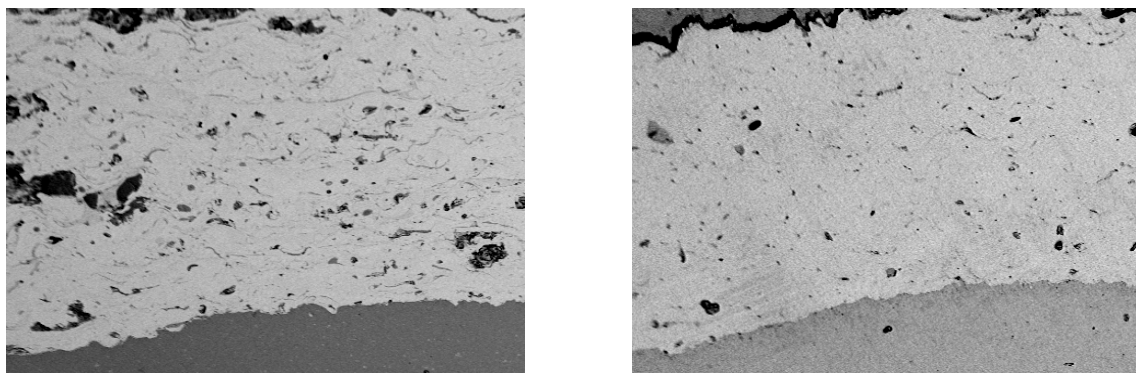


Рисунок 2 – Структура ЕДП з ПД90Х6Р2ГС напиленого за тиску повітряного струменя 0,6 (а) та 1,2 (б) МПа на сталі Ст3

Джерело: розроблено авторами

За використання надзвукового повітряного струменю (тиск 1,2 МПа) порівняно з дозвуковим (тиск 0,6 МПа) ЕДНП мають дисперснішу структуру та меншу кількість пор. Ламелі (закристалізовані краплини розплаву ПД) покриттів напилених за надзвукового режиму більш розплющені та мають більше місць приварок між собою. Як правило у структурі покриттів із ПД напилених за дозвукового режиму є більше мікротріщин, аніж у покриттях напилених за надзвукового режиму. Це зумовлено більшою кінетичною енергією краплин напилених за надзвукового режиму, а також меншими за величиною залишковими напруженнями розтягу I роду у покриттях.

У структурі покриттів напилених на алюмінієву основу зафіксовано суттєво менше пор та мікротріщин рис. 3. На поверхні алюмінієвих сплавів завжди присутня природна тугоплавка плівка з $T_{пл} = 2050^{\circ}\text{C}$, яка суттєво зменшує міцність зчеплення покриттів з алюмінієвою основою. Використання екзотермічної шихти (FeCr+V₄C) у ПД підвищило температуру краплин розплаву ПД до 2400°C , що полегшило плавлення поверхневої плівки Al_2O_3 та сплавлення краплин із алюмінієвою основою і як наслідок міцність зчеплення покриття із основою зросла на 70% до 50 МПа.



а б
Рисунок 3 – Структура ЕДП з ПД 90Х6Р2ГС напиленого за тиску повітряного струменю 0,6 (а) та 1,2 (б) МПа на сплаві Д16

Джерело: розроблено авторами

Більш потужний надзвуковий струмінь повітря інтенсивніше диспергує розплав порошкових дрітків в процесі напилення покриттів. При цьому утворюються більш дрібні краплини розплаву ПД, які мають більшу кінетичну енергію. Так при збільшенні тиску повітряного струменю від 0,6 до 1,2 МПа швидкість польоту на дистанції напилення зростає від 130 м/сек до 250 м/сек, максимальний діаметр краплин зменшується від 150 мкм до 50 мкм а розмір дрібнодисперсних виділень боридів $\text{Fe}(\text{Cr})_2\text{V}$ у структурі покриттів зменшується від 500 до 200 нм.

Вплив матеріалу підкладки на механічні характеристики ЕДНП. Збільшення вмісту хрому в шихті ПД від 6 до 17 мас.% спричиняє зростання когезійної міцності (σ_b) покриттів, напилених за дозвукового тиску повітряного струменю (0,6 МПа) від 160 до 215 МПа на сталі Ст3 та сплаві Д16. Це зумовлено тим, що зі збільшенням вмісту хрому зменшується окиснення краплин, які в процесі напилення формують покриття. При цьому відбувається інтенсивніше мікроприварювання ламелей покриття між собою та зростає міцність зв'язку між ними. Застосування надзвукового тиску повітряного струменю для напилення покриттів збільшує кінетичну енергію краплин, що їх формують, і, як наслідок, підвищує їх когезійну міцність на 5...25% (табл.1).

В процесі напилення покриттів краплини з розплаву ПД кристалізуються на холодній поверхні деталі і зменшуються в розмірах. При цьому у покриттях виникають значні залишкові напруження розтягу першого роду – $\sigma_{кол}$ (табл.1). Із збільшенням

вмісту хрому у покритті від 6 до 17 мас.% напиленого за дозвукового тиску повітряного струменя на сталі Ст3, рівень залишкових напружень розтягу I роду зростає від 16 до 115 МПа. Рівень залишкових напружень розтягу у покриттях напилених на сплав Д16 є суттєво меншим. Застосування надзвукового повітряного струменя дещо зменшує їх рівень залишкових напружень розтягу як на сталі Ст. 3 так і на Д16. Величина залишкових напружень розтягу I роду залежить в значній мірі від коефіцієнта теплового розширення фазових складових, які утворюють покриття та основи. Коефіцієнт термічного розширення сталевих основи із маловуглецевої сталі становить $(1,0 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1})$, а алюмінієвого сплаву Д16 $(2,34 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1})$ за кімнатної температури. При напиленні покриттів сталеві та алюмінієві основи нагріваються до $100 \dots 150^\circ \text{C}$. а після напилення покриття разом охолоджуються. Внаслідок різних коефіцієнтів покриття та основи виникають напруження розтягу у покриттях I роду. Коефіцієнт термічного розширення алюмінієвої основи є більшим ніж сталеві тому у покриттях напилених на алюмінієву основу рівень напружень розтягу є меншим ніж у покриттях напилених на сталь. Покриття зі вмістом хрому 6 мас.% має високу когезійну міцність і найменший рівень залишкових напружень розтягу I роду завдяки матричній фазі мартенситу. Зі збільшенням вмісту хрому у ПД зростає вміст аустеніту у покритті, що зумовлює підвищення рівня залишкових напружень розтягу I роду.

Якщо залишкові напруження розтягу I роду за величиною наближаються до величини когезійної міцності, то в цьому випадку в покриттях виникають мікро-, або макротріщини, що спричиняють їх руйнування. Тому, важливою є не лише величина когезивної міцності покриттів, а й величина їх залишкових напружень розтягу I роду. Для кваліфікованої оцінки роботоздатності покриттів нами введено новий параметр, а саме – співвідношення між величинами залишкових напружень розтягу I роду та когезивної міцності – $\sigma_{\text{кол}}/\sigma_{\text{в}}$.

Застосування надзвукового режиму напилення покриттів досить суттєво зменшує цей показник, що може свідчити про кращі характеристики їх роботоздатності. Застосування надзвукового режиму напилення ще сильніше підвищує когезійну міцність покриттів (табл.1), проте при цьому суттєво зростає рівень залишкових напружень розтягу I роду в покриттях напилених на сталь, а параметр роботоздатності $\sigma_{\text{кол}}/\sigma_{\text{в}}$ наближається до критичної межі ($\sigma_{\text{кол}}/\sigma_{\text{в}} > 0,75$, за якої в напиленому покритті утворюються мікротріщини (рис. 4,а). Рівень залишкових напружень розтягу I роду в покриттях напилених на алюмінієвий сплав Д15 є суттєво менший (табл.1) а параметр роботоздатності $\sigma_{\text{кол}}/\sigma_{\text{в}}$ значно менший ніж для сталі рис.4,б.

Таблиця 1 – Вплив матеріалу підкладки на механічні характеристики електродугових покриттів

| Марка ПД | Тиск повітряного струменя, МПа | $\sigma_{\text{в}}$, МПа | $\sigma_{\text{кол}}$, МПа | $\sigma_{\text{в}}$, МПа | $\sigma_{\text{кол}}$, МПа |
|-------------|--------------------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| | | Основа сталь Ст3 | | Основа алюмінієвий сплав Д16 | |
| ПД90Х6ГС | 0,6 | 160 | 16 | 150 | 17 |
| | 1,2 | 215 | 55 | 210 | 26 |
| ПД90Х6РГС | 0,6 | 210 | 80 | 205 | 57 |
| | 1,2 | 260 | 75 | 265 | 55 |
| ПД90Х17РГС | 0,6 | 235 | 188 | 230 | 46 |
| | 1,2 | 326 | 193 | 320 | 35 |
| ПД90Х17Р2ГС | 0,6 | 200 | 125 | 205 | 58 |
| | 1,2 | 270 | 110 | 265 | 40 |

Параметр $\sigma_{\text{кол}}/\sigma_{\text{в}}$ для покриття напиленого на сталь сильно зростає зі збільшенням вмісту Cr в ПД з 2 мас.% В, проте не досягає критичного значення при якому в напилених покриттях утворюються мікротріщини в процесі кристалізації та охолодження до кімнатної температури (рис. 4).

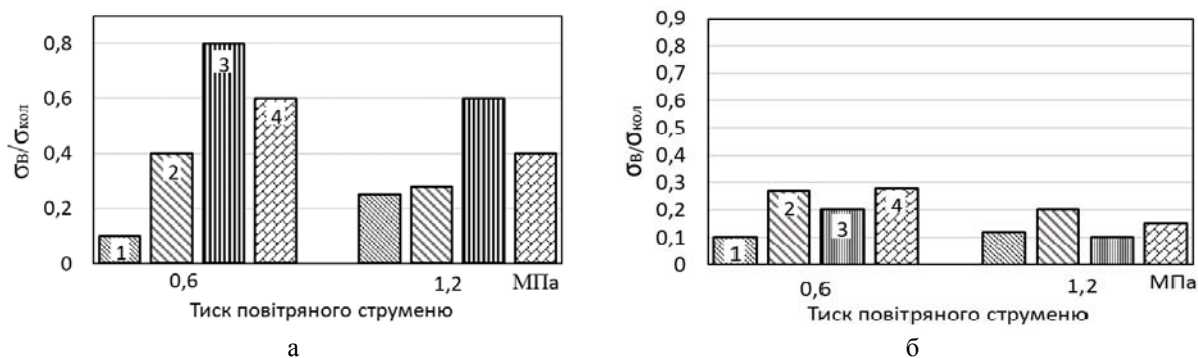


Рисунок 4 - Вплив хімічного складу ПД на параметр $\sigma_{\text{кол}}/\sigma_{\text{в}}$ для покриттів напилених з ПД за різних тисків повітряного струменю: *a* - на сталі Ст3, *б* - на алюмінієвому сплаві Д16: ПД90Х6ГС-1, ПД90Х6РГС-2, ПД90Х17РГС-3, ПД90Х17Р2ГС-4.

Джерело: розроблено авторами

Висновки:

1. Застосування надзвукового повітряного струменю для напилення покриттів збільшує кінетичну енергію краплин, що формують покриття, і, як наслідок, підвищує когезійну міцність покриттів та зменшує величину залишкових напружень розтягу I роду в них на сталій та алюмінієвій основі.

2. Співвідношення залишкових напружень розтягу I роду у покриттях $\sigma_{\text{кол}}$ до їх когезивної міцності $\sigma_{\text{в}}$ ($\sigma_{\text{кол}}/\sigma_{\text{в}}$) запропоновано використовувати як показник стійкості покриття до розтріскування. На основі аналізу отриманих покриттів показано, що тріщини починають утворюватися в покриттях, для яких показник $\sigma_{\text{кол}}/\sigma_{\text{в}} > 0,75$, тоді як за $\sigma_{\text{кол}}/\sigma_{\text{в}} > 0,85$ у покриттях виникає мережа тріщин.

3. Рівень напружень розтягу першого роду у покриттях напилених на алюмінієву основу є меншим ніж у покриттях напилених на сталь, що зумовлено більшим коефіцієнтом термічного розширення алюмінієвого сплаву Д16 ніж сталі Ст3.

Список літератури

- Перспективи використання плазмового напилення при відновленні поверхонь штоків циліндрів авіаційної техніки / С.В. Устінов, І.О. Буліч, Г.О. Шумілін *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації*. 2022. Вип. 18 (25) 107-200, DOI: 10.54858/dndia.2022-18-30
- Ю.С. Борисов, А.Л. Борисова, Л.І. Адеева, А.Ю. Тунік, М.Т. Панько Газотермічні покриття, що містять квазікристалічну фазу, властивості і застосування (огляд) / *Фізика і хімія твердого тіла* т. 6, № 1 (2005) с. 124-136 в. 6, № 1 (2005) р. 124-136
- Danial Qadir, Rabia Sharif, Rizwan Nasir, Ali Awad /A review on coatings through thermal spraying // *Chemical Papers* 78(2) September 2023, DOI:10.1007/s11696-023-03089-4
- Iron-based coatings arc-sprayed with cored wires for applications at elevated temperatures / Wielage B. et al. *Surface and coating technology*. 2013. № 220. P. 27–35.
- Arc-sprayed iron-based coatings for erosion-corrosion protection of boiler tubes at elevated temperatures / Pokhmurskyi V. I. et al. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2013. Vol. 22. P. 34-41
- Optimization of the Chromium Content of Powder Wires of the Fe–Cr–C and Fe–Cr–B Systems According to the Corrosion Resistance of Electric-Arc Coatings / Stupnyts'kyi T.R. et al. *Materials Science*. 2016. Vol. 52, № 2. P. 165–172.
- Abrasive Wear Resistance and Tribological Characteristics of Electrometallized Composite Coatings / Student, M.M. et al. *Materials Science*. 2022, 58(1). P. 96–104

8. Багатофункціональні електродугові покриття : монографія / М. М. Студент та ін. - Львів : Простір-М, 2018. 335 с.
9. Mechanical properties of arc coatings sprayed with cored wires with different charge compositions / Student, M.; Hvozdet'skyi, V.; Stupnytskyi, T.; Student, O.; Maruschak, P.; Prentkovskis, O.; Skačkauskas, P. *Coatings*, 2022, 12(7), 925. DOI:10.3390/coatings12070925
10. Вплив діаметра електродних порошкових дровів на механічні характеристики електродугових покриттів / Студент М.М. та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2020. Вип. 3(34). С. 32-44.
11. Application of Functional Coating in Delaying the Corrosion of Titanium Alloys: A Review, Chapter, Jun 2024 / Obidimma Ikeh, Ugochukwu Okoli, Amamchukwu Ilogebe, // *Corrosion Engineering - Recent Breakthroughs and Innovative Solutions*, Submitted: 24 June 2024 DOI: 10.5772/intechopen.1005679
12. Review of Functionally Graded Thermal Sprayed Coatings / Leszek Łatka, Lech Pawłowski, Marcin Winnicki, Paweł Sokołowski, Aleksandra Małachowska, Stefan Kozerski // *Appl. Sci.* 2020, 10(15), 5153; <https://doi.org/10.3390/app10155153>
13. The effect of increasing the air flow pressure on the properties of coatings during the arc spraying of cored wires./ Student Mykhailo, Gvozdet'sky Volodymyr, Student Oleksandra, Prentkovskis Olegas, Maruschak Pavlo, Olenyuk Olena, Titova Liudmyla. *Strojnícky časopis - Journal of Mechanical Engineering* 69(4):133-146 December 2019, DOI:10.2478/scjme-2019-0048
14. Mechanical Properties of Arc Coatings Sprayed with Cored Wires with Different Charge Compositions / Student M. et al. *Coatings*. 2022. №12(7). 925.
15. Абразивна зносостійкість та трибологічні характеристики електрометалізаційних композиційних покриттів / М.М. Студент та ін. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2022. № 1. С. 90-97.

References

1. Prospects for the use of plasma spraying in the restoration of the surfaces of the cylinder rods of aviation equipment / S.V. Ustinov, I.O. Bulich, G.O. Shumilin Collection of Scientific Works of the State Research Institute of Aviation.
2. Yu. Borisov, A. Borisova, L. Adeeva, A. Tunik, M. Panko Thermal sprayed coatings containing quasicrystalline phase, their properties and application / *Physics and chemistry of solid state* т. 6, № 1 (2005) с. 124-136 v. 6, № 1 (2005). P. 124-136
3. Danial Qadir, Rabia Sharif, Rizwan Nasir, Ali Awad /A review on coatings through thermal spraying // *Chemical Papers* 78(2) September 2023, DOI:10.1007/s11696-023-03089-4
4. Iron-based coatings arc-sprayed with cored wires for applications at elevated temperatures / Wielage B. et al. *Surface and coating technology*. 2013. № 220. P. 27–35.
5. Arc-sprayed iron-based coatings for erosion-corrosion protection of boiler tubes at elevated temperatures / Pokhmurskyi V. I. et al. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2013. Vol. 22. P. 34-41
6. Optimization of the Chromium Content of Powder Wires of the Fe–Cr–C and Fe–Cr–B Systems According to the Corrosion Resistance of Electric-Arc Coatings / Stupnyts'kyi T.R. et al. *Materials Science*. 2016. Vol. 52, № 2. P. 165–172.
7. Abrasive Wear Resistance and Tribological Characteristics of Electrometallized Composite Coatings / Student, M.M. et al. *Materials Science*. 2022, 58(1). P. 96–104
8. Student, M. M., Pokhmurs'ka, H. V., Hvozdet'skyj, V. M. et al. (2018). Bahatofunktsional'ni elektroduhovi pokryttia [Multifunctional electric arc coatings]. Lviv : Prostir-M [in Ukrainian].
9. Mechanical properties of arc coatings sprayed with cored wires with different charge compositions / Student, M.; Hvozdet'skyi, V.; Stupnytskyi, T.; Student, O.; Maruschak, P.; Prentkovskis, O.; Skačkauskas, P. *Coatings*, 2022, 12(7), 925. DOI:10.3390/coatings12070925
10. Student, M.M. et al. (2020). Vplyv diametra elektrodnykh poroshkovykh drotiv na mekhanichni kharakterystyky elektroduhovykh pokryttiv [The effect of the diameter of the electrode flux-cored wires on the mechanical characteristics of electric arc coatings]. *Tsentral'noukrains'kyj naukovyj visnyk. Tekhnichni nauky - Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences*, 3(34), 32-44 [in Ukrainian].
11. Application of Functional Coating in Delaying the Corrosion of Titanium Alloys: A Review, Chapter, Jun 2024 / Obidimma Ikeh, Ugochukwu Okoli, Amamchukwu Ilogebe, // *Corrosion Engineering - Recent Breakthroughs and Innovative Solutions*, Submitted: 24 June 2024 DOI: 10.5772/intechopen.1005679
12. Review of Functionally Graded Thermal Sprayed Coatings / Leszek Łatka, Lech Pawłowski, Marcin Winnicki, Paweł Sokołowski, Aleksandra Małachowska, Stefan Kozerski // *Appl. Sci.* 2020, 10(15), 5153; <https://doi.org/10.3390/app10155153>

13. The effect of increasing the air flow pressure on the properties of coatings during the arc spraying of cored wires./ Student Mykhailo, Gvozdetsky Volodymyr, Student Oleksandra, Prentkovskis Olegas, Maruschak Pavlo, Olenyuk Olena, Titova Liudmyla. *Strojnícky časopis - Journal of Mechanical Engineering* 69(4):133-146 December 2019, DOI:10.2478/scjme-2019-0048
14. Mechanical Properties of Arc Coatings Sprayed with Cored Wires with Different Charge Compositions / Student M. et al. *Coatings*. 2022. №12(7). 925.
15. Student M.M., et al. (2022). Abrazyvna znosostijkist' ta trybolohichni kharakterystyky elektrometalizatsijnykh kompozytsijnykh pokryttiv [Abrasive wear resistance and tribological characteristics of electrometallization composite coatings]. *Fyzyko-khimichna mekhanika materialiv – Physicochemical Mechanics of Materials*, 1, 90-97 [in Ukrainian].

Volodymyr Hvozdetskii, PhD tech. sci., Senior Research, **Mykhajlo Student**, Prof., leading researcher, **Khrystyna Zadopozna**, PhD tech. sci., Senior Research

Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine

Sergiy Markovych, Assos. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine

Influence of Metal Base Material on Mechanical Characteristics of Arc-Deposited Coatings

Aluminum alloys are characterized by low abrasive wear resistance, which significantly hinders their widespread use in technological environments, especially in the presence of abrasive particles. Recently, there has been a trend to replace steels with aluminum alloys with wear-resistant coatings. This makes it possible to reduce, firstly, the weight of parts, and secondly, carbon dioxide emissions into the atmosphere and the greenhouse effect. In the process of spraying wear-resistant coatings on a steel base, significant tensile stresses arise in the coating, which can lead to the appearance of micro and macro cracks in the coatings. There is no reliable data in the literature on the cohesive strength and level of stresses that are formed in powder wire coatings sprayed on a base of aluminum alloys, which hinders the development of a technology for restoring aluminum alloy parts by electric arc spraying.

The purpose of the work: to investigate the mechanical characteristics of electric arc coatings sprayed on samples of aluminum alloy D16 and compare them with the mechanical characteristics of coatings sprayed on a steel base with the same parameters.

For spraying, an electrometallizer with a coating spraying system with two vertically arranged air channels was used to form a supersonic air flow velocity (with a Mach number of 2). Electric arc coatings sprayed on a steel or aluminum base have a typical lamellar structure. When using a supersonic air jet (pressure 1.2 MPa) compared to a subsonic (pressure 0.6 MPa) coating has a more dispersed structure and a smaller number of pores. In the structure of coatings sprayed onto an aluminum base, significantly fewer pores and microcracks were recorded. On the surface of aluminum alloys, there is always a natural refractory film with $T_{pl} = 2050^{\circ}\text{C}$, which significantly reduces the adhesion strength of coatings to the aluminum base. The use of an exothermic charge ($\text{FeCr}+\text{B}_4\text{C}$) increased the temperature of the melt droplets to 2400°C , which facilitated the melting of the surface film Al_2O_3 and the fusion of droplets with the aluminum base, and as a result, the adhesion strength of the coating to the base increased by 70% to 50 MPa. To assess the operability of coatings, a new parameter was introduced, namely the ratio between the values of the residual tensile stresses of the first kind and the cohesive strength - σ_{col}/σ_v . It was determined that the formation of cracks begins at the values of this indicator $\sigma_{col}/\sigma_v > 0,75$, while at $\sigma_{col}/\sigma_v > 0,85$ a network of cracks appears in the coatings.

Conclusions. 1. The use of a supersonic air jet for spraying coatings increases the kinetic energy of the droplets forming the coating, and, as a result, increases the cohesive strength of the coatings and reduces the magnitude of the residual tensile stresses of the first kind in them on a steel and aluminum base.

2. The ratio of the residual tensile stresses of the first kind in coatings σ_{col} to their cohesive strength σ_v (σ_{col}/σ_v) is proposed to be used as an indicator of the coating's resistance to cracking. Based on the analysis of the obtained coatings, it is shown that cracks begin to form in coatings for which the indicator $\sigma_{col}/\sigma_v > 0.75$, while at $\sigma_{col}/\sigma_v > 0.85$ a network of cracks appears in the coatings.

3. The level of tensile stresses of the first kind in coatings sprayed onto an aluminum base is lower than in coatings sprayed onto steel, which is due to the greater coefficient of thermal expansion of the aluminum alloy D16 than that of steel St3.

Arc-Deposited Coatings, spraying mode, spraying mode, cohesive strength

Одержано (Received) 01.11.2024

Прорецензовано (Reviewed) 10.12.2024

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2024

УДК 621.793.6:669.018.6:631.3

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.82-94](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.82-94)

І.М. Рибалко, доц., д-р техн. наук, **О.В. Тіхонов**, доц., канд. техн. наук,
А.В. Захаров, асп.

Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна
e-mail: zakharovandrey1997@gmail.com

Вплив модифікуючих домішок на мікроструктуру та властивості наплавлених електрошлаковим наплавленням шарів для відновлення плужних лемішів та культиваторних стрілчастих лап

У статті досліджено вплив модифікуючих домішок, таких як карбіди ніобію (NbC), цирконієві оксиди (ZrO₂), графіт та інші, на мікроструктуру, механічні, корозійні та трибологічні властивості наплавлених шарів, отриманих електрошлаковим методом. Основною метою дослідження є покращення експлуатаційних характеристик робочих органів сільськогосподарських знарядь, таких як плужні леміші та культиваторні стрілчасті лапи, шляхом нанесення спеціальних наплавлених шарів. У роботі розглянуто вплив різних типів модифікуючих домішок на мікроструктурні зміни та властивості наплавлених шарів, а також оцінено ефективність застосування таких шарів для відновлення сільськогосподарських деталей.

Запропоновані матеріали та методи можуть бути використані для підвищення ефективності технічного обслуговування та зменшення витрат на заміну деталей у сільськогосподарському секторі. **наплавлення, мікроструктура, мікротвердість, електрошлаковий метод, порошкові дроти, модифікуючі домішки, плужні леміші, культиваторні лапи, зносостійкість, математична модель, економічна ефективність, трибологічні властивості**

Постановка проблеми. Зносостійкість робочих органів сільськогосподарських знарядь є критичним фактором, що визначає ефективність їхньої роботи. Абразивний характер зношування обумовлений постійним контактом із ґрунтом, який містить пісок, глину, мінерали, а також органічні включення, що сприяє швидкому зношуванню. Низька зносостійкість робочих органів призводить до збільшення витрат на технічне обслуговування, зниження продуктивності машин, а також додаткових витрат на матеріали і робочу силу.

Рішенням цієї проблеми є відновлення з використанням наплавлення спеціальних композиційних матеріалів. Це дозволяє не тільки продовжити термін служби деталей, але й знизити загальні витрати на обслуговування. Впровадження електрошлакового методу наплавлення та використання модифікуючих домішок, таких як NbC, ZrO₂ та графіт, дозволяє створити наплавлені шари з покращеними експлуатаційними характеристиками.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження у сфері відновлення та зміцнення робочих органів сільськогосподарських машин, зокрема плужних лемішів та культиваторних стрілчастих лап, зосереджені на застосуванні різних методів наплавлення та модифікування мікроструктури наплавлених шарів для підвищення їх зносостійкості та довговічності [1].

Модифікування мікроструктури наплавлених шарів. Дослідження показують, що введення модифікуючих та мікролегуєчих домішок у наплавлений метал сприяє покращенню його структури та властивостей. Зокрема, використання хімічного способу введення елементів-модифікаторів через шихту порошкових електродних дротів є простим і раціональним методом модифікування.

Вплив алюмінію та магнію на мікроструктуру наплавлених шарів. Дослідження впливу додавання алюмінію та магнію до порошкового дроту ПД Cr5B3 показали, що такі добавки змінюють мікроструктуру наплавлених шарів, округлюючи дендритні осі та зменшуючи їх розміри. Це призводить до підвищення ударної зносостійкості наплавленого шару [2, 9].

Відновлення та зміцнення стрілчастих лап культиваторів. Аналіз різних методів виготовлення, зміцнення та відновлення стрілчастих лап культиваторів свідчить про ефективність застосування зносостійких матеріалів, термічної обробки, хіміко-термічного зміцнення, наплавлення, газотермічного напилення, металокерамічних покриттів, пластичного деформування та лазерних технологій. Зокрема, відновлення лап культиватора може передбачати заміну ріжучої частини, оскільки з часом відбувається деградація металу, і традиційні методи відновлення стають економічно неефективними [3, 8].

Відновлення плужних лемішів двошаровим наплавленням. Оптимізація технологічних прийомів відновлення зношених плужних лемішів за допомогою двошарового наплавлення з одночасним зміцненням показала ефективність цього підходу на піщаних, супіщаних і суглинистих ґрунтах [4].

Вплив карбідів на структуру та властивості наплавлених шарів. Дослідження впливу карбідів на структуру та властивості наплавлених шарів виявили, що оптимальне поєднання наплавного матеріалу та зміцнювача сприяє формуванню шарів, стійких до дії абразиву. Запропоновано схему орієнтування зон підвищеної твердості для уповільнення розвитку початкового дефекту при дії газопилового потоку [5-6].

Таким чином, сучасні дослідження спрямовані на вдосконалення методів наплавлення та модифікування мікроструктури наплавлених шарів з метою підвищення зносостійкості та довговічності робочих органів сільськогосподарських машин.

Постановка завдання. Метою дослідження є вивчення впливу різних типів модифікуючих домішок на мікроструктуру, механічні, корозійні та трибологічні властивості наплавлених шарів. Також мета полягає у розробці математичної моделі для прогнозування показників зношування наплавлених шарів, а також проведенні оцінки економічної ефективності застосування запропонованих технологій у сільськогосподарському виробництві.

Для досягнення мети поставлені наступні завдання:

1. Дослідити вплив модифікуючих домішок на формування мікроструктури наплавлених шарів.
2. Оцінити зміни механічних, корозійних та трибологічних характеристик при використанні різних модифікуючих домішок.
3. Розробити та перевірити математичну модель для прогнозування зношування наплавлених шарів.
4. Провести польові випробування та оцінити економічну ефективність запропонованого методу відновлення робочих органів.

Викладення основного матеріалу. Для проведення досліджень використовували низьковуглецеву сталь марки 20, яка широко використовується для виготовлення робочих органів сільськогосподарської техніки. Для наплавлення використовували порошкові дроти діаметром 2,8 мм, хімічний склад яких було

розроблено для досягнення оптимальних експлуатаційних характеристик наплавленого шару. До складу дротів входили:

- Карбіди ніобію (NbC): дозволяють утворювати тверді карбідні включення, що значно підвищують твердість і зносостійкість шару.
- Оксиди цирконію (ZrO_2): забезпечують стабільність структури і збільшують стійкість до перегріву.
- Графіт: введення графіту знижує коефіцієнт тертя та сприяє покращенню зносостійкості шляхом зменшення адгезії ґрунтових частинок [7].
- Ферохром: утворює хромисті включення, що підвищують корозійну стійкість наплавленого шару.

Перед початком наплавлення було проведено хімічний аналіз основного металу та порошкових дротів. Аналіз проводився методом спектрометрії, що дозволило визначити основні компоненти та домішки. Визначення вмісту вуглецю, хрому, нікелю, марганцю та кремнію проводилось для оцінки впливу кожного з них на мікроструктуру та механічні властивості отриманого шару.

Наплавлення проводилось електрошлаковим методом на спеціально підготовлених зразках з використанням таких параметрів:

- Сила струму: 250 А.
- Напруга: 25 В.
- Швидкість наплавлення: 15-20 мм/хв, що забезпечувало рівномірне формування наплавленого шару.
- Витрата дроту з модифікуючими домішками становить: 1-1,2 кг/год

Процес наплавлення контролювався за допомогою системи автоматичного керування, що дозволяло підтримувати стабільність дуги та температуру розплавленого металу. Використовували дві технології охолодження: повітряне охолодження для отримання грубозернистої структури та водяне охолодження для створення дрібнозернистої структури з підвищеною твердістю.

Зразки піддавалися шліфуванню та поліруванню для проведення металографічного аналізу. Використовувався оптичний мікроскоп для визначення структури, а скануючий електронний мікроскоп (SEM) для детального вивчення фази та морфології включень. Травлення здійснювалося розчином азотної кислоти з метою виявлення меж зерен.

Для вимірювання твердості використовувався метод Віккерса з навантаженням 100 г. Було здійснено понад 50 вимірювань на кожному зразку для визначення однорідності твердості наплавленого шару.

Зразки піддавалися дії агресивного середовища (3% розчин NaCl) протягом 96 годин для оцінки стійкості до корозії. Після випробувань визначали зміну ваги, візуально оцінювали поверхневі пошкодження та проводили аналіз за допомогою SEM.

Зносостійкість оцінювалася за допомогою лабораторних випробувань на абразивному крузі, а також польових випробувань на плужних лемішах та культиваторних лапах. Додатково оцінювалися трибологічні властивості наплавлених шарів за методом "шар-цикл" для визначення коефіцієнта тертя.

Для створення математичної моделі зношування враховували такі параметри:

- Мікроструктурні характеристики (D , V_f): розмір зерен та кількість твердих фаз.
- Механічні властивості (H_v): мікротвердість як основний показник стійкості до абразивного зношування.
- Експлуатаційні умови (L): навантаження та абразивність ґрунту.

Модель використовувала регресійний аналіз для визначення залежності між параметрами мікроструктури та експлуатаційними властивостями.

Також було створено графіки, що ілюструють залежність зношування від розміру зерен та кількості твердих включень (рис. 1-2).

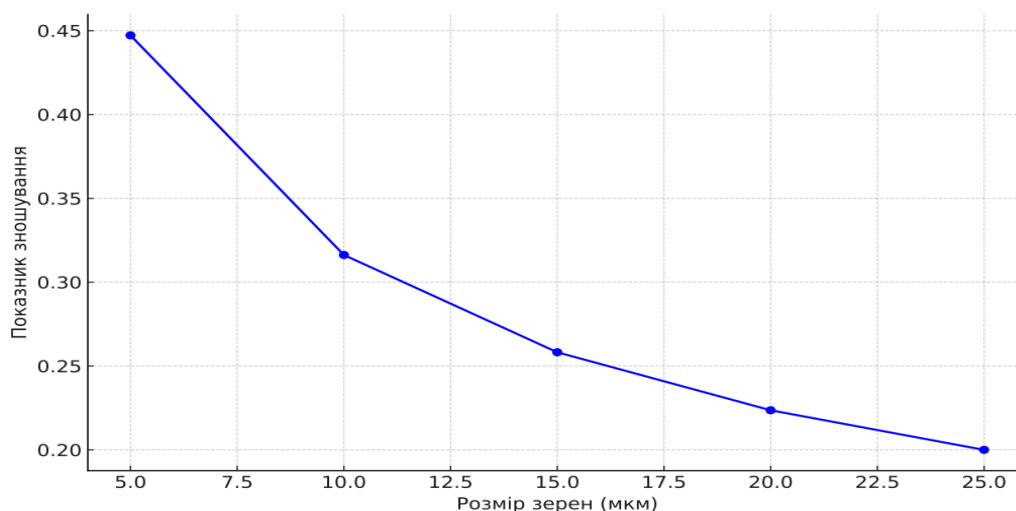


Рисунок 1 - Графік залежності зношування наплавленого металу від розміру зерен

Джерело: розроблено авторами

Показник зношування – це величина, яка характеризує ступінь втрати матеріалу внаслідок механічного під час експлуатації. У межах проведених досліджень цей показник визначався за допомогою лабораторних і польових випробувань, а також прогнозувався за допомогою математичної моделі.

1. Лабораторні випробування: Зносостійкість матеріалів оцінювалася за допомогою тестів на абразивному крузі, де вимірювалася маса зразків до і після експлуатаційних циклів. Показник зношування визначався як втрата маси зразка (г) після заданої кількості циклів.

2. Польові випробування: Зразки робочих органів сільськогосподарської техніки, відновлені наплавленням, випробовувалися в реальних умовах експлуатації. Після визначення маси до і після польових випробувань оцінювалася втрата матеріалу внаслідок зношування.

3. Математична модель для прогнозування зношування: Для оцінки зносостійкості було розроблено математичну модель, що враховує основні параметри мікроструктури та механічних властивостей матеріалів.

4. Критерії вимірювання: Визначення показника зношування проводилося шляхом вимірювання масових втрат зразків, оцінки змін у мікроструктурі за допомогою оптичного й електронного мікроскопів, а також трибологічних випробувань.

Отримані дані дозволяють точно оцінювати зносостійкість матеріалів, визначати оптимальні параметри наплавлення та прогнозувати довговічність робочих органів сільськогосподарської техніки.

На даному графіку представлено залежність показника зношування від розміру зерен. Виявлено, що зі збільшенням розміру зерен, показник зношування зменшується. Це свідчить про те, що грубозерниста структура має більшу стійкість до абразивного зношування порівняно з дрібнозернистою. Тобто, чим більший розмір зерен, тим вища ефективність захисту від зношування.

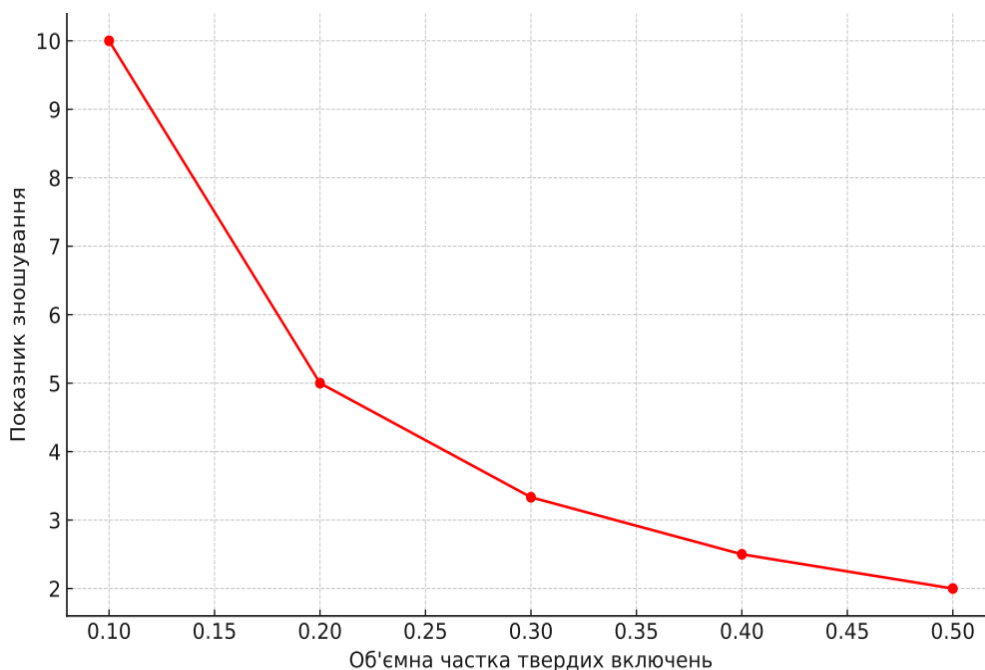


Рисунок 2 - Графік залежності зношування від кількості твердих включень

Джерело: розроблено авторами

На графіку представлено залежність показника зношування від об'ємної частки твердих включень. З аналізу видно, що зі збільшенням кількості твердих включень показник зношування зменшується, що вказує на підвищення зносостійкості. Введення твердих включень, таких як карбіди, покращує структуру матеріалу, сприяючи формуванню стабільних твердих фаз, які чинять опір абразивному зношуванню.

За результатами проведених досліджень встановлено, що:

1. збільшення розміру зерен призводить до зниження показника зношування, що свідчить про підвищення зносостійкості;
2. збільшення кількості твердих включень також сприяє підвищенню зносостійкості матеріалу;
3. оптимальне поєднання розміру зерен та кількості твердих включень може бути використане для підвищення ефективності відновлення та збільшення терміну служби робочих органів сільськогосподарської техніки;
4. для підвищення зносостійкості наплавлених шарів рекомендується використовувати модифікуючі добавки, які забезпечують грубозернисту структуру та високий вміст твердих включень;
5. подальші дослідження мають бути спрямовані на визначення оптимального співвідношення розміру зерен та кількості включень для забезпечення найвищої зносостійкості.

Також були розроблені прогнозні криві для різних типів модифікуючих домішок, що дозволило оцінити оптимальні параметри наплавлення для підвищення зносостійкості (рис. 3). А також проведено порівняння зносостійкості різних зразків (табл.1).

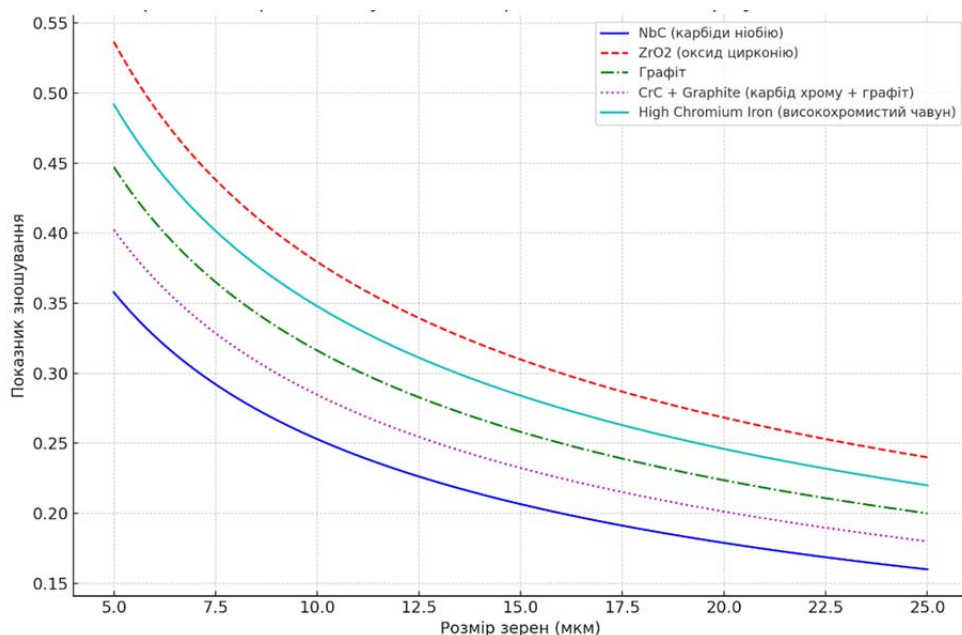


Рисунок 3 - Графік прогнозних кривих зношування для різних типів модифікуючих домішок

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 1 – Зносостійкість різних зразків

| Зразок | Твердість (МПа) | Зносостійкість (у.о.) | Корозійна стійкість (у.о.) |
|---------------------------------|-----------------|-----------------------|----------------------------|
| Дріт №1 (Ферохром) | 5597 | 8.5 | 9.0 |
| Дріт №3 (Високохромистий чавун) | 4825 | 7.3 | 8.0 |
| Дріт №5 (NbC, Ni) | 4943 | 9.0 | 10.0 |
| Дріт №6 (CrC, графіт) | 3773 | 6.5 | 7.5 |
| Дріт №7 (ZrO ₂) | 1642 | 5.8 | 6.5 |

Джерело: розроблено авторами

Дослідні зразки виготовлялися у вигляді циліндрів розміром 60 мм × 70 мм × 20 мм, на які наносили багат шарове наплавлення. Особлива увага приділялася:

- підготовці поверхні: перед наплавленням поверхню зразків очищали від окалини і знежирювали, що забезпечувало максимальну адгезію наплавленого шару до основного металу;
- наплавленню: багат шарове нанесення дозволяло досягти оптимальної товщини та забезпечити рівномірність розподілу модифікуючих домішок у структурі наплавленого металу;
- контролю процесу: під час наплавлення використовувалася система автоматичного контролю температури та електричних параметрів, що дозволяло уникнути перегріву металу.

Результати металографічного аналізу показали, що введення NbC сприяло утворенню рівномірно розподілених карбідних включень, які зменшували схильність до утворення грубозернистих структур. Зразки, охолоджені у воді, мали дрібнозернисту

структуру із середнім розміром зерна 8-10 мкм, що сприяло підвищенню механічної міцності.

Вимірювання твердості показало, що найбільше значення було досягнуто для зразків із додаванням NbC – до 4943 МПа. Аналіз розподілу мікротвердості свідчить про її однорідність по всій площі наплавленого шару, що є важливим для забезпечення рівномірного зношування деталей.

Зразки з додаванням ферохрому після дії на них 3% розчину NaCl показали мінімальне зниження ваги, що свідчить про ефективність формування хромистого пасивуючого шару. Втрата ваги зразків без модифікуючих домішок була на 20-25% вищою.

Результати дослідження трибологічних властивостей показали, що коефіцієнт тертя для зразків із графітом був на 15-20% нижчим порівняно із зразками без модифікацій. Зносостійкість зразків із додаванням NbC у лабораторних умовах показала зменшення зношування на 30% порівняно з немодифікованими зразками. Під час польових випробувань зносостійкість таких зразків була навіть вищою через зменшення адгезії ґрунтових частинок.

Розроблена математична модель використовувалася для прогнозування зносостійкості залежно від складу та мікроструктури наплавленого шару. Модель дозволила ідентифікувати оптимальні умови наплавлення та склад модифікуючих домішок для досягнення найкращих експлуатаційних характеристик.

Плужні леміші та культиваторні стрілчасті лапи, відновлені наплавленням із модифікуючими домішками, були протестовані під час польових випробувань на різних типах ґрунтів. Тривалість експлуатації відновлених деталей була на 25-30% довшою порівняно з немодифікованими зразками. Оператори зазначали покращення експлуатаційних характеристик, зокрема зниження тертя та зменшення витрат пального.

У процесі електрошлакового наплавлення модифікуючі домішки вводилися безпосередньо через хімічний склад порошкових дротів, які застосовувалися для формування наплавленого шару. Зокрема, такі домішки, як карбіди ніобію (NbC), оксиди цирконію (ZrO_2) та графіт, входили до складу дроту і рівномірно розподілялися в наплавленому металі в процесі його плавлення та кристалізації.

Однак, шлак також відіграв важливу роль у стабілізації процесу наплавлення та впливі на кінцеві властивості наплавленого шару. Він забезпечував:

Захист зони наплавлення від впливу кисню та азоту, що зменшувало ймовірність утворення дефектів.

Контроль структури металу шляхом впливу на процеси кристалізації.

Таким чином, домішки вводилися не безпосередньо у шлак, а через склад дротів, але їхній вплив реалізовувався під час формування наплавленого шару завдяки умовам, створеним у шлаковій ванні.

Результати та обговорення. Модифікуючі домішки значно впливають на кінцеві властивості наплавлених шарів. Додавання карбідів ніобію забезпечує формування стабільних карбідних фаз, що значно підвищує твердість і зносостійкість. Оксиди цирконію сприяють стабілізації структури та підвищенню термостійкості, що особливо важливо для деталей, що працюють при високих навантаженнях (табл.2).

Таблиця 2 – Вплив модифікуючих домішок на властивості наплавлених шарів

| Тип дроту | Модифікуючі домішки | Мікроструктура | Мікротвердість, МПа | Зносостійкість (у.о.) | Корозійна стійкість (у.о.) |
|-----------|-----------------------|--------------------------------------|---------------------|-----------------------|----------------------------|
| №1 | Ферохром | Хромистий ферит + евтектика | 5597 | 8.5 | 9 |
| №3 | Високохромистий чавун | Голчастий троостит | 4825 | 7.3 | 8 |
| №5 | NbC, Ni | Карбідна фаза з феритом | 4943 | 9.0 | 10 |
| №6 | CrC, графіт | Перлітна структура | 3773 | 6.5 | 7.5 |
| №7 | ZrO ₂ | Нелегований ферит + ZrO ₂ | 1642 | 5.8 | 6.5 |

Джерело: розроблено авторами

Розробка математичної моделі. Математична модель, яка була розроблена для прогнозування зношування наплавлених шарів, базується на аналізі основних параметрів мікроструктури та механічних властивостей наплавленого шару, таких як розмір зерен, кількість та тип твердих включень, твердість, а також умови експлуатації. Модель дозволяє оцінити зносостійкість залежно від вибору матеріалів для наплавлення та технологічних параметрів.

Основними змінними в моделі є:

- Розмір зерен (D), який впливає на міцність матеріалу та його стійкість до абразивного зношування.
- Об'ємна частка твердих включень (Vf), що сприяють підвищенню зносостійкості.
- Мікротвердість (Hv), яка є важливим показником загальної міцності наплавленого шару.
- Експлуатаційне навантаження (L), яке визначає вплив зовнішніх факторів на зношування матеріалу.

Математична модель для прогнозування зношування виглядає наступним чином:

$$W = k \cdot (D^{-0.5}) \cdot (Vf)^{-1} \cdot (Hv)^{-0.3} \cdot L$$

де W – показник зношування;

k – емпіричний коефіцієнт, що залежить від властивостей матеріалу та умов експлуатації;

D , V , f , Hv , та L – параметри, описані вище.

Результати моделювання

Розроблена модель була протестована на зразках з різними модифікуючими домішками, і результати моделювання добре співпали з експериментальними даними. Було виявлено, що зразки з карбідами ніобію (NbC) показали значно менше зношування порівняно з немодифікованими зразками, що підтверджує ефективність використання NbC для підвищення зносостійкості.

У дослідженні для електрошлакового наплавлення використовували порошкові дроти, склад яких спеціально розроблявся для досягнення високих експлуатаційних

характеристик наплавленого шару. Зокрема, у процесі моделювання та експериментів досліджували дроти з такими модифікуючими домішками:

- Дріт №1 – ферохром, який забезпечує утворення хромистого фериту та евтектики для підвищення корозійної стійкості.
- Дріт №5 – карбіди ніобію (NbC) та нікель, що формують карбідну фазу, підвищують твердість і зносостійкість.
- Дріт №6 – карбід хрому (CrC) та графіт, які сприяють зменшенню коефіцієнта тертя та покращують трибологічні властивості.
- Дріт №7 – оксиди цирконію (ZrO_2), які стабілізують структуру і підвищують термостійкість.

Для моделювання зношування переважно використовували дані зразків, наплавлених дротом №5 (NbC, Ni), через його високу ефективність у зменшенні показника зношування, що підтверджується як лабораторними, так і польовими випробуваннями. Саме цей дріт забезпечив формування стабільної карбідної фази та однорідної мікроструктури, які суттєво впливали на результати моделювання.

Отримані результати моделювання добре співпали з експериментальними даними, підтверджуючи високу точність прогнозів і ефективність використання дроту з модифікуючими домішками.

Для перевірки точності моделі було здійснено порівняння експериментальних значень зношування з прогнозованими значеннями, отриманими за допомогою моделі. Результати порівняння представлені у таблиці нижче (табл. 3).

Таблиця 3 – Порівняння прогнозованих і експериментальних значень зношування

| Тип наплавки | Прогнозоване зношування (г/цикли) | Експериментальне зношування (г/цикли) | Відхилення (%) |
|-------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|----------------|
| Без модифікування | 0.0021 | 0.0020 | 4.8 |
| NbC + графіт | 0.0011 | 0.0012 | 8.3 |
| NbC + ZrO_2 | 0.0013 | 0.0014 | 7.1 |

Джерело: розроблено авторами

Отримані результати свідчать про високу точність розробленої моделі, оскільки відхилення між прогнозованими та експериментальними значеннями не перевищує 10%. Це підтверджує можливість використання цієї моделі для оптимізації складу наплавлених шарів та вибору технологічних параметрів з метою підвищення їх експлуатаційних властивостей.

Розроблені наплавлені шари були випробувані в реальних польових умовах на плужних лемішах та культиваторних стрілочастих лапах. Зразки тестувалися на піщаних, супіщаних і суглинистих ґрунтах з метою оцінки їх зносостійкості під час експлуатації.

Результати польових випробувань показали, що використання наплавлених шарів із модифікуючими домішками, такими як NbC і графіт, дозволило збільшити термін служби робочих органів на 25-30% у порівнянні з немодифікованими зразками. Це підтверджує ефективність запропонованого методу відновлення та зміцнення робочих органів сільськогосподарської техніки (табл.4).

Таблиця 4 – Порівняння прогнозованих і експериментальних значень зношування

| Тип дроту | Прогнозоване зношування (г/цикли) | Експериментальне зношування (г/цикли) | Відхилення (%) |
|-----------|-----------------------------------|---------------------------------------|----------------|
| №1 | 0.0017 | 0.0018 | 5.6 |
| №5 | 0.0011 | 0.0012 | 8.3 |
| №6 | 0.0018 | 0.0019 | 5.3 |

Джерело: розроблено авторами

Економічна ефективність. Економічна ефективність у дослідженні оцінювалася шляхом порівняння витрат на експлуатацію сільськогосподарських деталей, відновлених за допомогою наплавлених шарів із модифікуючими домішками, із витратами на використання немодифікованих деталей. Основним критерієм було зниження витрат на обслуговування та ремонт, а також зменшення витрат на пальне завдяки покращенню трибологічних властивостей.

Розрахунок економічної ефективності

Вихідні дані для розрахунку:

Збільшення терміну служби деталей (%): визначалося як відношення тривалості експлуатації деталей із модифікованими наплавленими шарами до тривалості використання стандартних деталей:

$$\Delta T = \frac{T_{\text{модифіковані}} - T_{\text{стандартні}}}{T_{\text{стандартні}}} \times 100\%.$$

- Зниження витрат на технічне обслуговування та ремонт (%): розраховувалося як зменшення кількості замін деталей і пов'язаних витрат.
- Економія пального (%): оцінювалася як зниження енергетичних витрат завдяки зменшенню коефіцієнта тертя, що зменшує споживання пального.

Формула для економічної ефективності: Економічна ефективність у відсотках визначалася як:

$$EE = \frac{\Delta Z}{Z_{\text{базові}}} \times 100\%$$

де ΔZ – зменшення витрат на обслуговування, ремонт і пальне;

$Z_{\text{базові}}$ – витрати на обслуговування та експлуатацію стандартних деталей.

Економічна ефективність оцінювалася відносно стандартних (немодифікованих) зразків деталей, що експлуатувалися в аналогічних умовах. Це дозволило визначити відсоткову перевагу застосування модифікованих наплавлених шарів.

Встановлено, що використання модифікованих шарів дозволяє зменшити витрати на технічне обслуговування та ремонт на 20-25%, завдяки збільшенню терміну служби деталей.

Економія пального складала до 10%, завдяки зниженню коефіцієнта тертя.

Загальна економічна ефективність, враховуючи всі аспекти, становила 25-30% залежно від типу ґрунту та умов експлуатації (рис. 4).

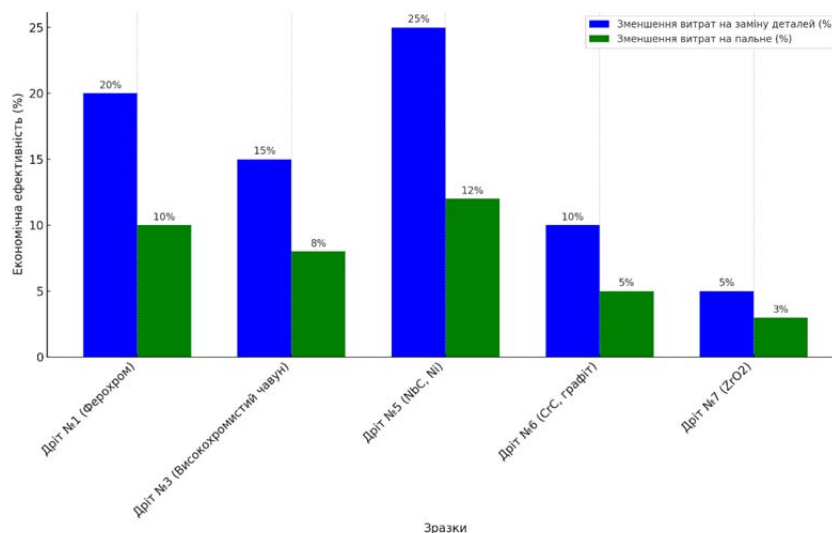


Рисунок 4 – Графік економічної ефективності різних зразків наплавки (враховуючи зменшення витрат на заміну деталей та паливне)

Джерело: розроблено авторами

Порівняння витрат:

- Зразки без модифікуючих домішок мали коротший термін служби, що призводило до частіших замін та збільшення витрат на ремонт.
- Зразки з модифікуючими домішками (карбіди ніобію, графіт, оксид цирконію) показали значно вищу зносостійкість, що дозволило зменшити кількість необхідних замін і, відповідно, знизити витрати на заміну деталей на 20-25%.

Загалом, застосування модифікованих наплавлених шарів дозволяє досягти економічної вигоди за рахунок:

- Зменшення витрат на ремонт і технічне обслуговування.
- Зниження витрат на паливне завдяки зменшенню коефіцієнта тертя.
- Підвищення продуктивності сільськогосподарської техніки та зменшення простоїв.

Економічна ефективність підтверджується зниженням загальних витрат на обслуговування техніки, підвищенням її надійності та економічністю використання.

Висновки:

1. Покращення зносостійкості через модифікацію складу наплавки: Використання різних модифікуючих домішок, таких як карбіди ніобію (NbC), оксид цирконію (ZrO₂), графіт, та карбід хрому, значно впливає на мікроструктуру наплавлених шарів. Це дозволяє досягти оптимального поєднання твердих фаз та пластичних компонентів, що забезпечує кращу зносостійкість та подовжує термін експлуатації.

2. Економічна ефективність застосування модифікуючих домішок: Використання модифікуючих домішок сприяє зменшенню витрат на технічне обслуговування, заміну деталей та знижує витрати на паливне за рахунок зменшення коефіцієнта тертя. У результаті, це дає змогу суттєво зменшити експлуатаційні витрати, що є особливо важливим для сільськогосподарської техніки, яка працює у важких умовах.

3. Порівняння різних типів модифікуючих домішок: Дослідження показало, що найбільш ефективними з точки зору зносостійкості є наплавки з додаванням карбідів ніобію (NbC) та карбіду хрому у поєднанні з графітом. Вони забезпечують високі показники твердості та відмінну зносостійкість, що підтверджується зменшенням показника зношування.

4. Вплив структури на зносостійкість та довговічність: Аналіз мікроструктури показав, що формування голчастого трооститу, легованого фериту та інших твердих фаз позитивно впливає на механічні властивості наплавлених шарів. Це дозволяє знизити ймовірність викришування та підвищити контактну міцність, що важливо для роботи в умовах інтенсивного абразивного зношування.

Подальші дослідження. Для досягнення максимальної ефективності необхідно оптимізувати співвідношення розміру зерен та кількості твердих включень. Це може бути досягнуто за допомогою ретельного підбору легуючих добавок та оптимізації процесу наплавки. Подальші дослідження мають бути зосереджені на визначенні найкращих поєднань компонентів, щоб забезпечити ще більшу стійкість до зношування та підвищити економічну ефективність процесу.

Список літератури

1. Дзюбик А. Р., Войтович А. А., Дзюбик Л. В. Оптимізація технології наплавлення зносостійких шарів на плоскі елементи конструкцій // *Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні*. 2016. Вип. 50. С. 103–110.
2. Перемитко В. І. Підвищення опірності зносу металу за рахунок додавання вуглеводнів до складу порошкового дроту при електродуговому напавленні // *Актуальні проблеми сучасної науки*. 2024. С. 119–120.
3. Коржик В. М., Гуменюк Ю. П., Кондратенко В. В. Вплив способів дугового наплавлення на формування шарів та структуру металу // *Матеріали МНТК «Зварювання та споріднені технології»*. 2022. С. 207–209.
4. Сікорський Л. Б., Бірюкович Л. В. Вплив вмісту алюмінію на мікроструктуру і фазовий склад сплавів Ti-Si-Al // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2019. №1. С. 25–30.
5. Перемитко В. І. Вплив поздовжнього керуючого магнітного поля на ефективність процесу дугового наплавлення // *Автоматичне зварювання*. 2021. №8. С. 25–29.
6. Похмурська Г.В., Студент М.М., Войтович А.А. Модифікування мікроструктури наплавлених шарів на основі порошкового дроту ПДСr10В4 із додаванням Al, Mg // *Проблеми трибології*. — 2015. №3. С. 98–101.
7. Рибалко І. М., Тіхонов О. В., Захаров А.В. Розроблення способу підвищення зносостійкості культиваторних стрілочастих лап: тези VIII Міжнародної науково-технічної конференції «Крамаровські читання». Київ: НУБіП України, 2021. С. 68-71.
8. Скобло Т. С., Нанка О. В., Сайчук О. В., Рибалко І. М., Марков О. В., Захаров А.В. Теоретична оцінка особливостей структуроутворення при введенні вуглецевмісних порошкових композицій в покриття: стаття. *Інформаційно-аналітичний міжнародний технічний журнал «Промисловість в Фокусі»*. Харків, 2021. № 5 (101). С. 52-56.
9. Рибалко І. М., Сайчук О. В., Захаров А.В. Електрошлакова наплавка поверхонь виробів композиційними зносостійкими домішками: тези IX Міжнародної науково-технічної онлайн конференції «Крамаровські читання». Київ: НУБіП України, 2022. С. 56-59.

References

1. Dziubyk, A. R., Voitovych, A. A., & Dziubyk, L. V. (2016). Optimization of the technology for surfacing wear-resistant layers on flat structural elements. *Automation of Production Processes in Mechanical Engineering and Instrument Making*, (50), 103–110. [in Ukrainian]
2. Peremytko, V. I. (2024). Increasing metal wear resistance by adding hydrocarbons to the composition of powder wire in arc surfacing. *Current Issues of Modern Science*, 119–120. [in Ukrainian]
3. Korzhyk, V. M., Humeniuk, Yu. P., & Kondratenko, V. V. (2022). Influence of arc surfacing methods on layer formation and metal structure. *Materials of the International Scientific and Technical Conference "Welding and Related Technologies"*, 207–209. [in Ukrainian]
4. Sikorskyi, L. B., & Biryukovych, L. V. (2019). Influence of aluminum content on the microstructure and phase composition of Ti-Si-Al alloys. *New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering*, (1), 25–30. [in Ukrainian]
5. Peremytko, V. I. (2021). Influence of longitudinal magnetic field on the efficiency of the arc surfacing process. *Automatic Welding*, (8), 25–29. [in Ukrainian]

6. Pokhmurska, H. V., Student, M. M., & Voitovych, A. A. (2015). Microstructure modification of surfaced layers based on PDCr10B4 powder wire with the addition of Al, Mg. *Problems of Tribology*, (3), 98–101. [in Ukrainian]
7. Rybalko, I. M., Tikhonov, O. V., & Zakharov, A. V. (2021). Development of a method to increase the wear resistance of cultivator arrow-shaped shovels. Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference “*Kramarovsky Readings*”. Kyiv: NUBiP of Ukraine, 68–71. [in Ukrainian]
8. Skoblo, T. S., Nanka, O. V., Saichuk, O. V., Rybalko, I. M., Markov, O. V., & Zakharov, A. V. (2021). Theoretical evaluation of structure formation features with the introduction of carbon-containing powder compositions in coatings. *Industry in Focus*. Kharkiv, (5/101), 52–56. [in Ukrainian]
9. Rybalko, I. M., Saichuk, O. V., & Zakharov, A. V. (2022). Electroslag surfacing of product surfaces with composite wear-resistant additives. Abstracts of the IX International Scientific and Technical Online Conference “*Kramarovsky Readings*”. Kyiv: NUBiP of Ukraine, 56–59. [in Ukrainian]

Ivan Rybalko, Assoc. Prof., DSc, **Oleksandr Tihonov**, Assoc. Prof., PhD tech.sci., **Andrii Zakharov**, post-graduate

State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine

Influence of Modifying Impurities on Microstructure and Properties of Electroslag Surfacing Layers for Restoration of Ploughshares and Cultivator Tines

The article investigates the influence of modifying impurities such as niobium carbides (NbC), zirconium oxides (ZrO_2), graphite and others on the microstructure, mechanical, corrosion and tribological properties of the deposited layers obtained by the electroslag method. The main objective of the study is to improve the performance of the working bodies of agricultural implements, such as ploughshares and cultivator tines, by applying special deposited layers. The paper discusses the influence of different types of modifying additives on microstructural changes and properties of the deposited layers, and evaluates the effectiveness of using such layers for the restoration of agricultural parts.

The use of niobium carbides and zirconium oxides can significantly increase the hardness and wear resistance of the deposited layers due to the formation of a stable microstructure with hard inclusions, which provides increased resistance to abrasive wear. Graphite, in turn, reduces the coefficient of friction, which reduces energy costs during operation and improves the efficiency of the restored parts. The article also presents the results of metallographic studies, microhardness measurements, corrosion and tribological tests, which confirm the effectiveness of using modifying additives to improve the properties of the deposited layers.

In addition to the experimental studies, a mathematical model was developed to predict the wear of the deposited layers. The model takes into account such parameters as microstructure, mechanical properties and operating conditions, which allows us to predict wear resistance and optimise the composition of deposited materials to ensure maximum service life of parts. The modelling results show high prediction accuracy, which is confirmed by experimental data.

The article also presents the results of field tests, which showed that the use of modified welded layers on ploughshares and cultivator tines can increase their service life by 25-30% compared to unmodified (factory) samples. This leads to a reduction in maintenance costs and an increase in the economic efficiency of agricultural production. An economic analysis has been carried out, which shows a reduction in the cost of maintenance and repair of equipment due to the use of linings with improved properties.

Thus, the results of the study show that the application of the electroslag surfacing method with the use of modifying additives is a promising approach to restore agricultural working bodies, increase their wear resistance and reduce operating costs. The proposed materials and methods can be used to increase the efficiency of maintenance and reduce the cost of replacing parts in the agricultural sector.

surfacing, microstructure, microhardness, electroslag method, flux-cored wires, modifying additives, ploughshares, cultivator tines, wear resistance, mathematical model, economic efficiency, tribological properties

Одержано (Received) 05.12.2024

Прорецензовано (Reviewed) 11.12.2024

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2024

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 681.5.004.8

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.95-103](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.95-103)

Р.Ю. Бойко, асп., **В.В. Аулін**, проф., д-р техн. наук, **А.А. Тихий**, доц., канд. техн. наук, **С.О. Карпушин**, доц., канд. техн. наук, **О.П. Коваль**, асп.

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: mr.r.boiko@gmail.com, aulinvv@gmail.com*

Інтеграція штучного інтелекту в системи підтримки прийняття рішень в оптимізації виробничих процесів машинобудівного підприємства на прикладі машинного навчання

У статті представлено комплексний огляд систем підтримки прийняття рішень в галузевому машинобудуванні на основі штучного інтелекту у контексті Індустрії 4.0. Проаналізовано підходи до інтеграції та обробки даних, а також основні методи машинного та глибокого навчання, що формують технологічне підґрунтя таких рішень. Окреслено архітектуру, типові етапи впровадження і запропоновано план інтеграції штучного інтелекту для машинобудівного підприємства, включно з описом складових рішення та ключових стратегій розгортання. Розглянуто потенційні виклики й надано рекомендації щодо успішної реалізації. Результати впровадження можуть значно скоротити незаплановані простой устаткування, підвищити ефективність виробництва й забезпечити підприємствам суттєву конкурентну перевагу.

штучний інтелект, машинне навчання, глибоке навчання, система підтримки прийняття рішень, прогнозне технічне обслуговування, контроль якості, оптимізація виробничих процесів

Постановка проблеми. Сучасні машинобудівні підприємства постають перед викликами, пов'язаними зі швидкозмінними умовами ринку, зростанням конкуренції та необхідністю оперативно ухвалювати управлінські рішення в реальному часі. Традиційні методи аналізу даних часто не встигають обробляти великі обсяги різномірної інформації — від показників функціонування обладнання до логістичних ланцюгів його постачання. У результаті збільшується ризик незапланованих простоїв, підвищуються витрати на обслуговування, а також виникають збої в ланцюгах постачання. Штучний інтелект (ШІ), зокрема машинне та глибоке навчання, дають змогу автоматизувати й прискорювати процес ухвалення рішень, виявляти приховані закономірності й запобігати поломкам до їх фактичного настання. Однак інтеграція цих рішень вимагає продуманого підходу: від правильної архітектури системи та якісних даних до врахування людських і організаційних факторів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Згідно з дослідженнями, машинобудівні системи швидко розвиваються у напрямку IoT-орієнтованої аналітики, що потребує ефективного збирання та обробки великих масивів даних у реальному часі [1,2]. Вчені наголошують на можливостях ШІ у прогнозованому технічному обслуговуванні машин і обладнання та операційній оптимізації, де алгоритми машинного навчання допомагають мінімізувати їх простой і енергоспоживання [3,4]. Дослідники Джордан та Мітчел звертають увагу на те, що машинне навчання перетворює великі дані на «операційний інтелект» [5], а Крієгескорт та Талєб підкреслюють здатність глибокого

навчання автоматично вилучати складні ознаки з різномірної інформації (зображень, часових рядів, сенсорних показників) [6,7]. У працях Саркера проаналізовано архітектурні аспекти систем підтримки рішень, зокрема важливість попередньої обробки даних, інтеграції з системами управління виробничими операціями на машинобудівному підприємстві, планування ресурсів та застосування контейнеризованих середовищ (Docker, Kubernetes) [8]. Кластеризацію проблем і стратегій розгортання викладено в дослідженнях Сільви, де мова йде про пакетну обробку, обчислення в реальному часі та онлайн-навчання [9].

Таким чином, в дослідженнях використання ШІ на машинобудівних підприємствах висвітлено його переваги та підтверджено потребу в комплексному підході до інтеграції систем машинного та глибокого навчання з точки зору архітектури, безпеки й організаційного менеджменту виробничих процесів.

Постановка завдання. Дослідити існуючі підходи до впровадження ШІ у системи підтримки прийняття рішень (СППР) в організації і функціонування виробничих процесів на машинобудівних підприємствах в межах Індустрії 4.0, акцентуючи увагу на специфічних потребах машинобудівного підприємства. Сформулювати послідовність інтеграції рішень у виробничих процесах машинобудівних підприємств на основі ШІ та виявити можливість використання при складанні більш деталізованих інтеграційних планів реалізації. Розробити рекомендації з проектування архітектури СППР, враховуючи обмеження на ризики, які присутні на сучасних машинобудівних підприємствах.

Виклад основного матеріалу. Здатність СППР організації і функціонування виробничих процесів на машинобудівних підприємствах на основі ШІ охоплювати великі обсяги різномірних даних із пристроїв Інтернету речей, датчиків, бізнес-систем тощо є критичною для промислових застосувань [1]. У промислових середовищах датчики можуть реєструвати стан обладнання, умови навколишнього середовища, споживання енергії тощо. Системи інтеграції (зокрема, Apache NiFi чи Talend) використовуються для попередньої обробки та уніфікації форматів, щоб формувати єдиний набір даних для алгоритмів штучного інтелекту [2].

Для вчасного реагування у виробничих процесах на машинобудівних підприємствах на потенційні збої або відхилення у виробничих процесах, дані часто обробляються в режимі реального часу. Це надважливо, наприклад, для прогнозного технічного обслуговування, коли своєчасні реакції дають змогу уникнути дорогих простоїв [9]. Такі платформи, як Apache Flink або Storm, забезпечують потокову обробку з низькою затримкою, тоді як додаткове застосування граничних обчислень дає змогу локалізувати обробку на самих вузлах збору даних.

У контексті виробничих процесів СППР на машинобудівних підприємствах на основі ШІ виконує прогноз поломок обладнання, визначаючи ймовірний час виходу з ладу деталей та пропонуючи оптимальні інтервали обслуговування [3]. Крім того, системи можуть безперервно стежити за ключовими показниками продуктивності, знаходити вузькі місця у виробництві та пропонувати шляхи зниження витрат на машинобудівному підприємстві. Це передбачає аналіз сигналів з сенсорів, історичних логів та управлінських даних задля поліпшеної якості й скорочення дефектів.

У межах Індустрії 4.0 саме машинне навчання слугує ключовим елементом для розбудови ефективних СППР у виробничих процесах машинобудівних підприємств. Використовуючи різні класи алгоритмів машинного навчання, машинобудівні підприємства отримують можливість навчатися на історичних і поточних даних, визначати тенденції, прогнозувати майбутні результати та надавати рекомендації операторам у режимі реального часу. Такий підхід мінімізує потребу у ручному

опрацюванні великих масивів інформації та значно спрощує пошук нових ідей та підходів щодо поліпшення організації і функціонування машинобудівного підприємства.

Машинне навчання забезпечує СППР здатністю навчатися на історичних та поточних даних, виявляти закономірності та генерувати висновки, які суттєво прискорюють розуміння ситуації, що склалася у виробничих процесах машинобудівного підприємства. Замість витратного ручного аналізу великого обсягу виробничих даних, машинне навчання дозволяє автоматизувати процес прийняття рішень і оперативно реагувати на потенційні проблеми або можливості вдосконалення організації і функціонування виробничих процесів на машинобудівному підприємстві.

Перед впровадженням машинного навчання необхідно визначити, який саме клас алгоритмів найдоцільніше застосувати в конкретному випадку. Кожен з них пропонує свої переваги та підходить для певного роду завдань. Нижче наведено порівняльний аналіз основних класів (табл. 1):

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз основних класів алгоритмів машинного навчання

| Клас алгоритмів | Переваги | Недоліки | Типові задачі |
|--------------------------|--|---|---|
| Контрольоване навчання | Чіткі та передбачувані результати завдяки наявній розмітці, висока точність моделей при достатній кількості розмічених даних, порівняно проста інтерпретація результатів | Потребує великого обсягу розмічених даних, ризик упередженостей у даних, залежність від повноти та якості розмітки | Прогнозне обслуговування, контроль якості, прогнозування виробничого навантаження |
| Неконтрольоване навчання | Не потребує попередньо розмічених даних, дозволяє виявити «приховані» патерни та аномалії, може вказати на невідомі раніше взаємозв'язки | Результати важче інтерпретувати, потрібен суттєвий доменний досвід для аналізу аномалій, не завжди дає однозначні висновки | Виявлення аномалій роботи обладнання, кластеризація виробничих процесів, формування груп обладнання за рівнями зношування, режимами роботи тощо |
| Підсилювальне навчання | Добре працює в умовах динамічних та багатокрокових завдань, модель постійно вдосконалюється, може формувати нетривіальні стратегії | Може потребувати багато часу для навчання, складніше налаштування гіперпараметрів, ризик «небажаної» поведінки | Оптимізація логістики та розподіл ресурсів, керування технологічною лінією з урахуванням змінних параметрів, планування виробничих задач |
| Глибоке навчання | Здатне обробляти складні та великі обсяги даних (зображення, відео, часові ряди), виявляє глибинні закономірності без ручного відбору ознак, висока точність результатів за умови достатньої кількості даних | Потребує значних обчислювальних ресурсів, труднощі з інтерпретацією (ефект «чорної скриньки»), високі вимоги до великих обсягів даних | Автоматизований візуальний контроль якості, прогнозування поломок, класифікація складних аномалій, розпізнавання образів у виробничих процесах (роботизована обробка) |

Джерело: розроблено авторами

На шляху від збору даних до розгортання моделі в продуктивному середовищі кожен етап життєвого циклу машинного навчання має вирішальне значення для забезпечення надійних результатів. Здебільшого цей процес охоплює:

- попередню обробку вхідних даних, яка включає очищення і нормалізацію даних, а також відбір найрелевантніших ознак [8]. Це критично важливо для усунення помилок та шуму у вхідних даних про виробничі процеси на машинобудівному підприємстві.

- навчання та валідацію моделей, де застосовуються історичні набори даних для тренування та перевірки моделей. Оцінюються показники точності, повноти тощо [12] задля вибору найкращої гіперпараметризації виробничого процесу.

- розгортання в реальному часі для інтеграції моделі з потоковими сервісами або API, аби обробляти нові дані «на льоту». Це дає змогу оперативно реагувати на зміни у виробничому середовищі та генерувати рекомендації або попередження без затримок [10].

Зазначене свідчить, що впровадження машинного навчання у структуру СППР зменшує час реагування та підвищує рівень автоматизації управлінських рішень, що особливо важливо для динамічних виробничих процесів і сприяє підвищенню ефективності в межах Індустрії 4.0.

У контексті сучасних виробничих СППР на основі глибокого навчання як одного з підвидів машинного навчання, пропонують безпрецедентні можливості для опрацювання складних даних і формування точних моделей. Завдяки багаторівневим штучним нейронним мережам, глибоке навчання дає змогу автоматично виявляти приховані закономірності й ознаки виробничих процесів на машинобудівних підприємствах, які було б важко або неможливо знайти традиційними алгоритмами [6].

Різноманітні підходи глибокого навчання, побудовані на базі багаторівневих нейронних мереж, дозволяють отримувати високу точність і гнучкість у вирішенні складних задач, що викликають у сукупності виробничих процесів на машинобудівних підприємствах. Зокрема, такі методи ефективні для:

- впізнання образів на конвеєрі (контроль якості продукції, сортування дефектних зразків);

- обробки часових рядів, де потрібно враховувати попередні стани (наприклад, зміни в завантаженні обладнання чи прогнозування попиту);

- універсальних задач класифікації та регресії, коли слід обробити великі різномірні набори параметрів виробничих процесів і знайти приховані патерни [11].

Під час проєктування системи глибокого навчання важливо визначити оптимальний тип архітектури для досягнення поставлених цілей. У промислових СППР найчастіше розглядають такі варіанти:

1. Згорткові нейронні мережі (ЗНМ) – призначені для автоматичного розпізнання ключових ознак у зображеннях чи відео за допомогою фільтрів («ядер згортки»). Забезпечують високу точність при виявленні дефектів чи класифікації об'єктів виробничих процесів навіть за наявності шумів або змін у середовищі.

2. Рекурентні нейронні мережі/довготривала короткочасна пам'ять (РНМ/ДКП) – опрацьовують часові ряди або послідовні дані, «запам'ятовуючи» контекст попередніх станів виробничих ліній. Ефективні для точного прогнозування попиту, контролю за станом обладнання та аналізу складних змінних у виробничих процесах на машинобудівному підприємстві.

3. Автоенкодері – безконтрольно навчаються стискати та відновлювати дані, виявляючи приховані структури та аномалії. Пристосовані для випадків з обмеженою

розміткою даних та можуть виконувати зменшення розмірності задля спрощення подальшого аналізу.

4. Генеративно-змагальні мережі (ГЗМ) – використовують дві мережі – генератор і дискримінатор – які змагаються між собою, створюючи та перевіряючи синтетичні приклади. Дають змогу розширювати навчальні вибірки рідкісними сценаріями та підвищувати якість даних для моделювання виробничих процесів на машинобудівних підприємствах.

У реальних виробничих сценаріях часто комбінують кілька архітектур глибокого навчання, адже одна й та сама система може потребувати аналізувати як візуальну, так і часову інформацію для прийняття оптимальних рішень.

Незважаючи на значний потенціал у підвищенні ефективності та автоматизації, глибоке навчання висуває низку вимог і створює певні перешкоди для машинобудівних підприємств, зокрема:

1. Необхідність великих обсягів даних. Глибокі мережі зазвичай вимагають мільйонів прикладів для належного навчання, що може бути складно забезпечити в деяких доменах.

2. Інтерпретація моделей. Через високу складність архітектури глибокого навчання виникає проблема «чорної скриньки».

3. Високі вимоги до обчислювальних ресурсів. Робота з глибокими мережами потребує суттєвих обчислювальних потужностей (спеціалізовані кластерні системи або хмарні рішення).

Таким чином, глибоке навчання залишається одним із найбільш перспективних інструментів для побудови високоточних та гнучких СППР у виробничому середовищі машинобудівних підприємств. Проте для його повноцінного впровадження підприємствам потрібні не лише відповідні дані та ресурси, а й добре продумані стратегії інтеграції глибокого навчання у наявні процеси та ІТ-інфраструктуру.

В даній роботі запропоновано план інтеграції ШІ на машинобудівному підприємстві. Але для початку варто чітко визначити стратегічні цілі, яких машинобудівне підприємство прагне досягти завдяки технологіям ШІ: зменшити кількість незапланованих простоїв обладнання; оптимізувати використання ресурсів; підвищити прозорість виробничих процесів та інші. Після цього можна переходити до практичного впровадження за такими етапами:

- аудит даних та підготовка ІТ-інфраструктури;
- побудова «озера даних» (Data Lake);
- розробка та навчання моделей (машинного/глибокого навчання);
- розгортання та інтеграція;
- тестування та валідація;
- навчання персоналу і підтримка культури змін.

Перший етап передбачає оцінку наявних даних (логів обладнання, показників систем управління виробничими операціями, показників систем планування ресурсів тощо) і виявлення «прогалин». Потребує визначення оптимальної кількості сенсорів, перевірки пропускну здатності мережі, а також вибору локального чи хмарного середовища.

Другий етап свідчить, що побудова озера даних слугує єдиним сховищем для різномірної інформації. Тут важливо організувати механізми попередньої обробки (ETL/ELT), які враховують специфіку промислових протоколів і форматів даних.

Третій етап включає вибір відповідних алгоритмів (ЗНМ, РНМ/ДКП, ГЗМ, автоенкодера) залежно від типу завдань (прогнозне обслуговування, виявлення аномалій тощо) і налаштування гіперпараметрів, щоб досягти потрібної точності.

Четвертий етап дозволяє запуснути служби ШІ у реальних умовах. Використовуються контейнери (Docker, Kubernetes) для гнучкого масштабування та потокові фреймворки (Apache Flink/Storm) для оброблення даних у реальному часі. Паралельно забезпечується зв'язок із системами управління виробничими операціями та планування ресурсів для обміну бізнес-логікою.

На п'ятому етапі перевіряють коректність прогнозів, швидкість формування рекомендацій і реакцію персоналу. За потреби—проводять донавчання моделей, корегують параметри задля підвищення точності.

Останній шостий етап передбачає тренінги, воркшопи, презентації переваг системи ШІ, а також створення каналів зворотного зв'язку. Метою запропонованого плану інтеграції ШІ є зладження переходу від традиційних процесів до інноваційного підходу.

Для реалізації наведених етапів необхідно побудувати певну архітектурну схему, що включає як програмні модулі, так і інтеграцію з наявними системами (рис.1).

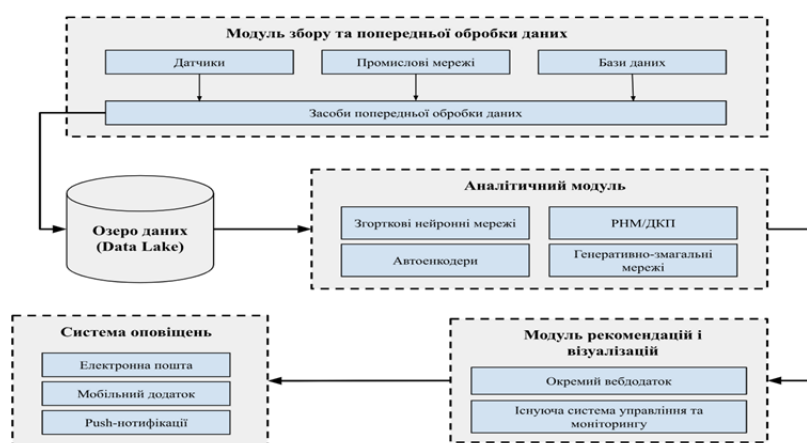


Рисунок 1 - Архітектурна схема інтеграції штучного інтелекту з програмними модулями та інтеграцією з наявними системами

Джерело: розроблено авторами

Згідно архітектурної схеми, програмні модулі і наявні системи виконують наступні функції:

1. Модуль збору та попередньої обробки даних (збирає інформацію з датчиків, промислових мереж, баз даних і приводить її до уніфікованого формату).

2. «Озеро даних» (служить сховищем для сирих та попередньо оброблених даних. Тут зручно зберігати історичну інформацію, яка може бути критичною для подальшого навчання моделей).

3. Аналітичний модуль на базі машинного/глибокого навчання (використовує різні архітектури нейронних мереж (ЗНМ, РНМ/ДКП, ГЗМ, автоенкодера) для розв'язання різноманітних завдань – від візуальної інспекції якості деталей до складних часових прогнозів).

4. Модуль рекомендацій і візуалізації (надає операторам конкретні поради, наприклад, про термінову заміну деталей або коригування технологічних параметрів. Зазвичай реалізований як вебдодаток або інтегрований у системи управління та моніторингу).

5. Система сповіщень (забезпечує швидкі повідомлення (email, мобільні додатки, push-нотифікації) операторам і менеджерам у разі відхилень чи критичних ситуацій).

Залежно від потреб машинобудівного підприємства та обсягів даних щодо виробничих процесів, доцільно обрати одну чи кілька стратегій:

- Стратегія 1. Пакетна обробка. Ідеальна для періодичного аналізу (наприклад, щоденних звітів). Втім, не забезпечує миттєвої реакції на зміни.

- Стратегія 2. Висновки в реальному часі. Застосовуються в динамічних умовах виробництва, де навіть секунди затримки можуть призвести до дефекту чи простою.

- Стратегія 3. Онлайн-навчання. Дозволяє моделям ШІ безперервно вдосконалюватися при надходженні нових даних, що особливо важливо в середовищах, які постійно змінюються.

З'ясовано, що поєднання ретельно продуманої архітектури (від збору даних до рекомендацій користувачам) із чітко окресленими кроками впровадження (аудит, навчання моделей, тестування, зміна корпоративної культури) дає змогу машинобудівному підприємству успішно інтегрувати штучний інтелект у свою діяльність. При цьому досягненням перших результатів є зменшення кількості простоїв і підвищення ефективності виробничих процесів. Це зазвичай відчутне вже на ранніх стадіях проєкту. У довгостроковій перспективі розвиток рішень та сервісів на базі штучного інтелекту стає основою для подальшої діджиталізації, забезпечуючи в машинобудівному підприємстві стабільні конкурентні переваги.

Висновки:

1. Системи підтримки прийняття рішень, що базуються на штучному інтелекті, машинному навчанні та глибокому навчанні зокрема, відкривають широкі можливості для автоматизації та оптимізації виробничих процесів у парадигмі Індустрії 4.0. Інтеграція з різнорідними джерелами даних вимагає ретельного продумування архітектури, впровадження «озер даних» і механізмів реального часу. Глибоке навчання забезпечує високу точність передбачення поломок і дефектів, але накладає підвищені вимоги до обчислювальних ресурсів і якості даних.

2. Запропонований у роботі план застосування штучного інтелекту на машинобудівному підприємстві охоплює етапи аудиту, інтеграції, навчання моделей виробничих процесів і підтримки змін у колективі. Правильно спроектований ланцюжок (від датчиків до рекомендаційної системи) дає змогу суттєво зменшити кількість незапланованих простоїв, підвищити якість продукції та забезпечити гнучкість виробництва на машинобудівному підприємстві. При цьому ключове значення мають масштабованість, безпечність опрацювання даних та врахування людського фактора.

3. Рекомендації з проєктування архітектури системи підтримки прийняття рішень, що включають увагу до масштабованості, інформаційної безпеки, сумісності з існуючими системами та мінімізації ризиків, були запропоновані як важливе доповнення до плану інтеграції штучного інтелекту. Їх комбінація забезпечує надійну роботу систем у динамічному середовищі сучасного підприємства та сприяє безперервній модернізації виробничих процесів.

Подальші дослідження можуть зосередитися на пояснюваних методах штучного інтелекту, інтеграції блокчейну та доповненої реальності для поглибленої прозорості ланцюгів постачання мобільних машин і обладнання та персоналізованої підтримки прийняття рішень по удосконаленню та ефективності виробничих процесів на машинобудівних підприємствах.

Список літератури

1. J.M. Tien. Internet of things, real-time decision making, and artificial intelligence. *Annals of Data Science*, 4 (2017), 149-178. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40745-017-0112-5>
2. H. Hu, Y. Wen, T.-S. Chua, X. Li. Toward scalable systems for big data analytics: A technology tutorial. *IEEE access*, 2 (2014), 652-687. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6842585>
3. S. Gupta, S. Modgil, S. Bhattacharyya, I. Bose. Artificial intelligence for decision support systems in the field of operations research: review and future scope of research. *Annals of Operations Research*, 308 (1) (2022), 215-274. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10479-020-03856-6>
4. E. Ananias, P.D. Gaspar, V.N. Soares, J.M. Caldeira. Artificial intelligence decision support system based on artificial neural networks to predict the commercialization time by the evolution of peach quality. *Electronics*, 10 (19) (2021), 2394. URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/19/2394>
5. M.I. Jordan, T.M. Mitchell. Machine learning: Trends, perspectives, and prospects. *Science*, 349 (6245) (2015), 255-260. URL: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aaa8415>
6. N. Kriegeskorte. Deep neural networks: a new framework for modeling biological vision and brain information processing. *Annual review of vision science*, 1 (2015), 417-446. URL: <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-vision-082114-035447>
7. T. Taleb, C. Benzaïd, R.A. Addad, K. Samdanis. AI/ML for beyond 5G systems: Concepts, technology enablers & solutions. *Computer Networks*, 237 (2023), article 110044. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1389128623004899>
8. I.H. Sarker. AI-based modeling: techniques, applications and research issues towards automation, intelligent and smart systems. *SN Computer Science*, 3 (2) (2022), 158. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42979-022-01043-x>
9. B. Nathali Silva, M. Khan, K. Han. Big data analytics embedded smart city architecture for performance enhancement through real-time data processing and decision-making. *Wireless communications and mobile computing*, 2017. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1155/2017/9429676>
10. S. Sun, X. Zheng, J. Villalba-Díez, J. Ordieres-Meré. Data handling in industry 4.0: Interoperability based on distributed ledger technology. *Sensors*, 20 (11) (2020), 3046. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/11/3046>
11. A. Krtalić, A. Kuveždić Divjak, A. Milić. Toward Data Lakes for Crisis Management. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial. Information Sciences*, 48 (2023), 539-546. URL: <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLVIII-1-W2-2023/539/2023/>
12. H.-Y. Cheng, Y.-C. Wu. Applying machine learning models with an ensemble approach for accurate real-time influenza forecasting in Taiwan: Development and validation study. *Journal of medical Internet research*, 22 (8) (2020), article e15394. URL: <https://www.jmir.org/2020/8/e15394>

References

1. J.M. Tien. (2017). Internet of things, real-time decision making, and artificial intelligence. *Annals of Data Science*, 4 149-178. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40745-017-0112-5>
2. H. Hu, Y. Wen, T.-S. Chua, & X. Li. (2014). Toward scalable systems for big data analytics: A technology tutorial. *IEEE access*, 2, 652-687. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6842585>
3. S. Gupta, S. Modgil, S. Bhattacharyya, & I. Bose. (2022) Artificial intelligence for decision support systems in the field of operations research: review and future scope of research. *Annals of Operations Research*, 308 (1). 215-274. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10479-020-03856-6>
4. E. Ananias, P.D. Gaspar, V.N. Soares, & J.M. Caldeira. (2021). Artificial intelligence decision support system based on artificial neural networks to predict the commercialization time by the evolution of peach quality. *Electronics*, 10 (19). 2394. <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/19/2394>
5. M.I. Jordan, & T.M. Mitchell. (2015). Machine learning: Trends, perspectives, and prospects. *Science*, 349 (6245). 255-260. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aaa8415>
6. N. Kriegeskorte. (2015). Deep neural networks: a new framework for modeling biological vision and brain information processing. *Annual review of vision science*, 1 417-446. <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-vision-082114-035447>
7. T. Taleb, C. Benzaïd, R.A. Addad, & K. Samdanis. (2023) AI/ML for beyond 5G systems: Concepts, technology enablers & solutions. *Computer Networks*, 237 article 110044. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1389128623004899>
8. I.H. Sarker. (2022). AI-based modeling: techniques, applications and research issues towards automation, intelligent and smart systems. *SN Computer Science*, 3 (2) 158. <https://link.springer.com/article/10.1007/s42979-022-01043-x>

9. B. Nathali Silva, M. Khan, & K. Han. (2017). Big data analytics embedded smart city architecture for performance enhancement through real-time data processing and decision-making. *Wireless communications and mobile computing*, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1155/2017/9429676>
10. S. Sun, X. Zheng, J. Villalba-Díez, & J. Ordieres-Meré. (2020). Data handling in industry 4.0: Interoperability based on distributed ledger technology. *Sensors*, 20 (11) 3046. <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/11/3046>
11. A. Krtalić, A. Kuveždić Divjak, & A. Miletić. (2023), Toward Data Lakes for Crisis Management. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial. Information Sciences*, 48 539-546. <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLVIII-1-W2-2023/539/2023/>
12. H.-Y. Cheng, & Y.-C. Wu. (2020). Applying machine learning models with an ensemble approach for accurate real-time influenza forecasting in Taiwan: Development and validation study. *Journal of medical Internet research*, 22 (8) article e15394. <https://www.jmir.org/2020/8/e15394>

Roman Boiko, post-graduate, **Viktor Aulin**, Prof., DSc., **Andrii Tykhyi**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Serhii Karpushyn**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleh Koval**, post-graduate
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Integration of Artificial Intelligence Into Decision Support Systems in Optimizing Production Processes of a Machine-Building Enterprise Using the Example of maChine Learning

This article provides a comprehensive overview of decision support systems based on artificial intelligence within the context of Industry 4.0. The integration approaches and data processing methods, as well as key machine learning and deep learning techniques, which form the technological foundation of such systems, are analyzed. The article outlines the architecture, typical implementation stages, and suggests a plan for artificial intelligence integration in a machine-building enterprise, including descriptions of the system components and deployment strategies. Potential challenges and recommendations for successful implementation are also discussed.

The outcomes of this integration can significantly reduce unplanned equipment downtimes, improve production efficiency, and provide enterprises with a substantial competitive advantage. Artificial intelligence, including machine learning and deep learning, enables the automation and acceleration of decision-making processes, detecting hidden patterns and preventing failures before they occur. The article highlights the importance of system architecture, data quality, and organizational factors in the successful deployment of artificial intelligence-based decision support systems. Furthermore, the article proposes a detailed integration plan, starting from data collection and unification to the selection of appropriate algorithms and the design of scalable, secure, and compatible architectures for real-time operations.

The integration of artificial intelligence-based decision support systems in machine-building enterprises can foster significant operational improvements, increase product quality, and optimize resource allocation. Future research may focus on explainable artificial intelligence, blockchain integration, and augmented reality to enhance transparency in supply chains and support personalized decision-making.

artificial intelligence, machine learning, deep learning, decision support systems, predictive maintenance, quality control, production process optimization.

Одержано (Received) 04.11.2024

Прорецензовано (Reviewed) 11.12.2024

Прийнято до друку (Approved) 11.12.2024

А.М. Красота, асп., І.В. Шепеленко, проф., д-р техн. наук, М.В. Красота, доц., канд. техн. наук, Р.А. Осін, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: krasotamv@ukr.net

Обґрунтування ефективності та класифікація компонентів технологічних середовищ для фінішної антифрикційної безабразивної обробки деталей машин

В роботі виконана систематизація існуючих уявлень про функції та призначення окремих компонентів технологічних середовищ для фінішної антифрикційної безабразивної обробки деталей. Визначено роль компонентів технологічного середовища, також їх вплив на процес формування антифрикційних покриттів. Проаналізовані хімічні механізми реакцій, що відбуваються під час фінішної антифрикційної безабразивної обробки деталі.

Аналіз складів технологічних середовищ та існуючих підходів до їх вибору дозволив розробити класифікацію компонентів за функціональним призначенням. Відповідно до запропонованої класифікації основними складовими технологічного середовища є: розчинники; поверхнево-активні речовини; метали, їхні сполуки та дисперсійні добавки; антикорозійні компоненти; модифікатори в'язкості. Розглянуто властивості кожної групи компонентів технологічного середовища, а також їх вплив на формування антифрикційного покриття з підвищеними експлуатаційними властивостями. Розкрито механізм взаємодії представників окремих груп при фрикційно-механічній та фрикційно-хімічній обробці деталі.

Виконані дослідження дозволять здійснювати обґрунтований підхід щодо вибору окремих компонентів технологічної рідини при розробці технологічних середовищ для нанесення антифрикційних покриттів на деталі машин.

компонента, технологічне середовище, фінішна антифрикційна безабразивна обробка, експлуатаційна властивість

Постановка проблеми. Однією з важливих задач сучасного машинобудування є підвищення експлуатаційних властивостей деталей машин, що працюють в умовах інтенсивного тертя. Технології фінішної антифрикційної безабразивної обробки (ФАБО), завдяки своїй здатності утворювати на поверхнях тертя деталей антифрикційне покриття, значно покращують триботехнічні властивості спряжених поверхонь [1]. Обов'язковою умовою для здійснення ФАБО є наявність в зоні контакту технологічного середовища (ТС), основне призначення якого – створення умов для міцності зчеплення матеріалів основи та покриття [2]. Враховуюче те, що ТС багато в чому визначає якість та властивості отриманого покриття, а також продуктивність його нанесення, можна з упевненістю стверджувати про можливість підвищення ефективності процесу ФАБО за рахунок обґрунтованого підбору компонентів технологічної рідини.

Питання оптимізації складу рідин та механізмів їх взаємодії залишаються недостатньо вивченими, що створює проблеми для досягнення стабільної якості покриттів та забезпечення їх довговічності. Ця проблема набуває особливого значення в умовах сучасного виробництва, де вимоги до якості, продуктивності та економічності обробки деталей постійно зростають.

Недостатнє розуміння хімічних процесів, що відбуваються під час ФАБО, зокрема, трибохімічної взаємодії рідин із поверхнями металевих деталей, обмежує можливість створення універсальних і високоєфективних складів ТС. Крім того, існує необхідність розробки методик зменшення корозійного впливу залишкових продуктів реакцій та поліпшення адгезії покриттів до базового матеріалу деталі.

Особливо актуальним є дослідження впливу окремих компонентів спеціальних рідин, таких як гліцерин, хлорид міді та стеаринова кислота та ін. на формування антифрикційних шарів із прогнозованими властивостями.

Не менш важливим є забезпечення балансу між низькою в'язкістю середовища, що сприяє стабільності процесу, і достатньою концентрацією активних речовин для формування покриттів із високими показниками зносостійкості. Відсутність достатньої кількості досліджень у цьому питанні вимагають більш глибокого вивчення механізмів взаємодії компонентів ТС під час фрикційно-механічної та фрикційно-хімічної обробки деталей.

Таким чином, вирішення зазначених проблем шляхом систематизації даних про склад ТС та її компонентів сприятиме підвищенню ефективності технології ФАБО та забезпеченню її широкого застосування в промисловості для підвищення надійності та довговічності деталей машин у вузлах тертя.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із ключових факторів ефективності ФАБО є використання спеціальних ТС, які виконують низку функцій: змочування оброблюваної поверхні, руйнування оксидних плівок, пластифікація матеріалу та створення умов для його перенесення [3]. Окрім того, ТС забезпечує активацію робочої поверхні оброблюваної деталі, що сприяє формуванню високоякісних покриттів із прогнозованими експлуатаційними властивостями. Таким чином, якість ТС слід оцінювати за комплексом експлуатаційних властивостей отриманих покриттів, які характеризуються такими показниками як суцільність і товщина покриття, її маслоємність та зносостійкість.

Водночас, відсутність універсальних складів ТС, які відповідали б різним умовам обробки, пов'язана зі складністю фізико-хімічних процесів, що відбуваються під час ФАБО [4].

В роботі [5] зазначено, що розробка складу ТС потребує емпіричного підходу, який передбачає технологічні випробування для підбору компонентів з наступною оцінкою зносостійкості отриманих покриттів.

За даними роботи [3] для обробки легованих сталей використовували склад ТС, який містить: 0,8...1 % ортофосфорної кислоти, 0,77...0,9 % олеїнової кислоти, 4...7% ізопропілового спирту, 2...3% хлоридної кислоти, решта – гліцерин. Проте, авторами не вказано за якими принципами відбиралися вказані компоненти.

В роботі [2] досліджено вплив гліцерину на властивості покриттів та встановлено, що даний компонент здатен забезпечувати вибіркоче перенесення матеріалу в трибоспряженнях типу «бронза–сталь». Автори дійшли висновку, що застосування гліцерину має суттєві недоліки. Серед основних основними є низька продуктивність через необхідність значних притискних зусиль та недостатня якість отриманих покриттів. За результатами досліджень, представлених в роботі [2], визначено ряд компонентів, що виконують специфічні функції, наприклад: хлоридна кислота забезпечує ефективне руйнування оксидних плівок, вода сприяє охолодженню зони контакту і регулює в'язкість середовища, а олеїнова і ортофосфорна кислоти, а також ізопропіловий спирт підвищують товщину та якість покриттів, особливо при обробці легованих сталей.

У дослідженнях [6, 7] для покращення триботехнічних властивостей до складу ТС вводили додаткові компоненти, такі як солі металів, зокрема, солі міді, які сприяють формуванню рівномірних покриттів за умови оптимальної концентрації в межах 1,5...15%. Зазначено, що перевищення цих значень призводить до посилення корозії оброблюваної поверхні, тоді як недостатня кількість солей знижує ефективність утворення покриттів.

В роботі [8] наведені дані про додавання до ТС металоплакуючих присадок, що включають неорганічні сполуки міді та забезпечують формування покриттів товщиною від 1 до 25 мкм з високими антифрикційними властивостями. Ці результати, також, підтверджуються дослідженнями [9, 10].

У роботі [3] виконано узагальнення наявних даних щодо функціональних та технологічних характеристик ТС та сформульовані вимоги до забезпечення їх необхідної якості (рис. 1).



Рисунок 1 – Основні вимоги для досягнення якості ТС для ФАБО

Джерело: На підставі [3]

На думку авторів [3] сучасні ТС для ФАБО повинні відповідати функціональним та технологічним вимогам, які забезпечують досягнення необхідних експлуатаційних властивостей отриманих покриттів.

Виконаний аналіз літературних джерел дозволяє стверджувати про відсутність обґрунтованого підходу щодо вибору компонентів для підвищення ефективності використання технологічної рідини при ФАБО. Це вимагає узагальнення існуючих знань стосовно впливу окремих компонентів ТС на процес формування якісних антифрикційних покриттів.

Постановка завдання. Метою даної роботи є обґрунтування підбору компонентів технологічного середовища фінішної антифрикційної безабразивної обробки для забезпечення високих показників якості покриття. Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувалися наступні завдання:

- обґрунтувати роль основних компонентів у процесі формування якісних антифрикційних покриттів;
- запропонувати класифікацію компонентів ТС для ФАБО враховуючи їх функціональні призначення;
- розробити алгоритм підбору компонентів ТС.

Викладення основного матеріалу. Обов'язковою умовою здійснення ФАБО деталей машин для підвищення експлуатаційних властивостей їх робочої поверхні є наявність в зоні тертя спеціальної робочої рідини – технологічного середовища. Склад ТС повинен бути багатокомпонентний і включати різні групи хімічних речовин, серед яких розчинники, поверхнево-активні речовини, органічні сполуки, здатні до полімеризації, метали, їх сполуки та дисперсні металеві добавки, антикорозійні компоненти, а також модифікатори в'язкості. Кожен з цих компонентів виконує визначену роль, сприяючи досягненню високих показників якості покриття.

Розглянемо більш детально роль і властивості основних компонентів ТС ФАБО.

Розчинники, зокрема, гліцерин та дистильована вода, відіграють ключову роль у складі компонентів, необхідних для проведення ФАБО, завдяки своїм властивостям, що забезпечують необхідну розчинність компонентів та оптимальну в'язкість середовища. Гліцерин, як органічний розчинник, відрізняється високою полярністю, що дозволяє йому взаємодіяти з компонентами ТС, зокрема солями і оксидами металів. Завдяки наявності трьох гідроксильних груп, гліцерин ефективно стабілізує дисперсії металевих частинок, що містяться в ТС і перешкоджає їх агрегації, що важливо для рівномірного нанесення покриття на оброблювану поверхню.

Оскільки гліцерин також виступає в ролі комплексоутворювача, він сприяє стабільності і розчинності металевих солей, таких як хлорид міді, у водно-гліцеринових середовищах, що підвищує ефективність хімічних реакцій осадження.

Завдяки своїм фізико-хімічним властивостям, гліцерин у процесі взаємодії з контактуючими поверхнями системи «деталь – інструмент» зазнає окиснення, утворюючи низку продуктів з меншими молекулярними масами, таких як гліцериновий альдегід, акролеїн, формальдегід і гліцеринову кислоту.

Процес трибодеструкції, який включає руйнування молекул гліцерину, в тому числі, під впливом механічної енергії тертя, призводить до утворення цих окислених продуктів, що активно взаємодіють із поверхнею деталі. Вони сприяють утворенню плівки на поверхні, що знижує коефіцієнт тертя, підвищує маслоємність і зносостійкість, а також бере участь у процесах відновлення металевих компонентів. Наприклад, формальдегід і гліцериновий альдегід можуть стимулювати відновлення металів і активувати осадження міді, що є основним компонентом покриття.

Водночас, процес окиснення гліцерину дозволяє отримати компоненти, які покращують стабільність покриття, що утворюється на поверхні. Вони взаємодіють із металами та їхніми сполуками, покращуючи механічні та триботехнічні характеристики утвореного покриття, що є важливим аспектом для забезпечення високої зносостійкості та тривалої експлуатації деталі в умовах підвищених навантажень.

До таких сполук, зокрема, здатних до полімеризації, належать тіосечовина, ацетамід і сечовина. Ці речовини мають здатність утворювати полімерні плівки, що мають позитивний ефект на процес стабілізації покриття на оброблених деталях. Тіосечовина, ацетамід та сечовина активно взаємодіють із міддю та іншими металами в складі покриття, сприяючи утворенню міцних, стійких до зносу полімерних структур. Вони також покращують механічні та триботехнічні властивості покриттів, зменшуючи пористість та підвищуючи їхню зносостійкість. Такі органічні сполуки виконують

функцію стабілізаторів покриттів, перешкоджаючи утворенню дефектів на поверхні і забезпечуючи високу якість антифрикційних покриттів.

Таким чином, гліцерин не лише виконує роль розчинника для активних компонентів середовища, але й, завдяки своїй здатності до трибодеструкції, сприяє утворенню антифрикційного покриття з покращеними характеристиками, що є важливим для ефективності процесу ФАБО.

В якості розчинників можуть використовуватися етиловий, пропіловий, ізопропіловий, бутиловий та ізобутиловий спирти та етиленгліколь.

Дистильована вода, в якості чистого розчинника, забезпечує необхідне середовище для гідролізу солей міді, зокрема хлориду міді ($CuCl_2 \cdot 2H_2O$), що розчиняючись у воді, бере участь у процесах осадження міді на поверхні деталі. Крім того, вода регулює концентрацію кислот, що також важливо для ефективності відновлення міді та її осадження на оброблювану поверхню за умови утворення молекул хлоридної кислоти після гідролізу солі. Змішування води з гліцерином дозволяє оптимізувати кислотність середовища, що сприяє стабільному протіканню реакцій та досягненню бажаних триботехнічних властивостей покриттів.

В окремих випадках для ФАБО деталей машин використовуються альтернативні технологічні середовища на оливній основі, що не характерно для даної технології. Так, наприклад, при безбразивній обробці лез інструментів, що використовуються для обробки шкіряних та текстильних матеріалів, використовуються спеціальні «мастильні матеріали», такі як олива I-8A з металоплакуючою присадкою на основі олеату міді. У таких випадках мідне покриття на інструменті може бути виявлено лише за допомогою спектрального аналізу, зокрема, електронного мікроскопа з рентгенівським мікроаналізатором.

Поверхнево-активні речовини (ПАР) є не менш важливими компонентами ТС для ФАБО, оскільки вони значною мірою визначають ефективність процесів, що відбуваються на поверхні оброблюваних деталей. ПАР знижують поверхневий натяг рідини, що сприяє кращому її проникненню у важкодоступні ділянки контактуючих поверхонь і підвищує ефективність обробки. Одним з найбільш широко використовуваних ПАР при ФАБО деталей машин є стеаринова кислота.

Стеаринова кислота, яка є органічною жирною кислотою, виконує кілька важливих функцій у складі ТС для ФАБО. Вона здатна до руйнування оксидних плівок, пластифікації поверхонь, а також зниження поверхневого натягу рідини ТС. Руйнування оксидних плівок на поверхнях деталей та інструментів сприяє відновленню активної поверхні металу з подальшим формуванням захисних покриттів із сполук, утворених цими металами. Крім стеаринової кислоти в якості компоненту ТС може використовуватися олеїнова та лінолева кислоти.

Пластифікація поверхонь дозволяє покращити взаємодію між металом і технологічною рідиною за рахунок зменшення тертя між поверхнями.

Використання металів, їхніх сполуки та дисперсних добавок є ключовим елементом процесу ФАБО деталей машин, оскільки вони визначають механічні властивості та зносостійкість отриманих покриттів поверхонь деталей. Серед металів, які застосовуються у складі спеціальних рідин для ФАБО деталей машин, особливу роль відіграють хлорид міді, сульфат міді, високодисперсна мідь та нікель, дисульфід молібдену. Кожен з цих компонентів надає покриттям унікальні характеристики, що сприяють підвищенню їхньої ефективності в умовах високих навантажень та тертя.

Хлорид міді та сульфат міді широко використовуються завдяки своїй здатності забезпечити утворення стабільних зносостійких покриттів, що витримують високі температури та механічні навантаження.

У металополакуючих середовищах, що використовуються при фрикційно-хімічному нанесенні покриттів, важливу роль відіграють різноманітні солі пластичних металів, зокрема, хлорид міді. Під час обробки деталей за наявності ТС, що включають такі солі, відбувається їх гідроліз, що супроводжується утворенням кислот, зокрема соляної. Поява кислот має безпосередній вплив на проведення ФАБО деталей машин і на процеси, що протікають на поверхні деталі, адже кисле середовище сприяє руйнуванню оксидних плівок, що утворюються на поверхнях металів, і дозволяє активувати процеси відновлення металів самої деталі. В результаті цієї реакції утворюються захисні шари з хлоридів металів самої деталі, таких як хлорид заліза, що діють як бар'єр для подальшої корозії і сприяють збереженню стабільності покриття. Однак, процес гідролізу солей має свої недоліки, зокрема наявність в середовищі соляної кислоти, яка, хоча і має високу поверхневу активність, є корозійноактивною і може негативно впливати на надійність сформованого покриття. Для уникнення погіршення властивостей покриття необхідно забезпечити ретельне промивання деталей машин після ФАБО.

Дисульфід молібдену має низький коефіцієнт тертя, що значно покращує зносостійкість покриттів, зменшуючи знос деталей машин, а також надає покриттям високу стійкість до термічного і механічного навантаження, що робить їх придатними для роботи в умовах високих температур. Включення цієї сполуки до складу ТС дозволяє знизити енергетичні витрати, що виникають в процесі тертя, а також підвищити їх тривалість служби.

Високодисперсна мідь, що використовується у вигляді порошкового матеріалу, завдяки своїм властивостям, сприяє формуванню однорідних покриттів, що забезпечують рівномірний розподіл матеріалу та високий рівень адгезії між покриттям та основою. Мідь має добру пластичність, що дозволяє покриттям, що утворюються з її участю, витримувати значні механічні деформації без утворення тріщин чи зниження їхньої ефективності. Процес формування покриттів на основі міді та нікелю відбувається завдяки хімічним реакціям відновлення іонів металів на поверхні оброблених деталей. Іони міді, які потрапляють в середовище, активно відновлюються на поверхні металевих деталей. Це дозволяє сформувати тонкий, але міцний шар міді, що виступає як захисне покриття від механічного зносу.

Крім того, у складі ТС можуть використовуватися порошки нікелю. В процесі ФАБО іони нікелю мають здатність значно підвищувати адгезію покриття до основного матеріалу завдяки своїй високій хімічній активності, що забезпечує формування стійкого покриття з високими експлуатаційними характеристиками.

Антикорозійні компоненти запобігають виникненню корозії. Такі функції можуть виконувати стеаринова та олеїнова кислоти. Стеаринова кислота, окрім її основних функцій як ПАВ, також відіграє важливу роль у запобіганні корозії. Вона знижує корозійну активність середовища, створюючи захисні бар'єри на поверхнях оброблюваних деталей. Це сприяє збереженню властивостей покриттів під час обробки та забезпечує їх стабільність, запобігає пошкодженню деталей, особливо в умовах агресивних середовищ, які можуть виникнути в результаті хімічних реакцій або трибологічних процесів.

Також, підвищення корозійної стійкості забезпечують наступні метали та їхні сполуки: мідь, нікель, молібден, а також комплексні сполуки, що утворюються цими металами з гліцерином та продуктами його розпаду.

Модифікатори в'язкості технологічної рідини створюють умови для рівномірного і безперешкодного проникнення рідини в мікроструктуру і важкодоступні зони поверхні, що забезпечує належну якість покриття та підвищує ефективність

процесу ФАБО. Функцію модифікатора в'язкості виконує гліцерин. Маючи власну високу в'язкість гліцерин підвищує в'язкість ТС в цілому.

Відповідно до викладеного запропонована наступна класифікація компонентів ТС за функціональним призначенням (рис. 2).

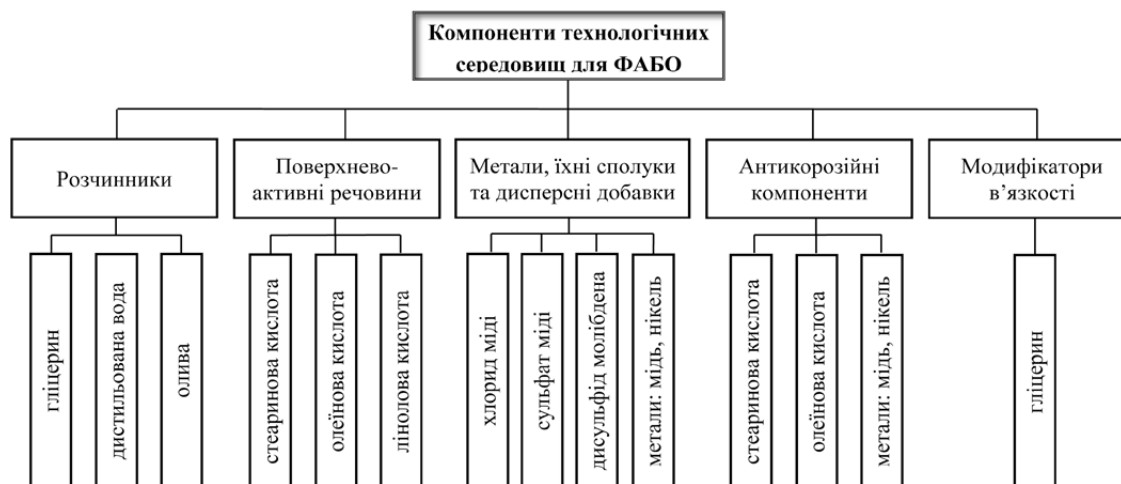


Рисунок 2 – Класифікації компонентів технологічних середовищ для ФАБО за їх функціональним призначенням

Джерело: розроблено авторами

Загалом, обґрунтований підбір компонентів у технологічного середовища для ФАБО дозволяє отримувати покриття з покращеними характеристиками, що забезпечують підвищену надійність і довговічність оброблених деталей. Оптимальне застосування розглянутих речовин, що входять до складу ТС, дозволить забезпечити розвиток способів отримання антифрикційних покриттів ФАБО, зокрема для підвищення антифрикційних властивостей деталей автомобільної, авіаційної та машинобудівної техніки.

На підставі викладеного, можна рекомендувати наступний загальний алгоритм вибору якісного складу технологічного середовища для ФАБО.

На першому етапі залежно від матеріалу поверхні деталі, яка підлягає ФАБО, обирається тип розчинника. Як правило, для середньовуглецевих сталей (типу сталь 35, сталь 45), сірого чавуну та низьколегованих сталей використовується гліцерин в чистому вигляді, для високолегованих сталей доцільно застосовувати суміш розчинників у певних співвідношеннях, наприклад гліцерин з водними розчинами хлоридної або ортофосфатної кислоти.

Залежно від товщини оксидних плівок та наявності осадів на поверхні деталі перед обробкою, приймається рішення про використання тієї чи іншої ПАР (стеаринова, олеїнова або ліолева кислота).

Для отримання покриттів з необхідними фізико-механічними властивостями вибирається вид металевих компонентів або їх сполук. Наприклад, для отримання протизадирних та антифрикційних властивостей застосовується хлорид міді чи мідний порошок, для забезпечення протизносних властивостей покриттів в ТС додають дисульфід молібдену.

Для забезпечення зниження агресивності хлоридної та сульфатної кислот стосовно деталей, що обробляються ФАБО, до ТС додають антикоровізійні компоненти у вигляді стеаринової або олеїнової кислот.

При використанні декількох розчинників, в'язкість ТС регулюється, як правило, масовою часткою вмісту гліцерину в середовищі.

Висновки:

1. В роботі обґрунтовані основні компоненти технологічного середовища, що використовуються для ФАБО деталей машин. Встановлено їх роль і функції у процесі утворення антифрикційного покриття на робочих поверхнях деталей машин.

2. Запропоновано класифікацію компонентів технологічного середовища для ФАБО за їх функціональним призначення. Запропонований підхід дозволяє цілеспрямовано керувати складом ТС із забезпеченням високих показників якості отриманого покриття.

3. Розроблений алгоритм вибору компонентів складу технологічного середовища для фінішної антифрикційної безабразивної обробки.

Список літератури

1. Паніна В.В., Дашивець Г.І. Підвищення зносостійкості гільз циліндрів двигунів . *Праці ТДАТУ*. 2014. Т.1 № 4. С. 115-119.
2. Louda P. Applications of thin coatings in automotive industry. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering Vol. 24, No. 1. September 2007*. P. 51-56
3. Chernovol M., Shepelenko I., Budar Mohamed R.F. Selection of a processing medium for the finishing antifriction nonabrasive treatment/ M. Chernovol, I. Shepelenko, R.F. Budar Mohamed // *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету*. 2015. № 28. С. 19 – 23.
4. Bhalla V., Ramasamy C., Singh N., Pushpavanam M. Friction and Wear Characteristics Of Electrodeposited Copper Composites/ V. Bhalla, C. Ramasamy, N. Singh and M. Pushpavanam // *PLATING & SURFACE FINISHING* November 1995. P. 58 – 61.
5. Шацький І.П., Маковійчук М.В., Роп'як Л.Я. Рівновага шаруватого Cu/Ni/Cr-покриття під локальним навантаженням/ І.П. Шацький, М.В. Маковійчук, Л.Я. Роп'як // *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології* 2023. т. 21. № 2. С. 379 – 389.
6. Пат. № 49630 Україна, МПК (2009) C23C 30/00. Склад поверхнево-активної речовини для формування зносостійких покриттів / Кубіч В.І., Івченко Л.Й. № u200909788; заявл. 11.05.2010; опубл. 11.05.2010, Бюл. №9, 2010.
7. Tiškevičius K., Padgurskas J., Prosyčevs I. Investigation of Non-abrasive Antifrictional Surface Finishing. *Medžiagotyra* Vol. 9, No. 1 (2003) P. 62 – 67.
8. Косіюк М.М., Костюк С.А., Костюк М.А. Технологічне забезпечення нанесення антифрикційного покриття на неповні сферичні поверхні фрикційно-механічним способом/ М.М. Косіюк, С.А. Костюк, М.А. Костюк // *Вісник Хмельницького національного університету*, 2018. №4. с. 39 – 43.
9. Шепеленко І.В. Зміна шорсткості поверхні при нанесенні антифрикційних покриттів/ І.В. Шепеленко, А.М. Кириченко, С.О.Магопєць, [та ін.]// *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*, 2022 вип. 52. С. 156–165. URL: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\)](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39)). (дата звернення 02.11.2023.)
10. Дідур В.А., Мушкевич О.І. Технологія фрикційного латунювання переривчастої поверхні золотника гідророзподільника/ В.А. Дідур, О.І. Мушкевич // *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Технічні науки*. 2015. Вип. 15, т. 4. - С. 3 – 10.

References

1. Panina, V.V. & Dashyvets, H.I. (2014). Pidvyshchennia znosostiikosti hilz tsylindriv dvyhuniv. *Pratsi TDAU*. Vol.1, 4, 115-119 [in Ukrainian].
2. Louda, P. (2007). Applications of thin coatings in automotive industry. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 24, No. 1. September. P. 51-56 [in English].
3. Chernovol M., Shepelenko I., & Budar Mohamed R.F. (2015) Selection of a processing medium for the finishing antifriction nonabrasive treatment/ M. Chernovol, I. Shepelenko, R.F. Budar Mohamed // *Zbirnyk naukovykh prats Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*. № 28. P. 19 – 23. [in English].
4. Bhalla V., Ramasamy C., Singh N., & Pushpavanam M. (1995). Friction and Wear Characteristics Of Electrodeposited Copper Composites/ V. Bhalla, C. Ramasamy, N. Singh and M. Pushpavanam // *PLATING & SURFACE FINISHING* November. P. 58 – 61. [in English].
5. Shatskyi I.P., Makoviichuk M.V., & Ropiak L.Ia. (2023). Rivnovaha sharuvatoho Cu/Ni/Cr-pokryttia pid lokalnym navantazhenniam/ I.P. Shatskyi, M.V. Makoviichuk, L.Ia. Ropiak // *Nanosystemy*,

- nanomaterialy, nanotekhnologii. t. 21. № 2. P. 379 – 389. [in Ukrainian].
6. Pat. № 49630 Ukraina, MPK (2009) S23S 30/00. Sklad poverkhnevo-aktyvnoi rechovyny dlia formuvannya znosostiukykh pokryt / Kubich V.I., Ivshchenko L.I. № u200909788; zaiavl. 11.05.2010; opubl. 11.05.2010, Biul. №9, 2010. [in Ukrainian].
 7. Tiškevičius K., Padgurskas J., & Prosyčevas I. (2003). Investigation of Non-abrasive Antifrictional Surface Finishing. *Medžiagotyra* Vol. 9, No. 1 P. 62 – 67. [in English].
 8. Kosiuk M.M., Kostiuk S.A., & Kostiuk M.A. (2018) Tekhnologichne zabezpechennia nanesennia antyfryktsiinoho pokryttia na nepovni sferychni poverkhni fryktsiino-mekhanichnym sposobom/ M.M. Kosiuk, S.A. Kostiuk, M.A. Kostiuk. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu*. №4. P. 39 – 43 [in Ukrainian].
 9. Shepelenko, I.V. (2022). Zmina shorstkosti poverkhni pry nanesenni antyfryktsiinykh pokryttiv/ I.V. Shepelenko, A.M. Kyrychenko, S.O.Mahopets, [ta in.]/Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn, vyp. 52. P. 156–165. URL: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\)](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39)). [in Ukrainian].
 10. Didur, V.A., & Mushkevych, O.I. (2015). Tekhnologhiia fryktsiinoho latuniuvannia pereryvchastoi poverkhni zolotnyka hidrorozpodilnyka/ V.A. Didur, O.I. Mushkevych // *Pratsi Tavriiskoho derzhavnogo ahrotekhnologichnoho universytetu. Tekhnichni nauky*. 15, t. 4. P. 3 – 10 [in Ukrainian].

Artem Krasota, post-graduate, **Ihor Shepelenko**, Prof., DSc., **Mykhailo Krasota**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ruslan Osin**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Determination of Effectiveness and Component Classification of Technological Mediums for Finishing Antifriction Non-Abrasive Treatment of Automobile Details

The goal of this research is the determination of selection of technological medium components for finishing antifriction non-abrasive treatment to ensure high-quality of coating.

The research offers a systematization of existing apprehensions of functions and purposes of separate technological mediums components for finishing antifrictional non-abrasive treatment of parts. Was determined the role of technological mediums components and their influence on the finishing antifrictional non-abrasive treatment process. Were analyzed chemical reactions mechanisms occurring during finishing antifrictional non-abrasive treatment of a part.

The analysis of technological medium components and existing approaches of their selection allowed to develop a classification of components according to their functional purpose. According to proposed classification, main components of technological mediums are solvents, surface-active substances, metals and their compounds and dispersive additives, anti-corrosive components, viscosity modifiers. Were examined the properties of each group of technological -medium components, and their influence on antifriction coating formation with increased performance characteristics. Was discussed the mechanism of interaction of different groups during friction-mechanical and frictionchemical detail treatment.

Offered a classification of technological mediums components for FANT according to their functional purpose. Offered approach enables controlled management of the technological mediums with higher quality conditions of surface support.

The research allowed to create a way for choosing technological mediums components during creating technological mediums for finishing antifrictional non-abrasive treatment of automobile parts.

Determined selection of technical medium components for FANT allows obtaining coatings with higher characteristics, ensuring higher reliability and durability of treated details. The optimal application of researched substances, included in technical mediums, allows ensuring development of obtaining antifrictional coatings of FANT development, particularly for improving antifrictional characteristics of automobile, aviation and machinery industries.

component, technological environment, finishing anti-friction non-abrasive treatment, operational property

Одержано (Received) 31.10.2024

Прорецензовано (Reviewed) 11.12.2024

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2024

Vitalii Koshulko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ihor Kudriavtsev**, PhD student
Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine
e-mail: vitaliykoshulko@gmail.com

Justification of the design of an aerodynamic separator for cleaning sunflower seed mixture waste

The aim of the research is to substantiate the structural and technological scheme of an aerodynamic separator for cleaning waste from sunflower seed mixtures, ensuring the separation of elongated particles based on their specific weight and morphometric characteristics. This is achieved by modifying the formation of pseudo-fluidized layers and the sequence of applying the principles of pseudo-fluidized flow generation. A method for separating bulk mixtures in a two-stage environment has been proposed. It includes the gravitational feeding of particles, increasing vibro-inertial impact, pseudo-fluidized medium generation, and the removal of dense fractions. The second stage involves separation through the sequential application of vibro-inertial and pneumatic methods of pseudo-fluidized medium generation, the use of a suspended layer, and the creation of a low-concentration layer. The structural and technological scheme of a column-type separator has been substantiated. Numerical modeling of the separation process of seed waste components in the rarefaction chamber allowed for the determination of motion trajectories and component distribution. The obtained dependencies include the distance between the peaks of husk and fine particle distributions (Δy) as a function of the effective diameter (D_p), feed rate (V_a), and the curvature radius of the upper edge of the chamber (R). The optimal factor values are: for $D_p = 0.005$ m $\rightarrow V_a = 3.21$ m/s, $R = 0.055$ m; for $D_p = 0.010$ m $\rightarrow V_a = 3.35$ m/s, $R = 0.056$ m; for $D_p = 0.015$ m $\rightarrow V_a = 3.49$ m/s, $R = 0.054$ m. The average distance between distribution peaks is $\Delta y = 0.443$ m. Based on modeling and validated parameters, an experimental prototype of the column-type aerodynamic separator was developed and implemented in production at LLC «NVO Sorting Machines».

waste, sunflower, separation, cleaning, seeds, husk, modeling, method, parameters, properties, efficiency

Problem setting. Seed waste and debris are a promising raw material for processing, as they contain 30–50% of grain or oilseed impurities suitable for further use [1]. The extraction of this valuable raw material is possible only through mechanical sorting of waste using specialized equipment [2].

The aerodynamic method used to separate the sunflower seed mixture into husks, kernels, and other impurities is a key stage in processing at oil extraction plants [3]. However, one of the main challenges of this process is the incomplete separation of husks from kernels. This not only leads to the loss of food resources but also deteriorates the quality of subsequent processing stages. Therefore, research on optimizing the separation process of sunflower seed mixture waste is an extremely relevant task.

Analysis of the latest studies and publications. Currently, the most common equipment for cleaning sunflower seed mixture waste is the gravitational aerodynamic separator. This equipment is characterized by economic efficiency, simplicity of design, and ease of maintenance [4–6], and it can also be used for cleaning and sorting many other types of agricultural products [7–8].

Separators are usually designed as vertical separation channels through which an upward airflow passes, carrying particles fed from below or from the side [7]. It is believed that the way the seed mixture is fed can affect the airflow velocity, disrupt its stability, and hinder the complete separation of particles [7]. Research on this process has been conducted

in various directions, using trial-and-error methods, such as modifying the design of the separation channel [8], adjusting the airflow velocity [9], and fine-tuning the mixture feed parameters [10].

A known method for separating bulk mixtures in a fluid medium also exists [11]. This method involves the gravitational feeding of mixture particles, the aerodynamic monotonically increasing influence on them at an acute angle to the vertical with a cascade of expanding turbulent air jets, and the extraction of finished fractions. The lower plane of the jets, due to the Coanda effect and positive feedback with the air in the inter-jet space, induces self-oscillating motion across the entire width, followed by an aperiodic force impact on the upper plane of the lower jet. The use of flat jets in the separation process undoubtedly improves the quality of fractionation of the bulk mixture by specific weight. However, this method is ineffective for separating bulk mixtures composed of particles whose length is several times greater than their width (e.g., meadow bluegrass seeds, pasture ryegrass, awnless brome, oats, damaged sunflower seeds and husks, sorting sunflower husks, and grain cleaning waste to extract oilseed and grain impurities, sorting grain waste to remove grain impurities, etc.). It cannot perform trieur functions, as "broken" seeds have the same specific weight as whole ones. Additionally, the method is unable to remove oilseed and grain impurities larger than 200 μm , which are carried away as aspiration waste. Since this separation method cannot affect the seeds in any other way due to the design and interaction of its components, its functional capabilities limit its applicability, which is a technological drawback.

From the state of the art, an analog is known—a column-type aerodynamic separator for fine cleaning of seed materials [12]. It includes a loading unit consisting of a loading hopper and a vibrating feeder, a pneumatic separation unit with an air flow source capable of adjusting the airflow intensity in the separation zone, and a pneumatic separation channel with an inlet for contaminated seed materials, an outlet for the useful fraction, and an outlet for waste. It also has a settling chamber with a conical hopper for directing waste into a screw trap and a vent, as well as collectors for the useful fraction and waste. The vibrating feeder is additionally equipped with an electronic oscillation control device, and the lower part of the pneumatic separation channel features an air distributor, while the upper part includes a rarefaction chamber with a baffle and an outlet for air and dust.

From the essence of this technical solution, it is clear that the column-type pneumatic separator-sorter is designed for cleaning and sorting agricultural products with a low percentage of debris and dust, as well as for sorting grain mixtures with contamination levels exceeding the technical standards for grain. To effectively remove grain/oilseed impurities from waste and processing byproducts, the separator must be equipped with a significantly large settling chamber. The chamber's size must be several times larger to ensure the effective sedimentation of aspirated impurities and lightweight debris. This substantially increases the overall dimensions and material consumption of the separator-sorter, requiring considerable construction volume for its use. Thus, a drawback of the known device is its large size and material intensity, as well as the need for a greater building volume for operation.

The results of the analysis indicate that airflow velocity, feed intensity, and the direction of mixture introduction significantly influence separation quality. Moreover, optimal operating parameters vary depending on material characteristics.

Despite the improvements achieved in the operation of aerodynamic separators, the process of cleaning sunflower seed mixture waste requires further study. Therefore, the development of design solutions to improve fine-cleaning machines for these waste products remains a relevant task in agro-engineering.

Setting objectives. The aim of the research is to substantiate the structural and technological design of an aerodynamic separator for cleaning sunflower seed mixture waste. This separator will ensure the separation of elongated particles based on both their specific weight and morphometric characteristics (the size of the separated mixture components) by altering the conditions of vibro-inertial and vibro-pneumatic effects on the raw material. This is achieved through a sequential two-stage pseudo-fluidized layer by modifying the principle of pseudo-fluidized layer formation and the sequence of applying the principles of pseudo-fluidized flow generation.

Presentation of the main material. The stated objective is achieved through a method of separating a bulk mixture in a two-stage fluidized medium. This method involves the gravitational feeding of mixture particles, an increasing vibro-inertial effect on them, the generation of a pseudo-fluidized medium, and the removal of dense fractions. According to the utility model, an additional second stage is included, in which separation occurs in a two-stage fluidized medium with the sequential application of vibro-inertial and pneumatic methods for generating pseudo-fluidized layers. A suspended pseudo-fluidized layer is used, and a pseudo-fluidized layer of low concentration is created.

In the first stage, a pseudo-fluidized layer is formed through vibro-inertial influence, where the grain mixture is stratified based on density, and the coarse dense fraction is removed. In the second stage, the pseudo-fluidized layer is maintained in a suspended state by the pneumatic influence of an air flow. The dense mass of the pseudo-fluidized layer transitions to a low-concentration pseudo-fluidized state, allowing dense mixture particles ranging in size from over 200 μm to less than 1.0 mm to settle into the lower layers and be removed.

A distinguishing feature of the proposed method for separating a bulk mixture in a two-stage fluidized medium is the sequential use of vibro-inertial and pneumatic methods for generating pseudo-fluidized layers, the use of a suspended pseudo-fluidized layer in the second stage, and the creation of a low-concentration pseudo-fluidized layer in the second stage. This allows for the additional extraction of grain or oil impurities larger than the particles removed by aspiration but smaller than those removed by the pneumatic sorting method (0.2–1.0 mm).

The technical result of the utility model is the ability to modify the method of generating a pseudo-fluidized layer and create a low-concentration pseudo-fluidized layer, as well as to use a sequential fluidized medium approach to alter the nature of grain mixture sorting and improve sorting quality. This significantly expands the functional capabilities of the proposed technology and, consequently, its range of applications.

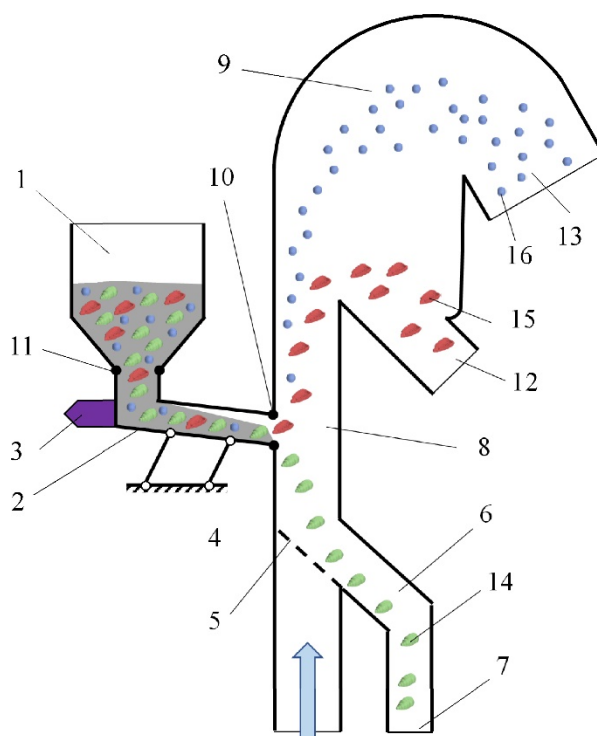
Thus, the set of essential features of the proposed technical solution collectively ensures the achievement of the stated goal as defined in the problem statement.

To clarify the problem, attention should be paid to the properties of the mixture being sorted. For example, in the case of sunflower oilseed raw material, the mixture consists of oil impurities with a fractional composition specified in DSTU 7011-2009 [13] (damaged by pests, sprouted, immature, frost-affected, fully or partially dehulled, mechanically damaged, or damaged by phytophagous bugs, with sizes smaller than the primary grain). The mixture also includes fragments of grain of various sizes, but oil impurities share a common characteristic – density. The pseudo-fluidized layer's property in implementing density-based sorting has its limitations. Sunflower husks and waste predominantly consist of elongated particles with branched structures.

During the generation of the pseudo-fluidized layer, mixture particles interlock, compact, and form conglomerates – localized densifications that increase the internal resistance of the mixture, the shear resistance index, and the uncertainty of the natural slope

angle. Conglomerates hinder the stratification (layering) of the mixture, particularly for small particles. According to experimental studies conducted using the DSTU 7123:2009 methodology [14], the mass fraction of fat and extractive substances in absolutely dry matter is nearly 10% due to a dense fraction sized 0.2–1.0 mm that remains in the mixture and is not sorted out. This represents almost half of the raw material that could be used in production.

To explain the proposed method, it is first appropriate to consider the design of the device that implements it. The further explanation is illustrated in the diagram, which shows the schematic of the device for implementing the proposed method of separating a bulk mixture in a two-stage fluidized medium (Fig. 1).



1 – hopper; 2 – vibrating chute; 3 – vibrator; 4 – loading window; 5 – airflow stabilizer; 6 – discharge window for dense fraction; 7 – discharge pipe for dense large fraction (kernel); 8 – sorting channel; 9 – fluidization chamber; 10 – flexible insert for vibrating chute; 11 – flexible insert for hopper; 12 – discharge pipe for dense small fraction (husk); 13 – discharge pipe for aspiration waste (dust, fine particles); 14 – dense large fraction (kernel); 15 – dense small fraction (husk); 16 – aspiration waste (dust, fine particles)

Figure 1 – Diagram of the device for implementing the proposed method of separation of bulk mixture in a two-stage flowing medium

Source: developed by the authors

The proposed method of separation of bulk mixture in a two-stage flowing medium is carried out as follows. First, the gravitational feeding of the bulk material mixture from the hopper 1 into the vibrating chute 2 is performed. The mixture of bulk material, for example, the waste from primary or secondary sunflower seed cleaning, or, for instance, sunflower husk, contains a dense fraction with sizes close to the size of sunflower seed kernels, crushed kernel fragments, underdeveloped seeds, pressed seeds, i.e., material commonly referred to as oil admixture. The vibrating chute 2 is connected to the hopper 1 via a flexible insert 11, and to the sorting channel 8 via a flexible insert 10, which do not hinder the movement of the vibrating chute 2 relative to other components of the device. The vibrator 3 generates oscillations in the vibrating chute 2 with the required frequency and amplitude, and the

inclination of the vibrating chute in the direction of the loading window 4 is selected depending on the characteristics of the bulk mixture.

In the vibrating chute 2, the mixture transitions to a pseudo-fluidized state, for which a vibro-inertial excitation method is used. The denser particles occupy the lower layer and are mixed towards the window 4. Denser smaller particles require significant time in the pseudo-fluidized environment for stratification and, as a result, do not reach the lower layer before being unloaded into the unloading window 4. The smallest dense particles do not undergo stratification at all due to the high internal resistance of the mixture.

The stratified mixture, in a pseudo-fluidized state, is loaded through the window 4 into the sorting channel 8, where the lower layer of the dense fraction descends onto the air flow stabilizer 5, which is inclined towards the dense fraction unloading window 6. Under the influence of gravity and aerodynamic forces, the dense fraction is unloaded into window 6. The upper layer of the mixture, which enters the sorting channel 8, remains in a pseudo-fluidized state using pneumatic methods. In this state, the upper layer of the mixture does not descend but stays suspended, with the mixture "dissolving" in a much larger volume of the sorting channel 8 than in the vibrating chute 3. As a result, the pseudo-fluidized layer achieves a low concentration of particles. At low concentration, the particles are far apart, allowing stratification of the smaller dense components of the mixture. In the pseudo-fluidized suspended layer, the smaller particles of the dense fraction are able to descend onto the air flow stabilizer 5, and are then removed through the unloading window 6 into the dense fraction unloading pipe 7.

The portion of the mixture free from both large and small dense fractions rises upwards in the sorting channel 8 due to the aerodynamic interaction between the air flow and the mixture, reaching the rarefaction chamber 9. In the rarefaction chamber, the fine dense fraction (husk) and aspirated waste (dust, small particles) are separated and enter the respective pipes 12 and 13. After that, the fractions are diverted to their respective hoppers.

A significant difference between the proposed technical solution and previously known ones is the complete change in the conditions of influence on the mixture that is in a pseudo-fluidized state. This distinction allows for the additional extraction of individual fractions from the bulk mixture, regardless of their shape and size, expanding the scope of the method's application and significantly improving the technological efficiency of sorting equipment. No known separation methods can possess these properties, as they do not include the full range of essential features present in the proposed technical solution.

The proposed utility model has been tested in practice. The method is used in the design of sorting machines in the SS-001...SS-018 model range. The separation method does not include operations or processes that could not be reproduced with the current stage of scientific and technological development, particularly in the field of agricultural engineering, which means that it is industrially applicable. No similar separation methods for bulk mixtures in a flowing medium with the indicated distinguishing features and advantages have been found in known patent documentation or scientific and technical sources. Therefore, the proposed technical solution meets the novelty criterion and is considered eligible for legal protection.

The technical advantages of the proposed technological solution include the ability to change the stratification pattern of the dense mixture, which can now extract small oil admixtures from the mixture, significantly expanding the functional capabilities of the claimed machinery, and, consequently, the scope of its application.

After describing the proposed method of separation of bulk mixtures in a flowing medium, it should be clear to experts in this field that all the above-described features are illustrative, not limiting, and presented by this example. Numerous possible modifications of

the method, such as the number of pseudo-fluidization methods in the sorting machine cascade, and separation modes, can vary depending on the state and type of the raw material undergoing separation, and, of course, lie within the scope of one of the conventional and natural approaches in this field of knowledge and are considered within the scope of the proposed technical solution.

The core of the proposed utility model lies in the fact that the separation is carried out in a two-stage flowing medium with sequential use of vibro-inertial and pneumatic methods for generating pseudo-fluidized environments, using a suspended pseudo-fluidized layer in the second stage of the method, and creating a low-concentration pseudo-fluidized layer in the second stage, which enables the additional extraction of seed or oil admixture particles larger than the aspirated waste particles but smaller than the pneumatic sorting method's ability to remove particles in the range of 0.2–1.0 mm. This approach improves the quality of separating the bulk mixture into individual fractions, and this factor provides the proposed method with the aforementioned advantages. Changing the proposed principle to another would naturally limit the range of these advantages, and it would no longer be considered a new technical solution in this field of knowledge, as similar methods would not require any creative effort from designers and engineers and could not be considered as results of their creative activity or new intellectual property objects eligible for protection.

To substantiate the regime parameters of the aerodynamic separator of the column type depending on the composition of the contaminated sunflower seed mixture, numerical simulation has been conducted. The simulation scheme is shown in Fig. 2.

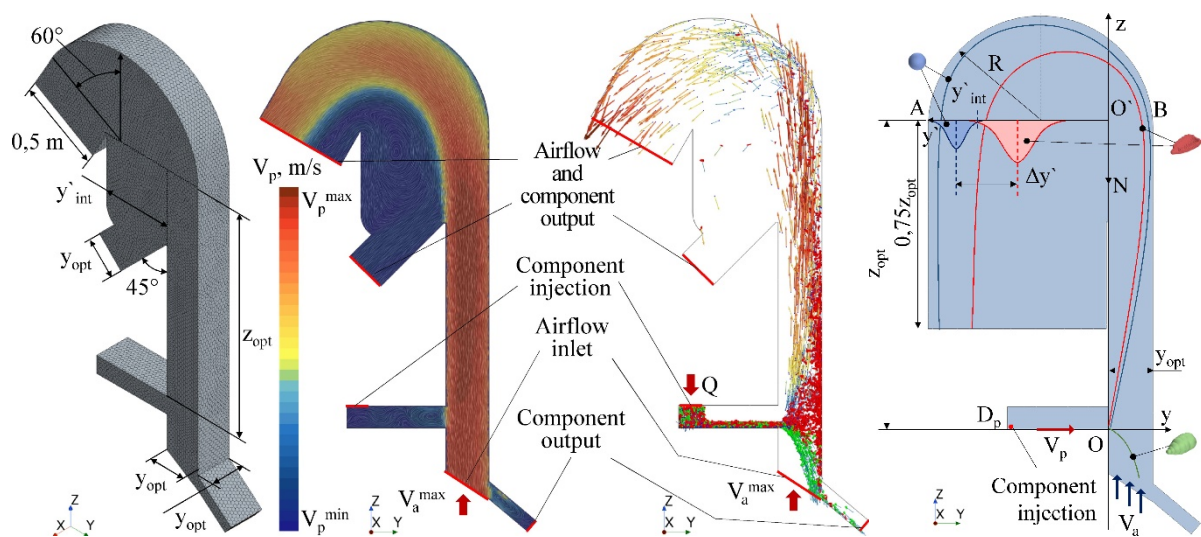


Figure 2 – The scheme of modeling the separation of components from the sunflower seed mixture waste in the pneumatic separation channel

Source: developed by the authors

It is assumed that the seed mixture has been pre-calibrated on sieves, and the effective diameter of the components is in the range from 0.009 m to 0.013 m.

The factors of numerical modeling of the movement of the components of sunflower seed mixture waste in the pneumatic separation channel and the vacuum chamber include the effective diameter of the components D_p (0.005–0.025 m), the air flow velocity V_a (5–15 m/s), and the radius of curvature of the upper edge of the vacuum chamber R (0.4–0.6 m).

As a result of numerical modeling of the separation process of sunflower seed mixture waste in the vacuum chamber, the distribution of mixture components (sunflower husk and fine particles) along the line AB (Figure 2) has been constructed, as shown in Figure 3.

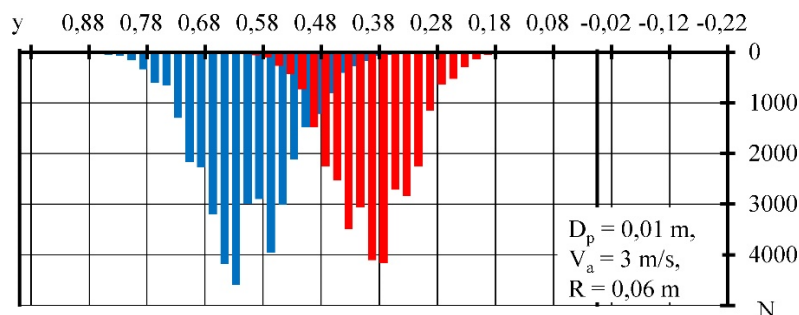


Figure 3 – An example of the distribution of sunflower seed mixture waste components in the vacuum chamber for the corresponding combination of research factors

Source: developed by the authors

The condition for the qualitative separation of sunflower husks and fine particles in the vacuum chamber is the maximization of the distance $\Delta y'$. As a result of data optimization in the Wolfram Cloud software package, the optimal values of the research factors were obtained: for $D_p = 0.005 \text{ m} \rightarrow V_a = 3.21 \text{ m/s}$, $R = 0.055 \text{ m}$; for $D_p = 0.010 \text{ m} \rightarrow V_a = 3.35 \text{ m/s}$, $R = 0.056 \text{ m}$; for $D_p = 0.015 \text{ m} \rightarrow V_a = 3.49 \text{ m/s}$, $R = 0.054 \text{ m}$.

In this case, the average distance between the distribution peaks of sunflower husks and fine particles is $\Delta y' = 0.443 \text{ m}$.

Taking into account the results of numerical modeling and the justified design and technological parameters of the column-type aerodynamic separator, an experimental research prototype was created, the general view of which is shown in Fig. 4. This separator has been implemented in production at LLC Research and Production Association «Sorting Machines» [15].



Figure 4 – General view of the experimental research prototype of the column-type aerodynamic separator SS-012 (LLC «RPA Sorting Machines»).

Source: developed by the authors

Conclusions. A method for separating a bulk mixture in a two-stage fluidized medium is proposed. The method involves the gravitational feeding of mixture particles, increasing vibro-inertial impact on them, generating a pseudo-fluidized medium, and discharging dense fractions. Additionally, the method includes a second stage, in which separation is performed in a two-stage fluidized medium using successive vibro-inertial and pneumatic methods for generating pseudo-fluidized environments. A suspended pseudo-fluidized layer is utilized, and a low-concentration pseudo-fluidized layer is created. Based on this method, a structurally and technologically justified scheme of a column-type separator has been developed.

As a result of numerical modeling of the separation process of seed mixture waste components in the rarefaction chamber, the trajectories and distributions of its components were obtained. The dependencies of the distance between the peaks of the distributions of sunflower husks and fine particles (Δy) in the rarefaction chamber on the effective diameter (D_p), the feed velocity of the components (V_a), and the curvature radius of the upper edge of the rarefaction chamber (R) were determined. Considering the condition of maximizing Δy , the optimal values of the research factors were obtained: for $D_p = 0.005$ m $\rightarrow V_a = 3.21$ m/s, $R = 0.055$ m; for $D_p = 0.010$ m $\rightarrow V_a = 3.35$ m/s, $R = 0.056$ m; for $D_p = 0.015$ m $\rightarrow V_a = 3.49$ m/s, $R = 0.054$ m. The average distance between the peaks of the distributions of sunflower husks and fine particles was found to be $\Delta y' = 0.443$ m.

Based on the results of numerical modeling and the justified structural and technological parameters of the column-type aerodynamic separator, an experimental research prototype was developed and implemented in production by LLC «RPA Sorting Machines».

List of references

1. Кудрявцев І.М., Луценко М.В, Чурсінов Ю.О. Техніко-економічне обґрунтування доцільності сортування відходів зернових та олійних культур. Наука, технології інновації. 2022. 2(22): 61–67. DOI: 10.35668/2520-6524-2022-2-08.
2. Алієв Е.Б. Фізико-математичні моделі процесів прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику: монографія. Запоріжжя: СТАТУС. 2019. 196 с.
3. Алієв Е.Б., Пацула О.М., Гриценко В.Т. Технологія комплексної безвідхідної переробки макухи з насіння олійних культур з одержанням високоякісних повноцінних протеїнових добавок у вигляді пелет та твердого біопалива: Науково-методичні рекомендації. Інститут олійних культур Національної академії аграрних наук України. Електронний аналог друкованого видання (електронна книга). Запоріжжя: СТАТУС. 2017. 96 с.
4. Богомолів О.В., Завгородній О.І., Ольшанський В.П., Богомолів О.О. До питання сепарації зернових сумішей за сукупністю пружних та аеродинамічних властивостей. Сучасні напрямки технології та механізації переробних і харчових виробництв: Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2019. 207: 5–11.
5. Козаченко О.В., Бакум М.В., Михайлов А.Д., Крєкот М.М., Чала О.С., Завгородній О.І. Підвищення посівних властивостей насіння сафлору красильного на вібраційній насіннеочисній машині. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2023. 7 (38), II: 83–90. DOI: 10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.83-90
6. Kotov B., Stepanenko S., Tsurkan O., Hryshchenko V., Pantsyr Y., Garasymchuk I., Spirin A., Kupchuk I. Fractioning of grain materials in the vertical ring air channel during electric field imposition. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2023. 99 (1): 100–104. DOI: 10.15199/48.2023.01.19
7. Shapiro M., Galperin V. Air classification of solid particles: a review. *Chemical Engineering and Processing. Process Intensification*. 2005. 44 (2): 279–285. DOI: 10.1016/j.cep.2004.02.022
8. Aarabi M.J., Ebrahimi R. Pneumatic separation of mami cultivar almond (*prunus amygdalus*) kernel from cracked shell. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*. 2017. 5(4). DOI: 10.18006/2017.5(4).573.577
9. Aderinlewo A.A. Mathematical modelling of pneumatic cleaning of cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp). A Thesis in the Department of Agricultural and Environmental Engineering, Submitted to the Faculty of Technology in partial fulfilment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy of the University of Ibadan. 2011. 194 p.

10. Aliev E.B., Bandura V.M., Pryshliak V.M., Yaropud V.M., Trukhanska O.O. Modeling of mechanical and technological processes of the agricultural industry. INMATEH – Agricultural Engineering. 2018. 54 (1): 95–104.
11. Сухін В.С., Чернобай І.В. Патент на корисну модель №105850. Спосіб сепарації сипучої суміші у текучому середовищі. Заявник: Сухін В.С., Чернобай І.В., № u201508819. Заявл. 14.09.2015. Опубл. 11.04.2016, бюл. № 7/2016.
12. Бардадим В.К., Бардадим Б.О., Кудрявцев М.І., Ярошін В.П. Патент на корисну модель №145744. Аеродинамічний сепаратор колонного типу для тонкого очищення насінневих матеріалів. Заявник: Бардадим В.К., Бардадим Б.О., Кудрявцев М.І., Ярошін В.П., № u202006728. Заявл. 20.10.2020. Опубл. 28.12.2020, бюл. № 24/2020.
13. ДСТУ 7011:2009. Соняшник. Технічні умови. Київ, UA: Держспоживстандарт України. Чинний від 27.04.2010. 8 с.
14. ДСТУ 7123:2009. Лушпиння соняшнику. Технічні умови. Київ: Держспоживстандарт України. Чинний від 28.12.2009. 8 с.
15. Кудрявцев І.М. Авторське право на службовий твір №121609. Брошура «Машина сортувальна для сипучих матеріалів СС-012. Настанови з експлуатації». Заявник: Товариство з обмеженою відповідальністю «Науково-виробниче об'єднання «Сортувальні машини». Заявл. 06.12.2023. Опубл. 29.12.2023, бюл. № 78.

References

1. Kudryavtsev, I.M., Lutsenko, M.V., & Chursinov, Yu.O. (2022) *Tekhniko-ekonomichne obgruntuvannya dotsil'nosti sortuvannya vidkhodiv zernovykh ta oliynykh kul'tur [Feasibility study of the feasibility of sorting grain and oilseed waste]*. Science, Innovation Technologies. 2(22): 61–67. DOI: 10.35668/2520-6524-2022-2-08. [in Ukrainian].
2. Aliiev, E.B. (2019). *Fizyko-matematychni modeli protsesiv pretsyziynoyi separatsiyi nasinnyevoho materialu sonyashnyku: monohrafiya [Physical and mathematical models of processes of precision separation of sunflower seed material: monograph]*. Zaporizhzhia: STATUS. 196 p. [in Ukrainian].
3. Aliiev, E.B., Patsula, O.M., & Hrytsenko, V.T. (2017). *Tekhnolohiya kompleksnoyi bezvidkhidnoyi pererobky makukhy z nasinnya oliynykh kul'tur z oderzhannyam vysokoyakisnykh povnotsinnykh proteyinovykh dobavok u vyhlyadi pelet ta tverdoho biopalyva: Naukovo-metodychni rekomendatsiyi. [Technology of complex waste-free processing of oilseed cake with the production of high-quality complete protein additives in the form of pellets and solid biofuel: Scientific and methodological recommendations]*. Institute of Oilseeds of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine. Electronic analogue of the printed edition (e-book). Zaporizhzhia: STATUS. 96 p. [in Ukrainian].
4. Bogomolov, O.V., Zavgorodniy, O.I., Olshanskyi, V.P., & Bogomolov, O.O. (2019). *Do pytannya separatsiyi zernovykh sumishey za sukupnistyu pruzhnykh ta aerodynamichnykh vlastyvostry [On the issue of separation of grain mixtures by the combination of elastic and aerodynamic properties]*. Modern directions of technology and mechanization of processing and food production: Bulletin of the Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture. 207: 5–11. [in Ukrainian].
5. Kozachenko, O.V., Bakum, M.V., Mykhaylov, A.D., Krekot, M.M., Chala, O.S., & Zavgorodniy, O.I. (2023). *Pidvyshchennya posivnykh vlastyvostry nasinnya safloru krasyl'noho na vibratsiyiniy nasinnyechysniy mashyni [Improving the sowing properties of dye safflower seeds using a vibrating seed cleaning machine]*. Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences. 7 (38), II: 83–90. DOI: 10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.83-90 [in Ukrainian].
6. Kotov, B., Stepanenko, S., Tsurkan, O., Hryshchenko, V., Pantsyr, Y., Garasymchuk, I., Spirin, & A., Kupchuk, I. (2023). Fractioning of grain materials in the vertical ring air channel during electric field imposition. *Przeglad Elektrotechniczny*. 99 (1): 100–104. DOI: 10.15199/48.2023.01.19
7. Shapiro, M., & Galperin, V. (2005). Air classification of solid particles: a review. *Chemical Engineering and Processing. Process Intensification*. 44 (2): 279–285. DOI: 10.1016/j.cep.2004.02.022
8. Aarabi, M.J., & Ebrahimi, R. (2017). Pneumatic separation of mami cultivar almond (*prunus amygdalus*) kernel from cracked shell. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*. 5(4). DOI: 10.18006/2017.5(4).573.577
9. Aderinlewo, A.A. (2011). Mathematical modelling of pneumatic cleaning of cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp). A Thesis in the Department of Agricultural and Environmental Engineering, Submitted to the Faculty of Technology in partial fulfilment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy of the University of Ibadan. 194 p.

10. Aliev, E.B., Bandura, V.M., Pryshliak, V.M., Yaropud, V.M., & Trukhanska, O.O. (2018). Modeling of mechanical and technological processes of the agricultural industry. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 54 (1): 95–104.
11. Sukhin, V.S., & Chornobay, I.V. (2016). Patent for utility model No. 105850. *Sposib separatsiyi sypuchoyi sumishi u tekuchomu seredovyshchi [Method of separation of bulk mixture in a fluid medium]*. Applicant: Sukhin V.S., Chornobay I.V., No. u201508819. Appl. 09/14/2015. Publ. 04/11/2016, Bulletin No. 7/2016 [in Ukrainian].
12. Bardadym, V.K., Bardadym, B.O., Kudryavtsev, M.I., & Yaroshin, V.P. (2020). Patent for utility model No. 145744. *Aerodynamichnyy separator kolonnoho typu dlya tonkoho ochyshchennya nasinnyevykh materialiv [Aerodynamic column-type separator for fine cleaning of seed materials]*. Applicant: Bardadym V.K., Bardadym B.O., Kudryavtsev M.I., Yaroshin V.P., No. u202006728. Appl. 10/20/2020. Publ. 12/28/2020, Bulletin No. 24/2020 [in Ukrainian].
13. DSTU 7011:2009. *Sonyashnyk. Tekhnichni umovy [Sunflower. Technical conditions]*. Kyiv, UA: Derzhspozhyvstandart of Ukraine. Effective from 27.04.2010. 8 p [in Ukrainian].
14. DSTU 7123:2009. *Lushpynnya sonyashnyku. Tekhnichni umovy [Sunflower husks. Technical conditions]*. Kyiv: State Consumer Standard of Ukraine. Effective from 28.12.2009. 8 p. [in Ukrainian].
15. Kudryavtsev I.M. (2023). Copyright for official work No. 121609. *Broshura «Mashyna sortoval'na dlya sypuchykh materialiv SS-012. Nastanovy z ekspluatatsiyi» [Brochure "Sorting machine for bulk materials SS-012. Operating instructions"]*. Applicant: Limited Liability Company "Scientific and Production Association "Sorting Machines". Application. 06.12.2023. Publ. 29.12.2023, Bulletin No. 78.

В.С. Кошулько, доц., канд. техн. наук, **І.М. Кудрявцев**, здобувач вищої освіти на третьому рівні
Дніпровський державний аграрно-економічний університет, Дніпро, Україна

Обґрунтування конструкції аеродинамічного сепаратора для очищення відходів насінневої суміші соняшника

Метою досліджень є обґрунтування конструктивно-технологічної схеми аеродинамічного сепаратора для очищення відходів насінневої суміші соняшника, який забезпечує розділення подовжених часток за питомою вагою та морфометричними характеристиками. Це досягається шляхом зміни формування псевдорозріджених шарів і послідовності використання принципів генерації псевдорозрідженого текучого середовища.

Запропоновано спосіб сепарації сипучої суміші у двостадійному середовищі, що включає гравітаційну подачу частинок, зростаючий віброінерційний вплив, генерацію псевдорозрідженого середовища та відвід щільних фракцій. Друга стадія включає сепарацію із послідовним застосуванням віброінерційного та пневматичного способів генерації псевдорозріджених середовищ, використання завислого шару і створення шару низької концентрації. Обґрунтовано конструктивно-технологічну схему сепаратора колонного типу. Чисельне моделювання процесу сепарації компонентів насінневих відходів у камері розрідження дозволило визначити траєкторії руху та розподіл компонентів. Отримані залежності відстані між піками розподілів лущиння та дрібних частинок (Δy) від ефективного діаметра (D_p), швидкості подачі (V_a) і радіуса кривизни верхньої грані камери (R). Раціональні значення факторів: для $D_p = 0,005$ м $\rightarrow V_a = 3,21$ м/с, $R = 0,055$ м; для $V_a = 0,010$ м $\rightarrow V_a = 3,35$ м/с, $R = 0,056$ м; для $D_p = 0,015$ м $\rightarrow V_a = 3,49$ м/с, $R = 0,054$ м. Середнє значення відстані між піками розподілів $\Delta y = 0,443$ м.

На основі моделювання та обґрунтованих параметрів створено експериментальний зразок аеродинамічного сепаратора колонного типу, який впроваджено у виробництво ТОВ «НВО «Сортувальні машини».

корм, пресування, стиснення, чисельне моделювання, лабораторні дослідження, змішування, тиск, параметри, фізико-механічні властивості, ефективність

Одержано (Received) 12.11.2024

Прорецензовано (Reviewed) 16.12.2024

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2024

УДК 633.15:631.3:004.94 DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.123-130](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.123-130)

В.Ю. Дудін, доц, канд. техн. наук, **І.М. Білоус**, здобувач вищої освіти на третьому рівні
Дніпровський державний аграрно-економічний університет, Дніпро, Україна
e-mail: bilous.i.m@dsau.dp.ua

Дослідження процесу руйнування зерна кукурудзи з використанням цифрових моделей

Основою цього дослідження є процес руйнування зерна кукурудзи. Проведено випробування для визначення впливу геометричних параметрів та фізико-механічних (модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона, гранична напруга розтягнення та зсуву) на механічні властивості зерна кукурудзи. Розроблено модель механіки контакту пуансона з зерном кукурудзи для аналізу його механічних властивостей, які впливають на якість подрібнення та для визначення адекватних параметрів моделі, що відповідадуть лабораторному експерименту.

зерно кукурудзи, моделювання, стиск, зусилля руйнування

Постановка проблеми. В сучасному машинобудуванні широкого розповсюдження набуло проектування систем на основі моделей (Model-Based Systems Engineering (MBSE)), однією з основних ідей якого є створення та випробування віртуальних моделей технічних засобів, які розробляються [1]. Такий підхід, в порівнянні з традиційним, різко зменшує ресурси та час на процес розробки нової або удосконалення існуючої машини, проте адекватність моделювання цілком буде залежати від точності вихідних даних, на основі яких проводиться моделювання. Це стосується і процесу руйнування кормових матеріалів, зокрема зерна кукурудзи, коли для отримання достовірних даних результатів моделювання потрібно створити модель зернини, максимально наближену до реальної, та задати фізико-механічні параметри цій моделі, які найбільш повно відповідадуть параметрам досліджуваного зразка.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як стверджують автори [2], руйнування зерна може бути зумовлене як внутрішніми, так і зовнішніми факторами, такими як фізико-механічні властивості зерна та конструктивні параметри обладнання, що використовується для його обробки. Дослідження механічних властивостей зерна [3] показують, що текстура та структура клітин значно впливають на його механічні характеристики.

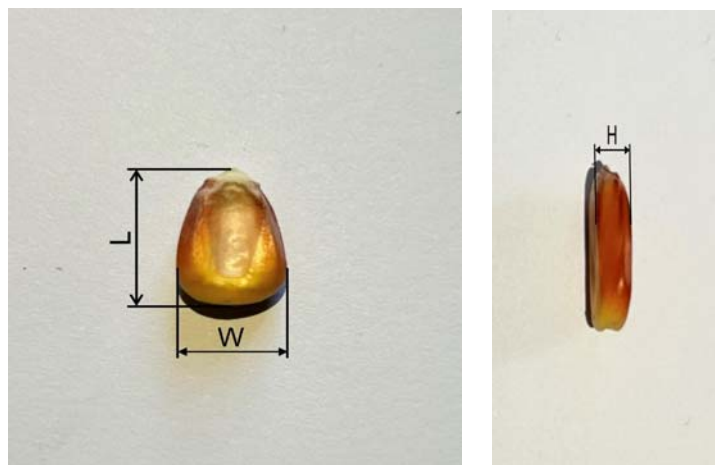
Метод дискретних елементів (DEM) був апробований для прогнозування пошкоджень зерна в промислових системах обробки. Експерименти показали, що пошкодження зерна корелює з умовами обробки, і моделювання було вдосконалено шляхом оптимізації параметрів, що призводить до підвищення точності прогнозування руйнування [4]. Також цей метод використовують для дослідження властивостей частинок, для яких важко визначити дію перехідних сил та розсіювання енергії звичайним експериментальним методом [5].

Точність моделювання дискретних елементів залежить від вхідних параметрів моделі і її форми [6], а саму модель створюють шляхом об'єднання сферичних частинок, що називається агрегацією сфер [7, 8]. Цей метод було успішно застосовано для моделювання зерен таких культур, як горох [9], рис [10], соя [11] і пшениця [12]. При цьому особливості вихідних параметрів моделі будуть варіюватися не лише в

залежності від виду зерна, а і від сорту всередині одного виду. В зв'язку з цим виникає необхідність в уточненні вихідних параметрів для конкретного виду та сорту.

Постановка завдання. Метою дослідження є створення в середовищі Simcenter STAR-CCM+ адекватної віртуальної моделі зерна кукурудзи шляхом зіставлення зусилля руйнування отриманого віртуально та лабораторно.

Виклад основного матеріалу. На першому етапі досліджень було визначено середні розміри зернини кукурудзи сорту П8816 зі 150 заміряних зернин - довжина (L) – 11,1 мм, ширина (W) – 8,1 мм, висота (H) – 4,7 мм (рис. 1).



L – довжина; W – ширина; H – висота

Рисунок 1 – Розміри зерна кукурудзи

Джерело: розроблено авторами

На основі замірів та враховуючи огляд досліджень в програмному середовищі Simcenter STAR-CCM+ [2, 13], методом агрегації 86 сфер, було створено модель дискретних елементів (DEM) (рис. 2). При цьому було застосовано контактна модель Герца-Міндліна, відповідно до якої параметри моделі були розділені на параметри властивостей матеріалу та параметри взаємодії. До перших входять щільність частинок, коефіцієнт Пуассона, модуль Юнга, гранична напруги розтягу та зсуву. Параметри взаємодії включають коефіцієнт відновлення зіткнення, коефіцієнт статичного тертя і коефіцієнт тертя кочення (табл. 1).

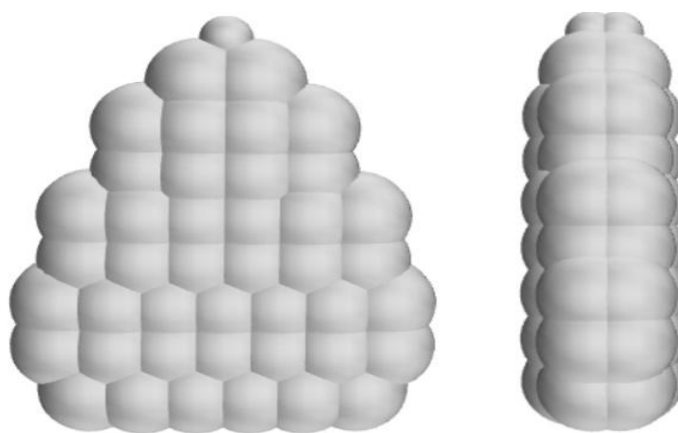


Рисунок 2 – Модель зернини кукурудзи

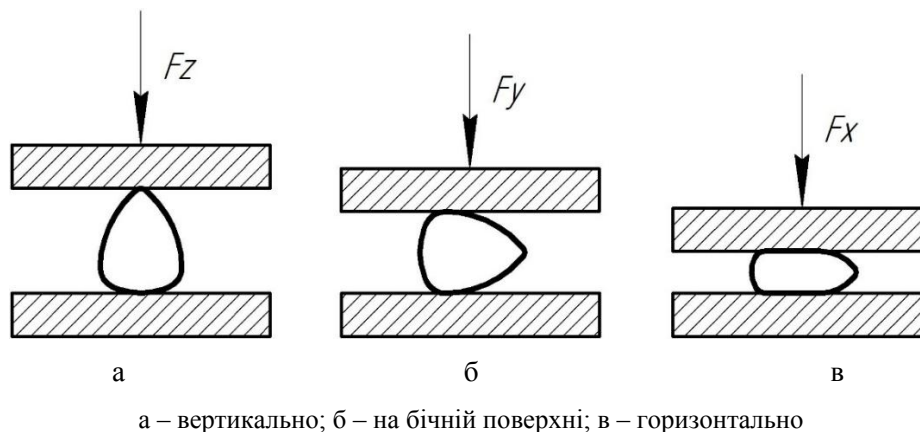
Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 1 – Параметри симуляції DEM

| Матеріали | Параметри | Значення |
|--------------------|--|----------------------|
| Кукурудза | Коефіцієнт Пуассона | 0,3...0,5 |
| | Модуль Юнга, МПа | 10...40 |
| | Щільність частинок, кг/м ³ | 1213 |
| | Коефіцієнт відновлення після зіткнення | 0,37 [14] |
| | Коефіцієнт статичного тертя | 0,2 [15] |
| | Гранична напруга розтягу, МПа Гранична напруга зсуву, МПа | 1...3 1...3 |
| Сталь | Коефіцієнт Пуассона | 0,3 |
| | Модуль зсуву, Па | $7,9 \times 10^{10}$ |
| | Щільність, кг/м ³ | 7800 |
| Кукурудза та сталь | Коефіцієнт відновлення після зіткнення | 0,5 [16] |
| | Коефіцієнт статичного тертя | 0,408 [16] |
| | Коефіцієнт тертя кочення | 0,01 [16] |

Джерело: розроблено авторами

Силу руйнування визначали в трьох положеннях зернини: вертикальному, на бічній поверхні та горизонтальному (рис. 3).



а – вертикально; б – на бічній поверхні; в – горизонтально

Рисунок 3 – Положення зернини кукурудзи при визначенні зусилля руйнування:

Джерело: розроблено авторами

В програмному середовищі Simcenter STAR-CCM+ на основі розробленої моделі зерна кукурудзи було проведено віртуальні дослідження процесу її руйнування. При цьому застосували повний факторний план де змінними факторами були коефіцієнт Пуассона (μ_p), модуль Юнга (E_p) та гранична напруга розтягу та зсуву (W_p), які варіювались на трьох рівнях (табл. 2).

Таблиця 2 - Рівні та інтервали варіювання факторів

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

Джерело: розроблено авторами

Отримані в результаті віртуального експерименту дані було оброблено в хмарному програмному середовищі Wolfram Cloud що дало змогу отримати рівняння регресії залежності сили руйнування зерна кукурудзи від досліджуваних факторів, які, після перевірки на адекватність та відсіювання незначущих факторів набули вигляду:

- при положенні зерна кукурудзи вертикально

$$F_z = 444,043 - 16,379E_p + 0,173E_p^2 - 121,583W_p + 9,039E_pW_p; \quad (1)$$

- при положенні зерна кукурудзи на бічній поверхні

$$F_y = 955,5 - 19,352E_p - 231,111\mu_p - 743,556W_p + 18,1E_pW_p + 159,056W_p^2; \quad (2)$$

- при положенні зерна кукурудзи горизонтально:

$$F_x = 1392,43 - 38,416E_p + 0,23E_p^2 - 453,89\mu_p - 853,94W_p + 27,022E_pW_p + 155,39W_p^2. \quad (3)$$

Графічну інтерпретацію отриманих залежностей приведено на рис. 4.

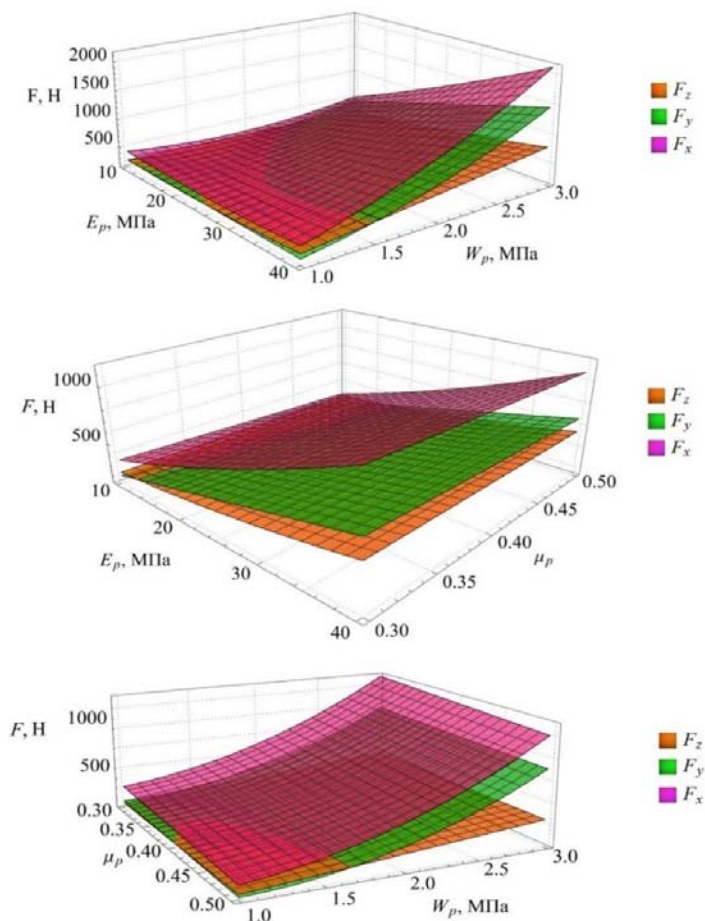
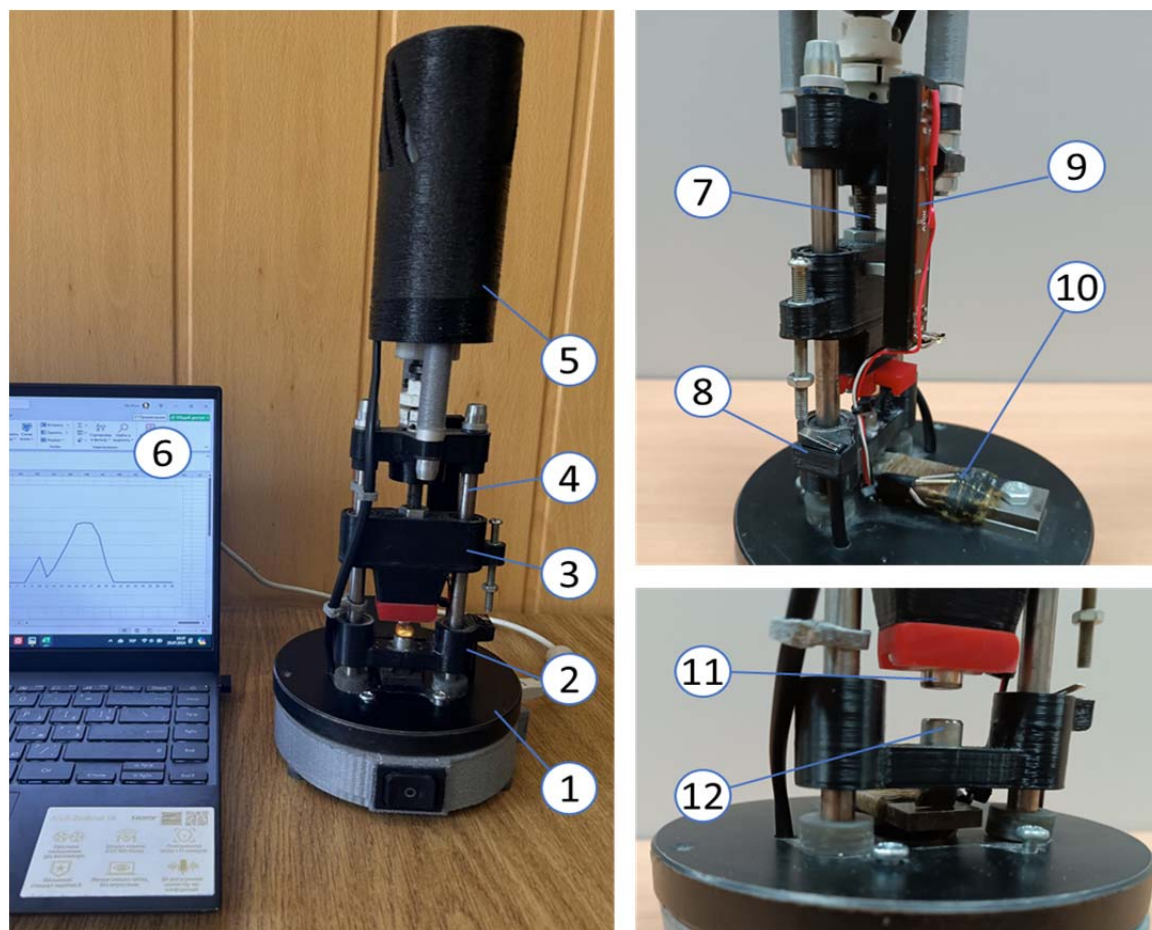


Рисунок 4 – Залежність зусилля руйнування зерна кукурудзи від модуля Юнга (E_p), коефіцієнта Пуассона (μ_p) та граничної напруги розтягу та зсуву (W_p) при положенні зернини вертикально (F_z), горизонтально (F_x) та на бічній поверхні (F_y)

Джерело: розроблено авторами

Наступним етапом досліджень було отримання експериментальних значень зусилля руйнування зерен кукурудзи при тих же умовах, що і при віртуальному експерименті. Лабораторні дослідження проводилися на розробленому та реалізованому лабораторному стенді (рис. 5), який складається зі станини 1, встановлених на ній напрямних 4, опорної 2 та рухомої 3 кареток, які ковзають по напрямним завдяки лінійним підшипникам. Опорна каретка 2 встановлена на тензометричний датчик 10 нижнім пуансоном 12, який у нижній частині має призматичну форму. Рухома каретка 3 переміщується по напрямним у вертикальній площині за допомогою електродвигуна постійного струму 5, який з'єднано з кареткою передачею гвинт-гайка, нижнє положення рухомої каретки 3 обмежується положенням упору кінцевого вимикача 8. Повзунковий потенціометр 9 (CDE91N-60-B100K) призначений для визначення положення рухомої каретки 3, вихідні контакти потенціометра з'єднані проводами з платою Arduino Uno A Tmega 328P-PU (на рис. 2 не показано). Вихідні контакти тензометричного датчика з'єднані проводами із аналого-цифровим перетворювачем HX711, дані з якого передаються на плату Arduino, з якої, через USB інтерфейс передаються до програмного забезпечення «Arduino-1.8.9-windows», встановленому на ПЕОМ 6. Швидкість переміщення рухомої каретки 3 складала 0,0025 м/с, діаметр верхнього 11 і нижнього 12 пуансонів – 10 мм.



1 – основа; 2 – опорна каретка; 3 – рухома каретка; 4 – напрямна; 5 – електродвигун постійного струму; 6 – ПЕОМ; 7 – гвинт приводу рухомої каретки; 8 – кінцевий вимикач; 9 – тензометричний датчик; 10 – тензометричний датчик; 11 – верхній пуансон; 12 – нижній пуансон

Рисунок 5 – Лабораторне обладнання для дослідження процесу стиску зерна
Джерело: розроблено авторами

Для експериментальних досліджень випадковим чином було утворено три групи по 50 зернин кукурудзи сорту П8816, для яких було визначено зусилля руйнування. При вологості зерна 12,34% зусилля руйнування при розташуванні зерна:

- вертикально – $F_z=78,57-259,94$ Н, середнє значення – $F_z=169,36$ Н;
- на бічній поверхні – $F_y=96,92-273,39$ Н, середнє значення – $F_y=142,74$ Н;
- горизонтально – $F_x=83,82-672,65$ Н, середнє значення $F_x=376,72$ Н.

На заключному етапі досліджень було проведено співставлення зусилля руйнування зерен кукурудзи отриманого в результаті віртуального та лабораторного експериментів. За допомогою програмного середовища MS Excel було визначено значення факторів, при яких модель відповідає значенням, отриманим в результаті лабораторних досліджень: модуль Юнга $E_p = 10$ МПа; коефіцієнт Пуассона $\mu_p = 0,48$; гранична напруга розтягу та зсуву $W_p = 2,4$ МПа.

Висновки. За результатами проведених досліджень було отримано наступне:

- базуючись на замірах зерен кукурудзи сорту П8816 та враховуючи огляд існуючих досліджень в програмному середовищі Simcenter STAR-CCM+, методом агрегації 86 сфер, було створено модель дискретних елементів (DEM);

- за результатами віртуального повнофакторного експерименту отримано рівняння регресії, які описують залежність зусилля руйнування зерна кукурудзи від коефіцієнту Пуассона (μ_p), модулю Юнга (E_p) та граничної напруги розтягу та зсуву (W_p), при різних напрямках дії на зерно. З'ясовано, що найбільший вплив на зусилля, необхідне для руйнування зернини з фізико-механічних параметрів має гранична напруга розтягнення та зсуву, а найменший – коефіцієнт Пуассона;

- на розробленому та реалізованому лабораторному стенді було проведено експериментальні дослідження зусилля руйнування зерна кукурудзи за аналогічною до віртуального експерименту схемою дії на зерно. За результатами співставлення було визначено значення факторів, при яких модель відповідає значенням, отриманим в результаті лабораторних досліджень: модуль Юнга $E_p = 10$ МПа; коефіцієнт Пуассона $\mu_p = 0,48$; гранична напруга розтягу та зсуву $W_p = 2,4$ МПа.

Отримані результати дають змогу уточнити вихідні параметри при моделюванні зерен кукурудзи що забезпечить більш точні результати віртуальних досліджень процесів його руйнування при різних варіантах взаємодії з робочими органами.

Список літератури

1. Shevchenko, N., 2020: An Introduction to Model-Based Systems Engineering (MBSE). Carnegie Mellon University, Software Engineering Institute's Insights (blog), Accessed January 28, 2025, <https://doi.org/10.58012/d464-4f49>.
2. Арендаренко, В. М. Самойленко, Т. В. Математичне моделювання процесу завантаження силосів зерном. *Вісник Полтавської Державної Аграрної Академії*, 2018. (2), 158-161. <https://doi.org/10.31210/visnyk2018.02.26>
3. Kubík, L., Božiková, M., Kažimírová, V. Mechanical Properties of Wheat Grains at Compression. *Acta Technologica Agriculturae*, 2021, Slovak University of Agriculture in Nitra, vol. 24 no. 4, pp. 202-208. <https://doi.org/10.2478/ata-2021-0033>
4. Chen, Z., Wassgren, C., Tamrakar, A., Ambrose, R. P. K. Validation of a DEM Model for predicting grain damage in an industrial-scale handling system. *Smart Agricultural Technology*, 2023. 5, 100274. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100274>
5. Алієв Е. Б. Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва: підручник. Київ: Аграрна наука, 2023. 340 с.
6. Zhong, J., Tao, L., Li, S., Zhang, B., Wang, J., & He, Y. Determination and interpretation of parameters of double-bud sugarcane model based on discrete element. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022. 203, 107428. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107428>
7. Liu, Z., Ma, H., Zhao, Y. Comparative study of discrete element modeling of tablets using multi-spheres,

- multi-super-ellipsoids, and polyhedrons. *Powder Technology*, 2021. 390, 34–49. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.05.065>
8. Kruggel-Emden, H., Rickelt, S., Wirtz, S., Scherer, V. A study on the validity of the multi-sphere Discrete Element Method. *Powder Technology*, 2008. 188(2). P. 153–165. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.04.037>
 9. Wiącek, J., Molenda, M., Horabik, J., Ooi, J. Y. Influence of grain shape and intergranular friction on material behavior in uniaxial compression: Experimental and DEM modeling. *Powder Technology*, 2012. 217, 435–442. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.10.060>
 10. Markauskas, D., Kačianauskas, R. Investigation of rice grain flow by multi-sphere particle model with rolling resistance. *Granular Matter*, 2010. 13(2). P. 143–148. <https://doi.org/10.1007/s10035-010-0196-5>
 11. Boac, J. M., Casada, M. E., Maghirang, R. G., Harner, J. P. Material and interaction properties of selected grains and oilseeds for modeling discrete particles. *Transactions of the ASABE*, 2010. 53(4), 1201–1216. <https://doi.org/10.13031/2013.32577>
 12. Weigler, F., Mellmann, J. Investigation of grain mass flow in a mixed flow dryer. *Particuology*, 2014. 12. P. 33–39. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2013.04.004>
 13. Coetzee, C. Review: Calibration of the discrete element method. *Powder Technology*, 2017. 310, 104–142. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.01.015>
 14. Wang, L., Zhou, W., Ding, Z., Li, X., Zhang, C. Experimental determination of parameter effects on the coefficient of restitution of differently shaped maize in three-dimensions. *Powder Technology*, 2015. 284. P. 187–194. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.06.042>
 15. Markauskas, D., Ramírez-Gómez, Á., Kačianauskas, R., Zdancevičius, E. Maize grain shape approaches for DEM modelling. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015. 118. P. 247–258. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.09.004>
 16. Li, X., Liu, F., Zhao, M., Zhang, T., Li, F., Zhang, Y. Determination of contact parameters of maize seed and seed metering device. (2018). *Agric. Mech. Res.*, 40. P. 149–153.

References

1. Shevchenko, N., 2020: An Introduction to Model-Based Systems Engineering (MBSE). Carnegie Mellon University, Software Engineering Institute's Insights (blog), Accessed January 28, 2025, <https://doi.org/10.58012/d464-qb49>.
2. Arendarenko, V. M., & Samoilenko, T. V. (2018). The mathematical modeling of the loading process of grain to the silos. *Scientific Progress & Innovations*, (2), 158–161. <https://doi.org/10.31210/visnyk2018.02.26>
3. Kubík, L., Božiková, M. & Kažimírová, V. Mechanical Properties of Wheat Grains at Compression. *Acta Technologica Agriculturae*, 2021, Slovak University of Agriculture in Nitra, vol. 24 no. 4, pp. 202-208. <https://doi.org/10.2478/ata-2021-0033>
4. Chen, Z., Wassgren, C., Tamrakar, A., & Ambrose, R. P. K. (2023). Validation of a DEM Model for predicting grain damage in an industrial-scale handling system. *Smart Agricultural Technology*, 5, 100274. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100274>
5. Aliiev Elchyn. Numerical simulation of agricultural production processes: textbook. Kyiv: Agrarna nauka, 2023. 340 p.
6. Zhong, J., Tao, L., Li, S., Zhang, B., Wang, J., & He, Y. (2022). Determination and interpretation of parameters of double-bud sugarcane model based on discrete element. *Computers and Electronics in Agriculture*, 203, 107428. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107428>
7. Liu, Z., Ma, H., & Zhao, Y. (2021). Comparative study of discrete element modeling of tablets using multi-spheres, multi-super-ellipsoids, and polyhedrons. *Powder Technology*, 390, 34–49. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.05.065>
8. Kruggel-Emden, H., Rickelt, S., Wirtz, S., & Scherer, V. (2008). A study on the validity of the multi-sphere Discrete Element Method. *Powder Technology*, 188(2). P. 153–165. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.04.037>
9. Wiącek, J., Molenda, M., Horabik, J., & Ooi, J. Y. (2012). Influence of grain shape and intergranular friction on material behavior in uniaxial compression: Experimental and DEM modeling. *Powder Technology*, 217, 435–442. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.10.060>
10. Markauskas, D., & Kačianauskas, R. (2010). Investigation of rice grain flow by multi-sphere particle model with rolling resistance. *Granular Matter*, 13(2). P. 143–148. <https://doi.org/10.1007/s10035-010-0196-5>
11. Boac, J. M., Casada, M. E., Maghirang, R. G., & Harner, J. P. (2010). Material and interaction properties

- of selected grains and oilseeds for modeling discrete particles. *Transactions of the ASABE*, 53(4), 1201–1216. <https://doi.org/10.13031/2013.32577>
12. Weigler, F., & Mellmann, J. (2014). Investigation of grain mass flow in a mixed flow dryer. *Particuology*, 12, 33–39. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2013.04.004>
 13. Coetzee, C. (2017). Review: Calibration of the discrete element method. *Powder Technology*, 310, 104–142. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.01.015>
 14. Wang, L., Zhou, W., Ding, Z., Li, X., & Zhang, C. (2015). Experimental determination of parameter effects on the coefficient of restitution of differently shaped maize in three-dimensions. *Powder Technology*, 284. P. 187–194. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.06.042>
 15. Markauskas, D., Ramírez-Gómez, Á., Kačianauskas, R., & Zdancevičius, E. (2015). Maize grain shape approaches for DEM modelling. *Computers and Electronics in Agriculture*, 118. P. 247–258. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.09.004>
 16. Li, X., Liu, F., Zhao, M., Zhang, T., Li, F., & Zhang, Y. Determination of contact parameters of maize seed and seed metering device. (2018). *Agric. Mech. Res.*, 40. P. 149–153.

Volodymyr Dudin, Assoc. Prof., PhD tech. sci, **Illia Bilous**, PhD student
Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

Investigation of the Corn Kernel Destruction Process Using Digital Models

In modern mechanical engineering, Model-Based Systems Engineering (MBSE) has become widely adopted. One of its key concepts is the creation and testing of virtual models of the designed technical systems. Compared to traditional approaches, this method significantly reduces resources and development time for new machines or improvements to existing ones. However, the accuracy of modeling entirely depends on the precision of the input data used for simulation. This also applies to the process of feed material destruction, particularly corn kernels. To obtain reliable simulation results, it is necessary to create a model of a kernel that closely resembles the real one and assign it physical and mechanical parameters that most accurately correspond to the studied sample.

The aim of this research is to create an adequate virtual model of a corn kernel in the Simcenter STAR-CCM+ environment by comparing the destruction force obtained virtually and in laboratory experiments. Based on measurements and a review of studies in the Simcenter STAR-CCM+ software, a discrete element model (DEM) was developed using the aggregation of 86 spheres, employing the Hertz-Mindlin contact model. A virtual full-factorial experiment was conducted, resulting in regression equations describing the dependence of the kernel destruction force on Poisson's ratio (μ_p), Young's modulus (E_p), and ultimate tensile and shear stress (W_p) under different loading directions.

A laboratory test stand was developed and implemented, where experimental studies of the destruction force of corn kernels were conducted under conditions analogous to the virtual experiment. The comparison of results identified factor values at which the model matches the laboratory research findings: Young's modulus $E_p = 10$ MPa, Poisson's ratio $\mu_p = 0.48$, and ultimate tensile and shear stress $W_p = 2.4$ MPa. The obtained results allow for refining the input parameters in corn kernel simulations, ensuring more accurate virtual studies of the destruction process under various interactions with working elements.

corn grain, modeling, compression, fracture force

Одержано (Received) 11.11.2024

Прорецензовано (Reviewed) 13.12.2024

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2024

UDC 631.53:62-50:681.5 DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.131-141](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.131-141)**Elchyn Aliiev**, Prof., DSc., Senior Researcher*Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine***Olha Aliieva**, Senior Researcher, PhD.*Institute of Oilseed Crops of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Zaporizhzhia, Ukraine***Volodymyr Govorukha**, Prof., DSc phys.&math.sci., **Oleksandr Kobets**, Assoc., Prof., PhD. tech. sci.*Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine**e-mail: aliev@meta.ua*

Development of Mechatronic Systems for Targeted Division and Selection of Seed Material

One of the key stages in seed material processing is sorting, as seed mixtures typically contain impurities of various origins. These impurities include stems, leaves, mineral inclusions, weed seeds, and damaged seeds of the primary crop. Seed sorting, as a subtask of separation, relies on the physical differences between the components of the mixture. The main physical characteristics of seeds include size, shape, weight, color, density, and others. These properties determine the parameters of modern seed cleaning equipment, influencing its design and operational efficiency. Modern separation methods based on physical and mechanical properties have been reviewed, focusing on aerodynamic characteristics (pneumatic columns), size (screens of various shapes), density (pneumo-vibratory separators), elasticity, electrophysical properties (dielectric separators), and color (photo separators). Technological lines for the separation of small-seeded crops have been presented, taking these parameters into account. The designs of adaptive aerodynamic, vibratory screen, vibro-pneumatic separators, selective seed graders, and photoelectronic separators have been described in detail. These machines are equipped with sensors, electric motors, control units, and software, enabling enhanced productivity and separation quality. For instance, an adaptive aerodynamic separator ensures uniform airflow, promoting efficient mixture separation, while the vibro-pneumatic separator can automatically adjust the inclination of the working surface to optimize the process. The integration of adaptive mechatronic systems into primary seed production processes significantly improves seed quality, reduces energy consumption, and ensures the flexibility of technological lines. Research results confirm the effectiveness of the proposed designs, fostering the development of modern methods for seed material separation. Furthermore, the development and implementation of these advanced systems align with the increasing demand for high-quality seeds in agriculture. The use of adaptive mechatronic systems allows for real-time monitoring and adjustment of separation processes, minimizing human intervention and errors. This not only enhances the precision of sorting but also contributes to sustainable practices by reducing waste and energy usage. In conclusion, the evolution of seed sorting technologies underscores the importance of innovation in agricultural machinery. By leveraging cutting-edge technologies such as photoelectric sorting and pneumatic systems, the agricultural industry can meet the growing challenges of productivity, efficiency, and environmental responsibility. The adoption of these advanced systems promises to elevate the standards of seed processing, ensuring better yields and more sustainable farming practices worldwide.

seeds, separation, cleaning, sorting, automation, efficiency, quality

Problem setting. In Ukraine, there is a regulatory document DSTU 2240-93 'Seed of Agricultural Crops. Varietal and Sowing Quality' [1], which defines standards for varietal and sowing quality, methods of packaging, labeling, transportation, and other relevant requirements. According to this standard, seed material must be of good quality: large, clean, with high germination, free from disease pathogens and impurities [2].

Seeds of different agricultural crops are divided into three main categories: basic seed (BS), elite seed (ES), and reproductive seed (RS). Each category is characterized by specific quality indicators, including varietal purity, content of seeds of the main crop, the amount of seeds of other crops and weeds, germination, and maximum moisture content [3, 4].

Varietal purity is highest for BS (99.6–99.8%), slightly lower for ES (99.2–99.7%), and lowest for RS (92–98%). The content of seeds from other crops in the BS category is minimal (20–50 seeds/kg), while for RS this figure can reach 240 seeds/kg. The content of weed seeds is lowest for BS (8–50 seeds/kg) and highest for RS, reaching 1500 seeds/kg. Germination varies from 90% for BS, 85% for ES, to 70–80% for RS, depending on the crop. The maximum permissible moisture content of seeds is the same for all categories and crops, ranging from 9–13%.

Very high requirements are placed on seed material of small-seed crops, which can be achieved through detailed study of the physical-mechanical properties of the seed material of each crop and the correct selection of equipment for separation based on the results of the research.

Analysis of the latest studies and publications. One of the main stages of the seed material processing process is the sorting stage, as the seed mixture contains various impurities: stems, leaves, mineral impurities, and others. Additionally, the seed material will contain low-quality seeds of other crops, broken and damaged seeds of the main crop, as well as weed seeds [5]. By processing the seed material through the removal of impurities and excess moisture, its quality is improved. The principle behind the operation of seed cleaning equipment is based on the physical differences in characteristics that can exist between the seeds of cultivated plants and other unwanted particles. Seed sorting can be viewed as a specific task within the separation process aimed at enhancing the quality of seed material.

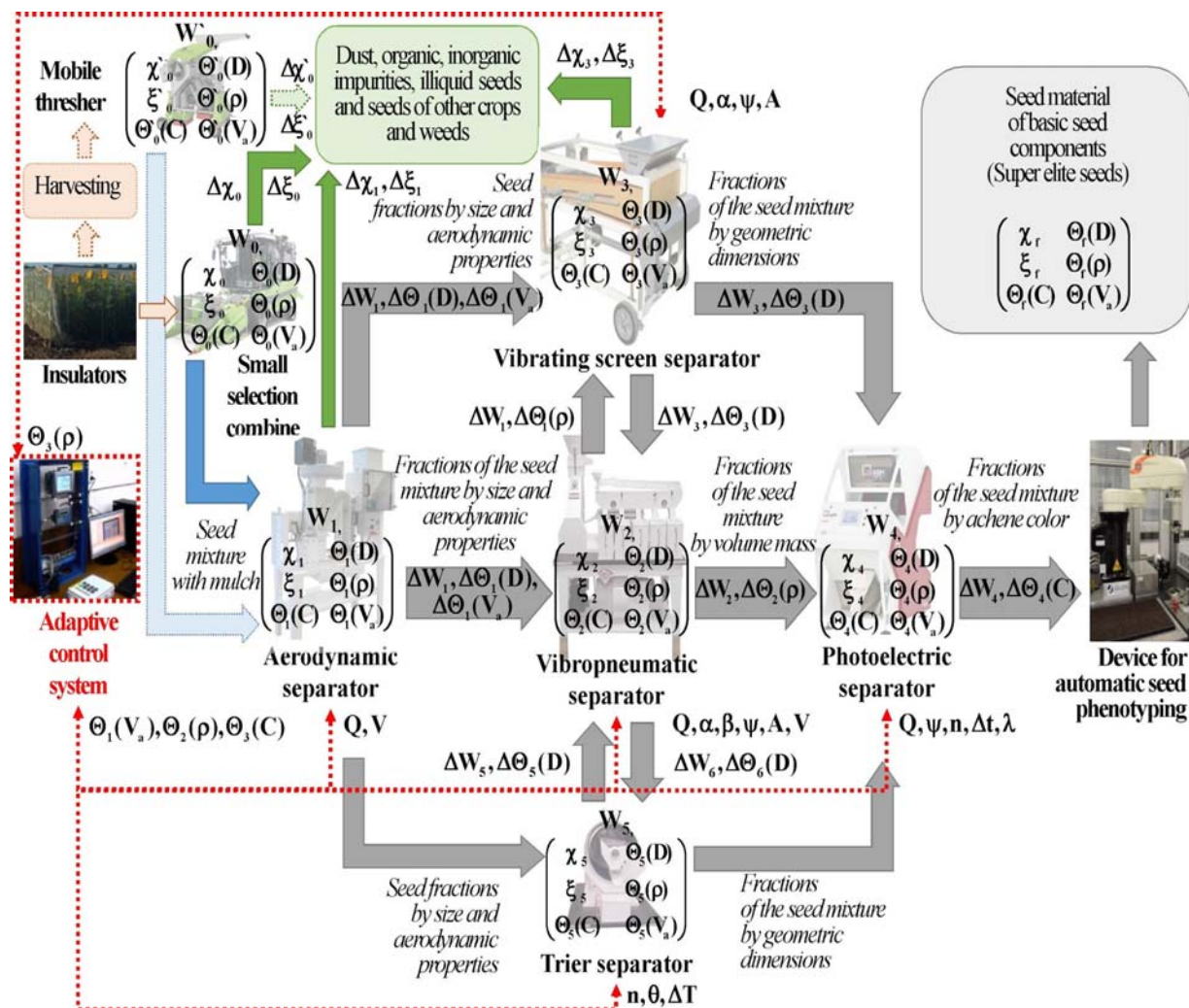
The result of sorting the seed material is influenced by various individual physical properties of the seeds [6]. Physical characteristics include: size, length, weight, shape, color, etc. [7]. Without examining the physical characteristics of different types of seeds, it is impossible to further adjust modern seed cleaning machines [8, 9], improve and develop new types of machines [10, 11]. Published reviews of characteristics [12, 13] have allowed the formation of a modern technological line for the separation processes of small-seed crop materials, taking into account their physical-mechanical characteristics (Fig. 1). This area of research continues to develop.

All seed material separation methods can be categorized based on the physical-mechanical properties of the seeds: by aerodynamic properties (using pneumatic columns and other air channels) [14, 15, 16]; by size characteristics (width and thickness on screens with round and rectangular holes, length on triers) [17, 18, 19]; by density or bulk weight (using pneumatic tables, pneumatic vibratory separators) [20, 21]; by elasticity (on impact sorting tables) [22]; by electrophysical properties (in dielectric separators, separators in a corona discharge field); and by color (using photo separators) [23].

Setting objectives. The aim of the research is to enhance the efficiency of technical and technological support in primary seed production by justifying adaptive mechatronic systems for the precise division and selection of seed material from agricultural crops.

Presentation of the main material. The adaptive aerodynamic separator (Fig. 2) consists of a frame, a hopper with a flap, a separation chamber with a vertically arranged cascade of flaps, and a centrifugal fan. The fan is driven by an asynchronous electric motor. The separator is also equipped with fraction and dust collectors. Additionally, it is provided with stepper motors. The shafts of these motors are connected to the hopper flap and the cascade of vertically arranged flaps. Inside the separation chamber, air flow speed sensors are placed. A camera is installed in front of the transparent front wall of the separation chamber. A control unit is provided for managing the flaps. This unit is connected by electrical wires to

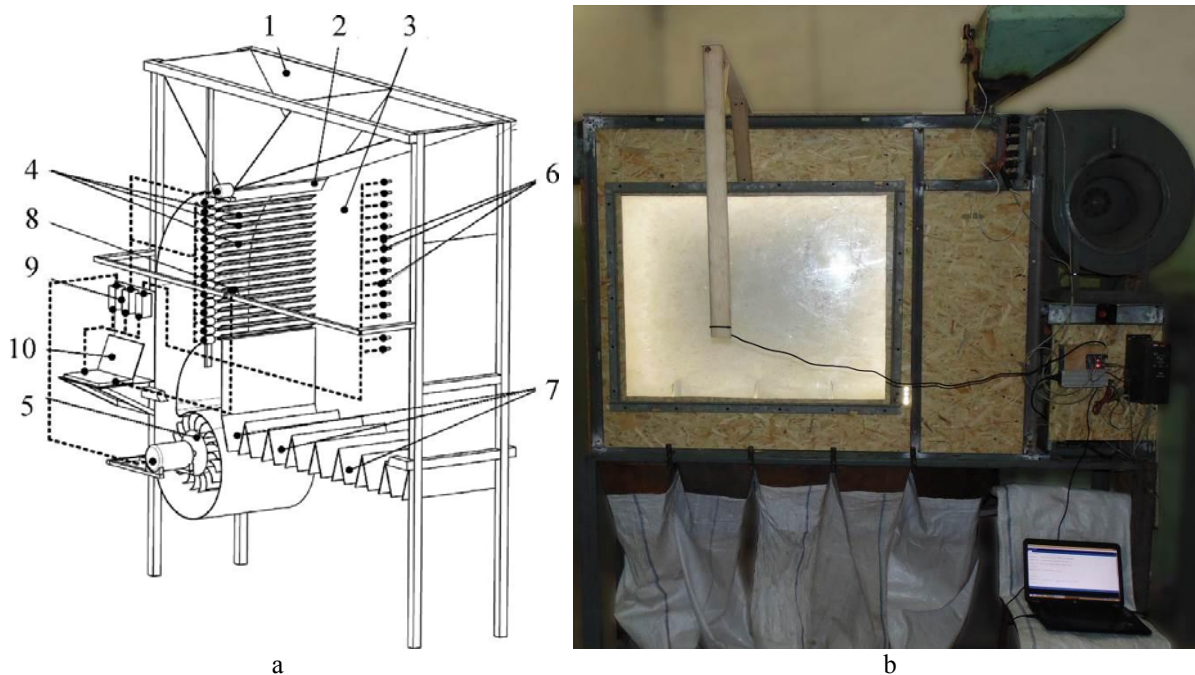
the stepper motors. The asynchronous electric motor is connected to a frequency converter via electrical wires.



Q – seed feed rate, kg/h; V – air speed, m/s; α, β – angles of inclination of the surface (screen), °; ψ – frequency of surface oscillations (screen), s^{-1} ; A – amplitude of surface oscillations (screen), m; n – drum rotation frequency, rpm; Δt – time delay for nozzle activation, ms; λ – photodetector sensitivity, %; θ – tray inclination angle, °; ΔT – rotation duration, s; W – seed mixture moisture content, %; χ – content of organic and inorganic impurities, %; ξ – degree of seed material damage, %; $\Theta(V_a)$ – fractional composition by aerodynamic properties V_a , %; $\Theta(D)$ – fractional composition by geometric size D , %; $\Theta(\rho)$ – fractional composition by bulk density ρ , %; $\Theta(C)$ – fractional composition by seed color C – RGB or C – HSV, %

Figure 1 – Modern technological line for the processes of seed material separation of agricultural crops
Source: developed by the authors

Based on the obtained data from numerical modeling, it was determined that by using an automated cascade of flaps, it is possible to achieve the equalization of the air flow speed (± 0.2 – 0.4 m/s) in the separation chamber of the aerodynamic separator, which can include any flow generator. However, this results in a loss of nominal speed by 5–15%. The increase in speed can be achieved by increasing the air flow generator's performance (e.g., by increasing the fan blade rotation frequency), which leads to an increase in energy consumption by 5–15%. However, considering the priority of quality in the technological process of separation in the aerodynamic separator, these losses can be neglected.

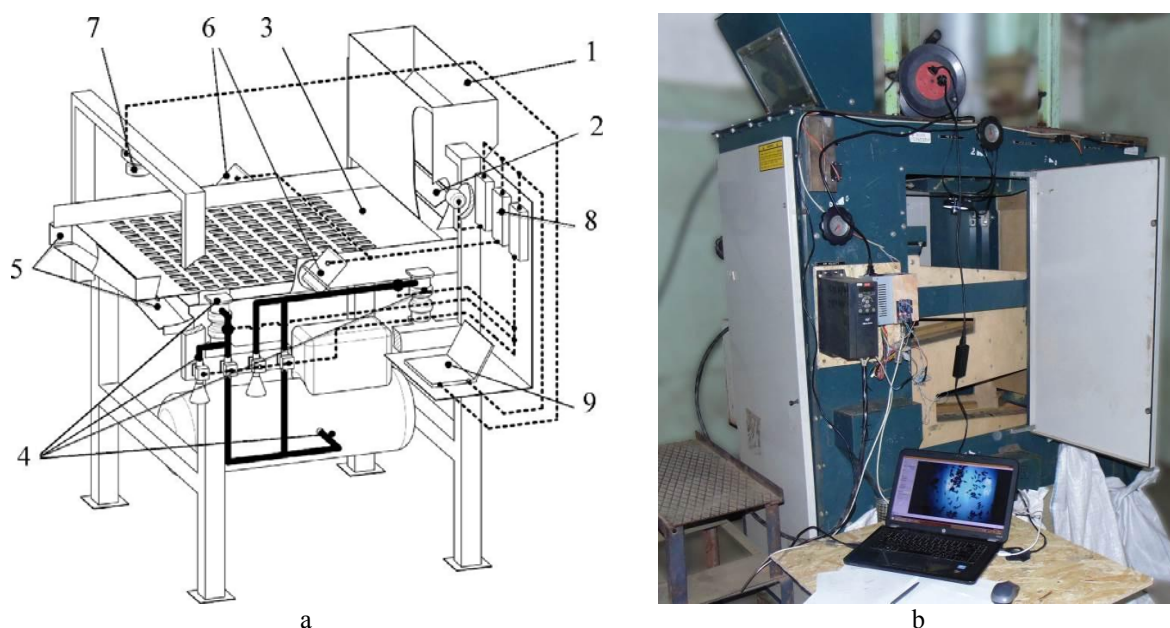


1 – hopper; 2 – flap with stepper motor; 3 – separation chamber; 4 – cascade of flaps;
5 – centrifugal fan with electric drive; 6 – airflow speed sensors; 7 – fraction collectors;
8 – camera; 9 – control units; 10 – personal computer

Figure 2 – Structural-technological diagram (a) and overall view (b) of the experimental sample of the adaptive aerodynamic separator

Source: developed by the authors

The adaptive vibratory screen separator (Fig. 3) consists of a base, a body, a screen frame, a receiving device, a hopper, a flap, a discharge window for seed flow and passage, and two electric vibrators. According to the invention, the separator is additionally equipped with two front and two rear pneumatic cushions. These pneumatic cushions are installed on the base and support the body. The separator has a stepper motor, the rotor shaft of which is connected to the flap. It also includes front high and atmospheric pressure electrovalves and a front electronic pressure sensor. These are connected to the two front pneumatic cushions via pipelines. Rear high and atmospheric pressure electrovalves and a rear electronic pressure sensor are connected to the two rear pneumatic cushions via pipelines. An air receiver and compressor are sequentially connected to the front and rear high-pressure electrovalves. Two air filters are connected to the front and rear atmospheric pressure electrovalves. A camera is installed above the end of the screen frame in the area without holes. The control unit for the stepper motor is connected to the stepper motor via electrical wires. The control unit for the motors is connected to the two electric vibrators. The control unit for the pneumatic cushions is connected to the front and rear high and atmospheric pressure electrovalves, as well as to the front and rear electronic pressure sensors. The separator is equipped with a personal computer with software. The software is based on the algorithm for performing technological processes of separation, cleaning, and sorting of grain or seed mixtures by geometric size. The computer is connected to the camera, control units for the stepper motor, motors, and pneumatic cushions via electrical wires.



1 – hopper; 2 – flap with stepper motor; 3 – screen; 4 – system for adjusting the screen inclination angle;
5 – discharge windows for seed flow and passage; 6 – electric vibrators; 7 – camera;
8 – control units; 9 – personal computer

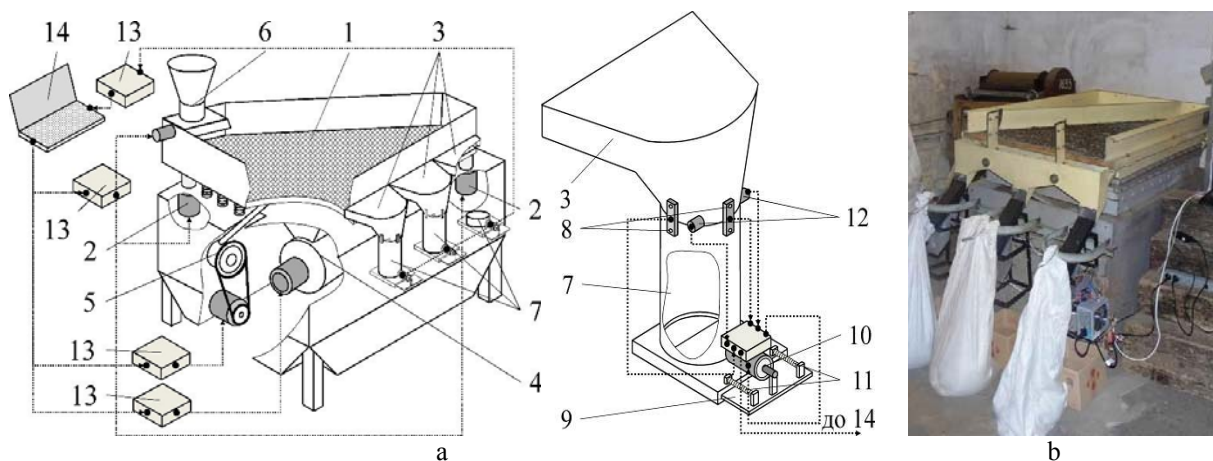
Figure 3 – Structural-technological diagram (a) and overall view (b) of the experimental sample of the adaptive vibratory screen separator

Source: developed by the authors

Based on the obtained theoretical and experimental dependencies, an adaptive vibratory screen separator was developed based on the Cimbria Unigrain calibration machine, with a performance of 189 ± 13 kg/h and separation quality (total seed concentration) of $3.4 \pm 1.3\%$.

The adaptive vibropneumatic separator (Fig. 4) with an air-permeable deck, discharge windows, flaps, fan, crank-rocker mechanism, and electric drive. According to the invention, the separator is equipped with a seed feed unit, volumetric mass measurement units for the seeds, which are connected to each discharge window via strain gauge sensors; control units for the electric motors driving the fan and crank-rocker mechanism for the vibration of the air-permeable deck. The separator is equipped with a control unit for the stepper motors driving the adjustment of the longitudinal and transverse tilt of the deck and the flap of the seed feed unit, measurement control units, a general measurement unit, and a personal computer. The invention ensures increased productivity, improved quality, and reduced labor intensity in performing the separation technological processes.

Based on the obtained theoretical and experimental dependencies, an adaptive vibropneumatic separator was developed based on the PVS-type pneumatic vibrostage, with a productivity of 131 ± 6 kg/h and separation quality (distribution coefficient) of $95.5 \pm 1.5\%$. The calibration of the volumetric mass measurement unit of the adaptive vibropneumatic separator was developed and conducted.

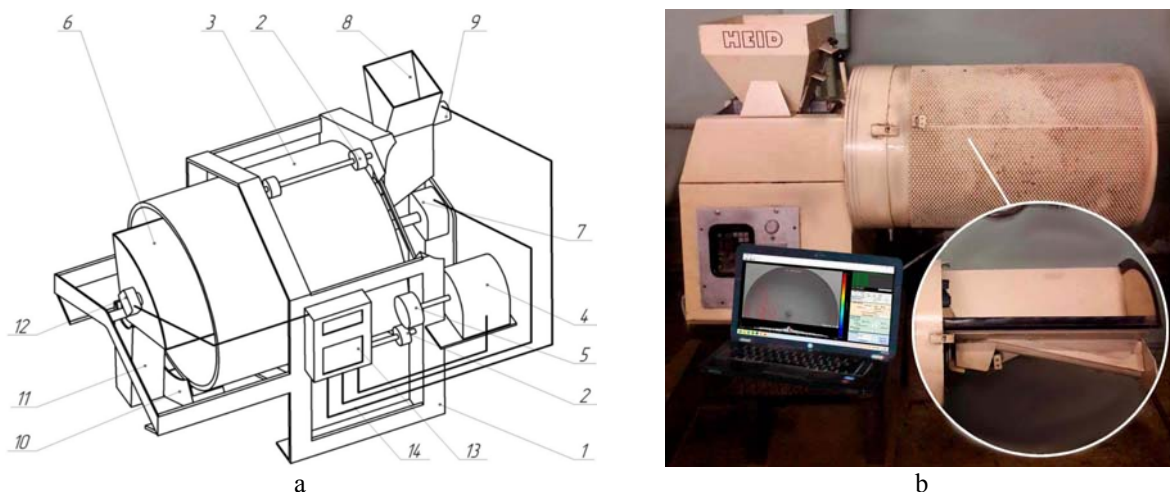


1 – deck; 2 – system for adjusting the tilt angles of the deck; 3 – discharge windows; 4 – fan with electric drive; 5 – crank-rocker mechanism with electric drive; 6 – seed feed unit; 7 – volumetric mass measurement unit; 8 – strain gauge sensors; 9 – flap; 10 – pushing electromagnet (solenoid); 11 – tension springs; 12 – infrared diode and photodetector; 13 – control units; 14 – personal computer

Figure 4 – Structural-technological diagram (a) and overall view (b) of the experimental sample of the adaptive vibropneumatic separator

Source: developed by the authors

The adaptive seed selection trier (Fig. 5) includes a frame, support rollers, a cylindrical drum with cells, a motor-reducer, a drive roller, a tray, a hopper-feeder, a collector for larger seeds, and a collector for smaller seeds. The invention is characterized by the fact that the trier is additionally equipped with a stepper motor, the shaft of which is fixed to the tray. A flap with a stepper motor is installed in the hopper-feeder. A camera, whose lens is directed toward the center of the drum with cells, is mounted on the front part of the tray. The control unit is connected via electrical wires to the motor-reducer, stepper motor, flap stepper motor, and camera.



1 – frame; 2 – support rollers; 3 – drum with cells; 4 – motor-reducer; 5 – drive roller; 6 – tray; 7 – stepper motor; 8 – hopper-doser; 9 – flap with stepper motor; 10 – larger seed collector; 11 – smaller seed collector; 12 – photocamera; 13 – control unit; 14 – electric wires

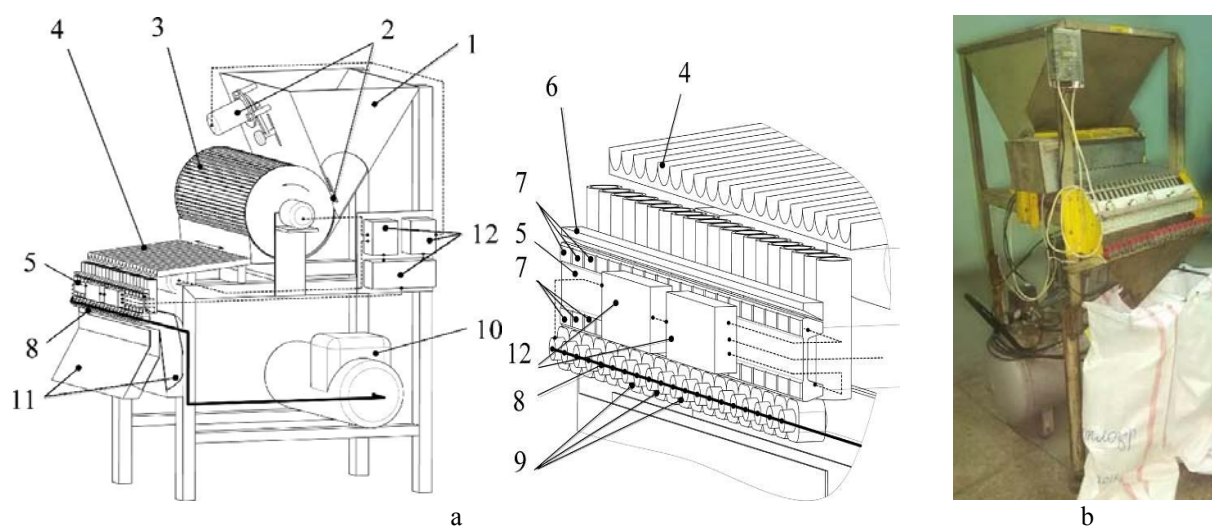
Figure 5 – Structural-technological diagram (a) and general view (b) of the experimental sample of the mechatronic system for the selection-seed treater

Source: developed by the authors

For testing the developed design of the seed selection trier, the K3538 trier (Cimbria Heid GmbH) was improved. The application of the developed mechatronic control system for the K3538 seed selection trier allows performing the technological process of separating mustard seed mixture by the length of its components with a productivity of 123.5 ± 6.3 kg/h, impurity content in the tray seed mixture of $0.82 \pm 0.17\%$, content of main crop seed in the cylindrical seed mixture of $16.85 \pm 2.69\%$, and power of 0.93 ± 0.23 kW.

The photoelectric separator (Fig. 6) includes a frame, a material feeding unit with a hopper and a flap, a seed registration unit with nozzles, an illuminator, registering photoreceptors, and an information processing unit, a seed output unit with gas nozzles, a relay block, an air receiver, and a compressor, and collectors for liquid and non-liquid seeds. The material feeding unit is additionally equipped with a stepper motor, the shaft of which is connected to the flap via a crankshaft mechanism, and a control unit for the stepper motor.

Based on the obtained dependencies, the photoelectric separator has been improved, with a productivity of 38 ± 3 kg/h and a separation quality (total seed concentration) of $1.2 \pm 0.1\%$.



- 1 – hopper; 2 – flap with stepper motor; 3 – drum with radial blades and electric drive;
 4 – vibrating tray with vibrator motor; 5 – seed registration block; 6 – illuminator;
 7 – recording and control photoreceptors; 8 – seed output block; 9 – gas nozzles; 10 – compressor
 with air receiver; 11 – collectors for liquid and non-liquid seeds; 12 – control units

Figure 6 – Structural-technological diagram (a) and general view (b) of the experimental sample of the improved photoelectric separator

Source: developed by the authors

A belt device for automatic seed phenotyping (Fig. 7) has been developed, which is additionally equipped with a seed feeding unit installed before the belt conveyor. The unit consists of a bowl with a helical track, which is secured to a vibrating surface using a screw, with a vibrator motor fixed underneath. Three spring plates are mounted on the frame, angled at 45° relative to the horizontal plane in the direction of lifting the helical track. The vibrator motor is connected to a width-pulse modulator via electrical wires, and the modulator is connected to the control unit. After the belt conveyor, a mass measurement unit is installed, consisting of a strain gauge connected to the control unit via electrical wires. One end of the strain gauge is fixed to the frame, while the other is attached to a plate on which a bushing is mounted. The device is also equipped with a battery located in the power supply unit. It maintains the accuracy of individual seed geometric measurements, determines their shape

and color, and ensures low labor intensity and high technological efficiency in implementing the seed phenotyping procedure as breeding material based on its morphological and marker traits. Experimental verification results showed that the productivity of the matrix device is 1 kg/hour, while the belt conveyor device achieves 5 kg/hour.

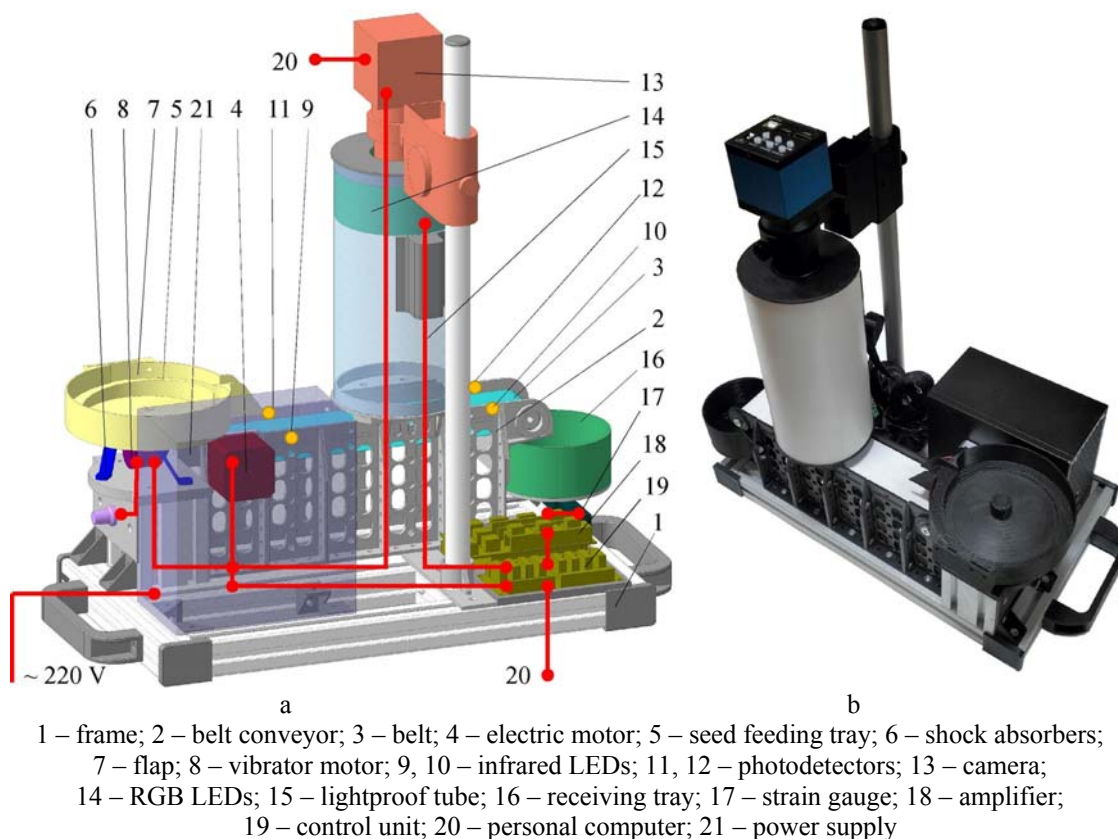


Figure 7 – Structural and technological diagram (a) and overall view (b) of the device for automatic seed phenotyping

Source: developed by the authors

Conclusions. The study focuses on enhancing the efficiency of technical and technological support for the precision separation of sunflower seed material. It establishes the mechanical and technological principles for creating automated control systems to optimize the structural and operational parameters of equipment used in the seed separation process.

A precision technological scheme for the separation process line has been developed to meet the requirements for cleaning and separating seed mixtures, ensuring a high varietal purity of sunflower seed material (98.0–99.9%). This scheme incorporates automation of technical equipment.

To further enhance the efficiency of sunflower breeding and seed production, an automatic seed phenotyping device has been integrated into the technological line. This device accelerates the breeding process, optimizes the design of crossing programs through bioinformatics-based data analysis, and improves seed sorting efficiency.

List of references

1. ДСТУ 2240-93. Насіння сільськогосподарських культур. Сортові та посівні якості. Технічні умови. Київ: Держстандарт України. 1993. 74 с.

2. Кириченко В.В. Основи управління продукційним процесом польових культур. Харків. 2016. 711 с.
3. Шевченко І.А., Лях В.О., Поляков О.І., Сорока А.І., Ведмедева К.В., Журавель В.М., Махно Ю.О., Товстановська Т.Г., Буділка Г.І. Льон олійний, гірчиця. Стратегія виробництва олійної сировини в Україні (малопоширені культури). Інститут олійних культур Національної академії аграрних наук України. Запоріжжя: СТАТУС. 2017. 44 с.
4. Шевченко І.А., Поляков О.І., Ведмедева К.В., Комарова І.Б. Рижій, сафлор, кунжут. Стратегія виробництва олійної сировини в Україні (малопоширені культури). Інститут олійних культур Національної академії аграрних наук України. Запоріжжя: СТАТУС. 2017. 40 с.
5. Brandenburg N. The principles and practice of seed cleaning: separation with equipment that senses dimension, shape, density, and terminal velocity of seeds. *Seed science and technology*. 1977. 5. P. 173–186.
6. Jayas D., Cenkowski S. Grain property values and their measurement. *Handbook of Industrial Drying*. 2006. P. 575–603. DOI: 10.1201/9781420017618.ch24
7. Riahi E., Ramaswamy H. Structure and composition of cereal grains and legumes. *Handbook of Postharvest Technology*. 2003. P. 17–40. DOI: 10.1201/9780203911310.pt1
8. Sablani S.S., Ramaswamy H.S. Physical and thermal properties of cereal grains. *Handbook of Postharvest Technology*. 2003. P. 17–40. DOI: 10.1201/9780203911310.ch2
9. Öztürk T., Esen B. Physical and mechanical properties of barley. *Agricultura tropica et subtropica*. 2008. 41. P. 117–121.
10. Tavakoli M., Tavakoli H., Rajabipour A., Ahmadi H., Gharib-Zahedi S.M.T. Moisture-dependent physical properties of barley grains. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2009. P. 84–91. DOI: 10.3965/j.issn.1934-6344.2009.04.084-091
11. Sologubik C., Campañone L., Pagano A., Gely M. Effect of moisture content on some physical properties of barley. *Industrial Crops and Products*. 2013. P. 762–767. DOI: 10.1016/j.indcrop.2012.08.019.
12. Karaj S., Müller J. Determination of physical, mechanical and chemical properties of seeds and kernels of *Jatropha Curcas* L. *Industrial Crops and Products*. 2010. P. 129–138. DOI: 10.1016/j.indcrop.2010.04.001
13. Чурсінов Ю.О., Луценко М.В., Кудрявцев І.М. Техніко-економічне обґрунтування доцільності сортування відходів зернових та олійних культур. *Наука технології інновації*. 2022. 2(22). С. 61–67. DOI: 10.35668/2520-6524-2022-2-08
14. Алієв Е.Б., Бабин І.А., Сокол С.П. Чисельне моделювання процесу аеродинамічної сепарації дрібнозернистого сипкого матеріалу. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2023. 1(120). С. 5–13. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-1-1
15. Степаненко С.П., Котов Б.І., Мельник В.А., Волик Д.А. Моделювання процесу переміщення зернового матеріалу в робочій зоні сепаратора. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2024. 14 (1). С. 1–15. DOI: 10.32782/2220-8674-2024-24-1-3
16. Мельник В.А., Попадюк І.С., Волик Д.А., Степаненко С.П. Дослідження розвитку технологій та технічних засобів для пневмовідцентрового розділення зернових матеріалів. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного*. 2024. 24(1). С. 75-88. DOI: 10.32782/2078-0877-2024-24-1-5
17. Naumenko M., Sokol S., Filipenko D., Guridova V., Kharytonov M. Numeric model of the grain mixture flow in a cylindrical sieve which revolves around the inclined axis. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2018. 56(3). P. 67–74.
18. Kharchenko S., Samborski S., Pašnik J., Kharchenko F. The natural oscillations of perforated sifting surfaces with epicycloidal holes. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2025. 19(1). 256–268. DOI: 10.12913/22998624/195463
19. Kharchenko S., Samborski S., Kharchenko F., Korzec-Strzałka I., Andrii S. Dynamics of Loose Materials and Oscillations of Cylindrical Perforated Sifting Surfaces with Volumetric Riffles. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2024. 18(8), P. 238–255. DOI: 10.12913/22998624/194114
20. Aliiev E., Gavrilenko A., Tesliuk H., Tolstenko A., Koshul'ko V. Improvement of the sunflower seed separation process efficiency on the vibrating surface. *Acta Periodica Technologica, APTEFF*. 2019. 50. P. 12–22. DOI: 10.2298/APT1950012A
21. Bredykhin V., Gurskyi P., Alforyov O., Bredykhina K., Pak A. Improving the Mechanical-Mathematical Model of Grain Mass Separation in a Fluidized Bed. *European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. 3(1 (111)).P. 79–86. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.232017

22. Nykyforov A., Antoshchenkov R., Halych I., Kis V., Polyansky P., Koshulko V., Kilimnik I. Construction of a regression model for assessing the efficiency of separation of light-weight seeds on vibratory machines involving measures to reduce the harmful influence of the aerodynamic factor. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. 2(1 (116)).P. 24–34. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.253657
23. Shevchenko I.A., Aliev E.B. Research on the photoelectronic separator seed supply block for oil crops. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2018. 54 (1). P. 129–138.

References

1. DSTU 2240-93. (1993). *Nasinnyia sil's'kohospodars'kykh kul'tur. Sortovi ta posivni yakosti. Tekhnichni umovy [Seeds of agricultural crops. Varietal and sowing qualities. Technical conditions]*. Kyiv: Derzhstandart of Ukraine. 74 p. [in Ukrainian].
2. Kyrychenko, V.V. (2016). *Osnovy upravlinnya produktsiynym protsesom pol'ovykh kul'tur [Fundamentals of field crop production process management]*. Kharkiv. 711 p. [in Ukrainian].
3. Shevchenko, I.A., Lyakh, V.O., Polyakov, O.I., Soroka, A.I., Vedmedeva K.V., Zhuravel, V.M., Makhno Yu.O., Tovstanovskaya T.G., Budilka G.I. (2017). *L'on oliynyy, hirschytsya. Stratehiya vyrobnytstva oliynoyi syrovyny v Ukrayini (maloposhyreni kul'tury) [Flaxseed, mustard. Strategy for the production of oilseeds in Ukraine (uncommon crops)]*. Institute of Oilseeds of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine. Zaporizhzhia: STATUS. 44 p. [in Ukrainian].
4. Shevchenko, I.A., Polyakov, O.I., Vedmedeva K.V., Komarova I.B. (2017). Red, safflower, sesame. *Ryzhiy, saflor, kunzhut. Stratehiya vyrobnytstva oliynoyi syrovyny v Ukrayini (maloposhyreni kul'tury) [Strategy for the production of oilseeds in Ukraine (uncommon crops)]*. Institute of Oilseeds of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine. Zaporizhzhia: STATUS. 40 p. [in Ukrainian].
5. Brandenburg, N. (1977). *The principles and practice of seed cleaning: separation with equipment that senses dimension, shape, density, and terminal velocity of seeds*. *Seed science and technology*, 5. 173–186.
6. Jayas, D., Cenkowski, S. (2006). *Grain property values and their measurement*. Handbook of Industrial Drying. 575–603. DOI: 10.1201/9781420017618.ch24
7. Riahi, E., Ramaswamy, H. (2003). *Structure and composition of cereal grains and legumes*. Handbook of Postharvest Technology. 17–40. DOI: 10.1201/9780203911310.pt1
8. Sablani, S.S., Ramaswamy, H.S. (2003). *Physical and thermal properties of cereal grains*. Handbook of Postharvest Technology. 17–40. DOI: 10.1201/9780203911310.ch2.
9. Öztürk, T., Esen, B. (2008). *Physical and mechanical properties of barley*. *Agricultura tropica et subtropica*, 41. 117–121.
10. Tavakoli, M., Tavakoli, H., Rajabipour, A., Ahmadi, H., Gharib-Zahedi, S.M.T. (2009). *Moisture-dependent physical properties of barley grains*. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 84–91. DOI: 10.3965/j.issn.1934-6344.2009.04.084-091
11. Sologubik, C., Campañone, L., Pagano, A., Gely, M. (2013). *Effect of moisture content on some physical properties of barley*. *Industrial Crops and Products*. 762–767. DOI: 10.1016/j.indcrop.2012.08.019
12. Karaj, S., Müller, J. (2010). *Determination of physical, mechanical and chemical properties of seeds and kernels of *Jatropha Curcas L.** *Industrial Crops and Products*. 129–138. DOI: 10.1016/j.indcrop.2010.04.001
13. Chursinov, Yu.O., Lutsenko, M.V., Kudryavtsev, I.M. (2022). *Tekhniko-ekonomichne obgruntuvannya dotsil'nosti sortuvannya vidkhodiv zernovykh ta oliynykh kul'tur [Feasibility study of the feasibility of sorting grain and oilseed waste]*. *Science of Technology Innovation*, 2(22). 61–67. DOI: 10.35668/2520-6524-2022-2-08 [in Ukrainian].
14. Aliiev, E.B., Babin, I.A., Sokol, S.P. (2023). *Chysel'ne modelyuvannya protsesu aerodynamichnoyi separatsiyi dribnozernystoho sypkoho materialu [Numerical modeling of the process of aerodynamic separation of fine-grained bulk material]*. *Engineering, Energy, Transport of the Agricultural Complex*. 1(120). 5–13. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-1-1 [in Ukrainian].
15. Stepanenko, S.P., Kotov, B.I., Melnyk, V.A., Volyk, D.A. (2024). *Modelyuvannya protsesu peremishchennya zernovoho materialu v robochiiy zoni separatora [Modeling the process of grain material movement in the working zone of the separator]*. *Scientific Bulletin of the TSATU*, 14 (1): 1–15. DOI: 10.32782/2220-8674-2024-24-1-3 [in Ukrainian].
16. Melnyk, V.A., Popadiuk, I.S., Volyk, D.A., Stepanenko, S.P. (2024). *Doslidzhennya rozvytku tekhnolohiy ta tekhnichnykh zasobiv dlya pnevmovidstetrovoho rozdilennya zernovykh materialiv [Research on the development of technologies and technical means for pneumatic centrifugal*

- separation of grain materials*]. Proceedings of the Tavria State Agrotechnological University named after Dmitry Motorny, 24(1): 75-88. DOI: 10.32782/2078-0877-2024-24-1-5 [in Ukrainian].
17. Naumenko, M., Sokol, S., Filipenko, D., Guridova, V., Kharytonov, M. (2018). *Numeric model of the grain mixture flow in a cylindrical sieve which revolves around the inclined axis*. INMATEH – Agricultural Engineering, 56(3). 67–74. [in English].
 18. Kharchenko, S., Samborski, S., Paśnik, J., Kharchenko, F. (2025). *The natural oscillations of perforated sifting surfaces with epicycloidal holes*. Advances in Science and Technology Research Journal, 19(1): 256–268. DOI: 10.12913/22998624/195463 [in English].
 19. Kharchenko, S., Samborski, S., Kharchenko, F., Korzec-Strzałka, I., Andrii, S. (2024). *Dynamics of Loose Materials and Oscillations of Cylindrical Perforated Sifting Surfaces with Volumetric Riffles*. Advances in Science and Technology Research Journal, 18(8): 238–255. DOI: 10.12913/22998624/194114 [in English].
 20. Aliiev, E., Gavrilchenko, A., Tesliuk, H., Tolstenko, A., Koshul'ko, V. (2019). *Improvement of the sunflower seed separation process efficiency on the vibrating surface*. Acta Periodica Technologica, APTEFF, 50. 12–22. DOI: 10.2298/APT1950012A [in English].
 21. Bredykhin, V., Gurskyi, P., Alforyov, O., Bredykhina, K., Pak, A. (2021). *Improving the Mechanical-Mathematical Model of Grain Mass Separation in a Fluidized Bed*. European Journal of Enterprise Technologies, 3(1 (111)): 79–86. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.232017 [in English].
 22. Nykyforov, A., Antoshchenkov, R., Halych, I., Kis, V., Polyansky, P., Koshulko, V., Kilimnik, I. (2022). *Construction of a regression model for assessing the efficiency of separation of light-weight seeds on vibratory machines involving measures to reduce the harmful influence of the aerodynamic factor*. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2(1 (116)). 24–34. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.253657 [in English].
 23. Shevchenko I.A., Aliev E.B. (2018). *Research on the photoelectronic separator seed supply block for oil crops*. INMATEH – Agricultural Engineering, 54 (1): 129–138. [in English].

Е.Б. Алієв, проф., д-р техн. наук, ст. дослідник

Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна

О.Ю. Алієва, ст. наук співр., PhD

Інститут олійних культур Національної академії аграрних наук України, м. Запоріжжя, Україна

В.Б. Говоруха, проф., д-р ф.-м. наук, **О.М. Кобець**, доц., канд, техн. наук

Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна

Розроблення мехатронних систем цільового поділу та відбору насінневого матеріалу

Одним із ключових етапів обробки насінневого матеріалу є сортування, адже насіннева суміш містить домішки різного походження: стебла, листя, мінеральні включення, насіння бур'янів та пошкоджене насіння основної культури. Сортування насіння, як підзадача сепарації, базується на фізичних відмінностях між компонентами суміші. До основних фізичних характеристик насіння належать розмір, форма, вага, колір, щільність тощо. Ці властивості визначають параметри сучасного насіннеосчисного обладнання, впливаючи на його конструкцію та ефективність.

Розглянуто сучасні методи сепарації за фізико-механічними властивостями, зокрема за аеродинамічними характеристиками (пневматичні колонки), розміром (решета різної форми), щільністю (пневмовібросепаратори), пружністю, електрофізичними властивостями (діелектричні сепаратори), кольором (фотосепаратори). Представлено технологічні лінії сепарації дрібнонасіневих культур, що враховують ці параметри. Описано конструкції адаптивного аеродинамічного, віброрешітного, вібропневматичного сепараторів, селекційно-насінного трієра та фотоелектронного сепаратора. Вони оснащені датчиками, електродвигунами, блоками керування та програмним забезпеченням, що дозволяє підвищити продуктивність і якість сепарації.

Впровадження адаптивних мехатронних систем у процеси первинного насінництва дозволяє покращити якість насіння, зменшити енерговитрати та забезпечити гнучкість технологічних ліній. Результати досліджень підтверджують ефективність запропонованих конструкцій, сприяючи розвитку сучасних методів сепарації насінневого матеріалу.

насіння, сепарація, очищення, розділення, автоматизація, ефективність, якість

Одержано (Received) 11.11.2024

Прорецензовано (Reviewed) 13.12.2024

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2024

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 681.5.004.8

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.142-151](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.142-151)**С.Г. Ковальов**, докторант, канд. пед. наук, **В.В. Аулін**, проф., д-р техн. наук,**А.В. Гриньків**, ст. дослід., канд. техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**e-mail: aulinvv@gmail.com, kovalyovserggr@ukr.net***В.В. Варваров**, канд. техн. наук*Харківський нац. ун-т повітряних сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, Україна**e-mail: varvarov_@ukr.net*

Підвищення надійності та ефективності експлуатації виробничих ліній методами штучного інтелекту, використовуючи моніторинг акустичних сигналів

У статті розглянуто підвищення надійності та ефективності виробничих процесів шляхом зменшення витрат на обслуговування та мінімізації простоїв. Пропонується метод оптимізації технічного обслуговування за допомогою алгоритмів штучного інтелекту. Досліджується кореляція між акустичними спектрами вузлів обладнання та їх надійністю та ефективністю. Запропоновано використовувати конволюційні мережі для розпізнавання патернів роботи обладнання через двовимірне відображення акустичних спектрів. Дослідження підтверджує зв'язок між параметрами надійності функціонування та ефективності використання обладнання та їхніми акустичними спектрами.

надійність функціонування, ефективність експлуатації, автоматизовані виробничі лінії, акустичний спектр, машинне навчання, конволюційні мережі

Постановка проблеми. Акустичні методи є потужним інструментом для моніторингу стану виробничих ліній, оскільки багато вузлів обладнання створюють не випадкові звуки, а саме характеристичні акустичні спектри. Ці спектри відображають конкретні механічні процеси та стан вузлів. Завдяки використанню акустичних методів можна виявляти відхилення від норми та прогнозувати можливі збої, що дозволяє своєчасно здійснювати технічне обслуговування та ремонт, забезпечуючи безперебійну роботу виробничого обладнання та підвищуючи ефективність його використання.

Розвиток штучного інтелекту (ШІ) відкрив нові горизонти в аналізі параметрів, що корелюються з надійністю та ефективністю виробничого обладнання. Завдяки передовим алгоритмам і методам машинного навчання, ШІ здатен виявляти та аналізувати складні взаємозв'язки між різними експлуатаційними параметрами обладнання. Це дозволяє не лише вимірювати ці параметри з високою точністю, але й використовувати отримані дані для вдосконалення та оптимізації роботи виробничих ліній. Застосування ШІ у виробничих процесах сприяє своєчасному виявленню можливих проблем та їхньому усуненню, що підвищує загальну надійність функціонування та ефективність використання обладнання.

Звук є важливим явищем, яке може бути виміряне та проаналізоване за допомогою ШІ у контексті роботи виробничої лінії. Методи спектрального акустичного аналізу дозволяють отримувати інформацію про стан обладнання виробничих ліній на основі характеристичних звукових спектрів, що створюються в тому числі і обертовими вузлами та підшипниками.

Аналізуючи ці спектри, ШІ може ідентифікувати відхилення, які вказують на потенційні проблеми з надійністю або ефективністю роботи обладнання. Це надає можливість здійснювати превентивне технічне обслуговування та оптимізувати роботу виробничих ліній на основі реальних даних, що значно знижує ризик простоїв і збільшує продуктивність.

Дослідження, пов'язані з використанням ШІ для виявлення параметрів, що корелюються з надійністю та ефективністю виробничого обладнання, невпинно зростають. Сучасні алгоритми ШІ та методи машинного навчання відкривають нові можливості для аналізу та оптимізації роботи виробничих ліній. Виявлення і моніторинг акустичних сигналів, дозволяють з високою точністю визначати стан обладнання та прогнозувати потенційні відмови. Це забезпечує можливість своєчасного технічного обслуговування, зменшуючи ризик простоїв та знижуючи витрати на експлуатацію. Таким чином, впровадження ШІ у виробничі процеси сприяє підвищенню їх надійності та ефективності, що робить ці дослідження надзвичайно важливими та перспективними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розвиток ШІ та конволюційних нейронних мереж (КНМ) відкрили нові можливості у сфері обробки та аналізу даних. КНМ здатні ефективно розпізнавати зображення або двовимірні матриці даних, що можуть бути отримані з акустичних сигналів. Ці методи дозволяють аналізувати спектральні характеристики звукових сигналів, які відображають стан виробничого обладнання.

Сучасні методи акустичного спектрального аналізу значно розширили свої можливості завдяки розвитку інформаційних технологій і математичних методів. Одним із найбільш поширених методів є аналіз за допомогою рядів Фур'є, який дозволяє розкласти складні звукові сигнали на окремі гармонічні компоненти та виявляти їх спектральні характеристики [1, 4, 5,8]. Метод Фур'є базується на перетворенні Фур'є:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(i\omega t) dt,$$

де $F(\omega)$ – спектральна густина потужності;

$f(t)$ – вихідний сигнал у часовій області;

ω – кутова частота.

Завдяки цим методам можна отримувати детальну інформацію про стан обертових вузлів і підшипників у виробничому обладнанні. Крім рядів Фур'є, активно використовуються такі методи, як вейвлет-перетворення, які дозволяють аналізувати сигнали як у частотній, так і в часовій областях [9, 10]. Вейвлет-перетворення можна записати у вигляді:

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{a,b}(t) dt,$$

де $W(a, b)$ – коефіцієнти вейвлет-перетворення;

$\psi_{a,b}(t)$ – вейвлет-функція;

a і b – параметри масштабування і зсуву.

Особливо корисними зазначені методи є для виявлення короточасних аномалій. Сучасні алгоритми спектрального аналізу у поєднанні з можливостями штучного інтелекту забезпечують високу точність та ефективність моніторингу стану обладнання, сприяючи підвищенню надійності та ефективності виробничих процесів [2, 3, 6, 7].

Використання ШІ для аналізу та оптимізації виробничих процесів вимагає апаратних засобів та програмного забезпечення. Це включає обчислювальні процесори, які здатні швидко обробляти великі обсяги даних, а також спеціалізоване програмне забезпечення для виконання алгоритмів ШІ. Зокрема ШІ може бути реалізований на компактних і доступних платформах, таких як Raspberry Pi [11, 12]. Цей мікрокомп'ютер дозволяє розробникам виконувати обчислення та обробку даних прямо на пристрої, використовуючи спеціалізовані бібліотеки Python для ШІ та машинного навчання. Використання Raspberry Pi відкриває нові можливості для створення інтелектуальних систем моніторингу та оптимізації у виробничих процесах, завдяки своїй гнучкості та низькій вартості.

Серед спеціалізованих бібліотек Python, що орієнтовані на роботу з ШІ, конволюційними нейронними мережами та обробкою акустичних сигналів, слід відзначити такі бібліотеки, як TensorFlow, PyTorch та Keras для створення та тренування нейронних мереж, а також librosa та scipy для обробки аудіосигналів [13 - 15]. Ці бібліотеки забезпечують широкий спектр інструментів та функцій, які допомагають розробникам швидко та ефективно реалізовувати складні алгоритми ШІ.

Для обробки акустичних сигналів, зокрема спектрального аналізу, використовуються бібліотеки, такі як librosa та scipy. Вони дозволяють виконувати різноманітні операції з аудіосигналами, включаючи перетворення Фур'є, вейвлет-перетворення та інші види спектрального аналізу. Це надає можливість отримувати важливу інформацію про стан обладнання на основі його акустичних характеристик, що дозволяє виявляти відхилення та аномалії у роботі виробничих вузлів і елементів.

Завдяки поєднанню апаратних засобів та спеціалізованого програмного забезпечення, сучасні методи ШІ забезпечують високий рівень точності та ефективності у моніторингу та оптимізації виробничих процесів. Використання бібліотек Python та алгоритмів ШІ дозволяє автоматизувати багато задач, пов'язаних з обробкою та аналізом даних, що робить виробничі лінії більш надійними та продуктивними. Це, у свою чергу, сприяє зменшенню витрат та підвищенню якості продукції.

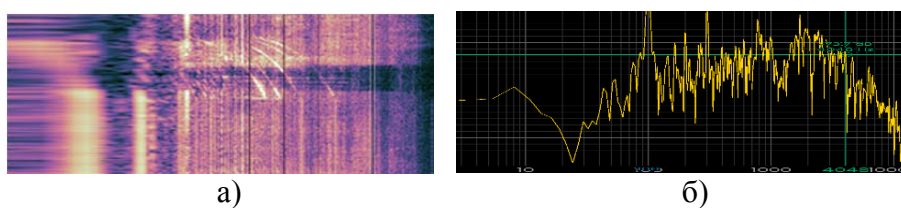
Постановка завдання. Мета дослідження полягає у розробці методу для обробки та аналізу акустичних сигналів, генерованих виробничим обладнанням, із застосуванням апаратних та програмних засобів, що реалізують ШІ та КНМ, для підвищення надійності експлуатації та ефективності функціонування виробничих ліній. Основна концепція даного методу передбачає попередню обробку акустичних сигналів за допомогою спеціалізованих бібліотек Python, результатом чого є формування двовимірних матриць або зображень. Це дозволяє ефективно використовувати методи КНМ для аналізу спектральних характеристик і змін акустичних сигналів у часі, здійснення діагностики, контролю та оптимізації роботи виробничого обладнання, а також виявлення аномалій, що підвищує надійність та ефективність його функціонування.

Для реалізації мети розв'язувалися наступні завдання:

1. Запропонувати підхід використання двовимірних уявлень акустичних спектрів у часі як вхідних даних для КНМ з метою виявлення параметрів роботи виробничого обладнання, що корелюються з надійністю функціонування та ефективністю використання обладнання.

2. Провести дослідження щодо впровадження методів акустичного спектрального аналізу в поєднанні з КНМ у виробничі процеси для покращення ефективності використання та надійності функціонування обладнання у виробничій системі, що сприятиме оптимізації функціонування сучасного виробництва.

Викладення основного матеріалу. Зміну акустичного спектру роботи електродвигуна в часі, показано у вигляді двовимірного зображення на рис. 1.



а - двовимірне; б - миттєве

Рисунок 1 – Представлення в часі акустичних спектрів роботи обладнання

Джерело: розроблено авторами

Як видно з рисунку 1, разом з фоновими акустичними сигналами на зображенні містяться характеристичні спектральні лінії, які з часом (у верхній частині зображення) мають нахил вліво, що відповідає зменшенню обертів двигуна. Оскільки ці лінії є характеристичними, то вони повинні корелюватись з порушенням роботи електроприводу, а відповідно і з надійністю функціонування такого вузла.

Створення моделі КНМ, яка здатна визначати аномальну роботу вузлів виробничої лінії за акустичними спектрами їхньої роботи, встановлює кореляцію між надійністю функціонування та ефективністю експлуатації виробничої лінії та їхніми акустичними спектрами. Це дозволяє на ранньому етапі виявляти аномалії та виправляти їх до того, як вони призведуть до серйозних збоїв або зупинок виробництва. Крім того, така модель може бути використана для оптимізації процесів виробництва, забезпечуючи високу якість продукції та знижуючи витрати на обслуговування та ремонт.

Для виконання поставлених завдань було проведено комп'ютерне моделювання роботи виробничої лінії, спрямоване на встановлення кореляції між надійністю її функціонування та акустичними спектрами роботи вузлів. Моделювання передбачало дослідження виробничої лінії, в якій за нормальної роботи вузлів можливо лише лінійне змінювання спектральних акустичних ліній в часі. Якщо виробнича лінія, що відповідає моделі, формувала не лінійні зміни спектральних ліній акустичного сигналу, то це вважалося ознакою аномальної роботи вузлів, що формують цей акустичний сигнал. Для такої моделі була побудована нейронна мережа, здатна виділяти як лінійні, так і нелінійні зміни в акустичних спектрах, що вказувало на кореляцію між акустичними спектрами та надійністю функціонування виробничої лінії.

У процесі моделювання була створена КНМ з параметрами, які наведено на рис. 2:

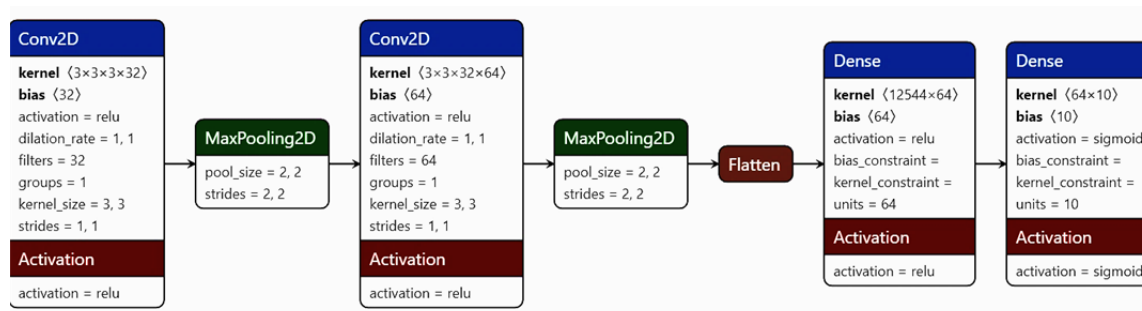


Рисунок 2 – Опис структури запропонованої конфолуційної нейронної мережі для виявлення аномалій у акустичних спектрах модельованої виробничої лінії

Джерело: розроблено авторами

Навчання запропонованої КНМ було реалізовано на датасеті графічних спектрів, який містив спектри нормальної та аномальної роботи вузлів виробничої лінії у пропорції 40% аномальних спектрів та 60% нормальною роботою.

Така структура КНМ була обрана через кілька ключових причин:

- КНМ використовує фільтри для виявлення локальних призначень на зображенні, що дозволяє ефективно виокремлювати важливі характеристики, такі як контурні лінії та текстури.

- Шляхом використання максимального підсумування (max pooling) та згорткових фільтрів (convolutional filters), КНМ зменшує розмір входу, що допомагає зменшити кількість обчислень та пам'яті, не втрачаючи важливу інформацію.

- КНМ має багат шарову структуру, що дозволяє вивчати більш складні та абстрактні характеристики зображень з кожним наступним шаром.

- КНМ може бути навчена на одному наборі даних та успішно застосована на іншому, що робить її дуже універсальною.

Ця структура базується на багат шарових нейронних мережах, які були успішно застосовані в різних задачах обробки зображень, таких як розпізнавання образів, класифікація зображень та інші.

Вигляд тренувального датасету наведено на рис. 3:

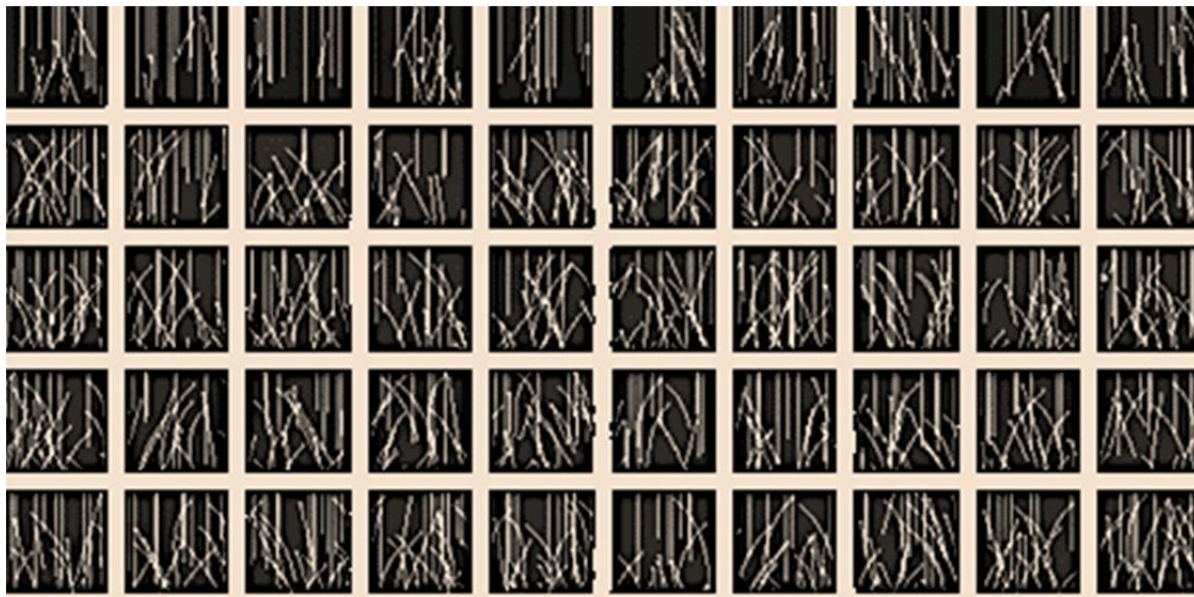


Рисунок 3 – Вигляд dataset для навчання конволюційних нейронних мереж виявляти аномальну роботу електродвигуна

Джерело: розроблено авторами

Програмний код для створення і навчання КНМ вказаному датасеті з використанням бібліотеки Tensorflow та Keras показано на рис.4:

```
import tensorflow as tf
from tensorflow.keras.preprocessing.image import ImageDataGenerator
from tensorflow.keras.models import Sequential
from tensorflow.keras.layers import Conv2D, MaxPooling2D, Flatten, Dense
import matplotlib.pyplot as plt
import os
import numpy as np
from sklearn.model_selection import train_test_split

# Параметри
image_size = (300, 300)
batch_size = 10
epochs = 20

# Функція для завантаження зображень і міток
def load_dataset(data_dir):
    images = []
    labels = []
    for file_name in os.listdir(data_dir):
        if file_name.endswith('.png'):
            img = tf.keras.preprocessing.image.load_img(os.path.join(data_dir, file_name), target_size=image_size)
            img_array = tf.keras.preprocessing.image.img_to_array(img)
            images.append(img_array)
            if "image_" in file_name and int(file_name.split('_')[1].split('.')[0]) >= 32:
                labels.append(1) # Зігнуті лінії
            else:
                labels.append(0) # Прямі лінії
    return np.array(images), np.array(labels)

# Завантаження даних
data_dir = 'dataset'
images, labels = load_dataset(data_dir)

# Розділення на тренувальний, валідаційний і тестовий набори
X_train, X_temp, y_train, y_temp = train_test_split(images, labels, test_size=0.30, random_state=42)
X_val, X_test, y_val, y_test = train_test_split(X_temp, y_temp, test_size=0.33, random_state=42)

# Нормалізація даних
X_train = X_train / 255.0
X_val = X_val / 255.0
X_test = X_test / 255.0

# Побудова моделі
model = Sequential([
    Conv2D(32, (3, 3), activation='relu', input_shape=(image_size[0], image_size[1], 3)),
    MaxPooling2D((2, 2)),
    Conv2D(64, (3, 3), activation='relu'),
    MaxPooling2D((2, 2)),
    Conv2D(128, (3, 3), activation='relu'),
    MaxPooling2D((2, 2)),
    Flatten(),
    Dense(128, activation='relu'),
    Dense(1, activation='sigmoid')
])

# Компіляція моделі
model.compile(optimizer='adam', loss='binary_crossentropy', metrics=['accuracy'])

# Навчання моделі
history = model.fit(X_train, y_train, epochs=epochs, batch_size=batch_size, validation_data=(X_val, y_val))

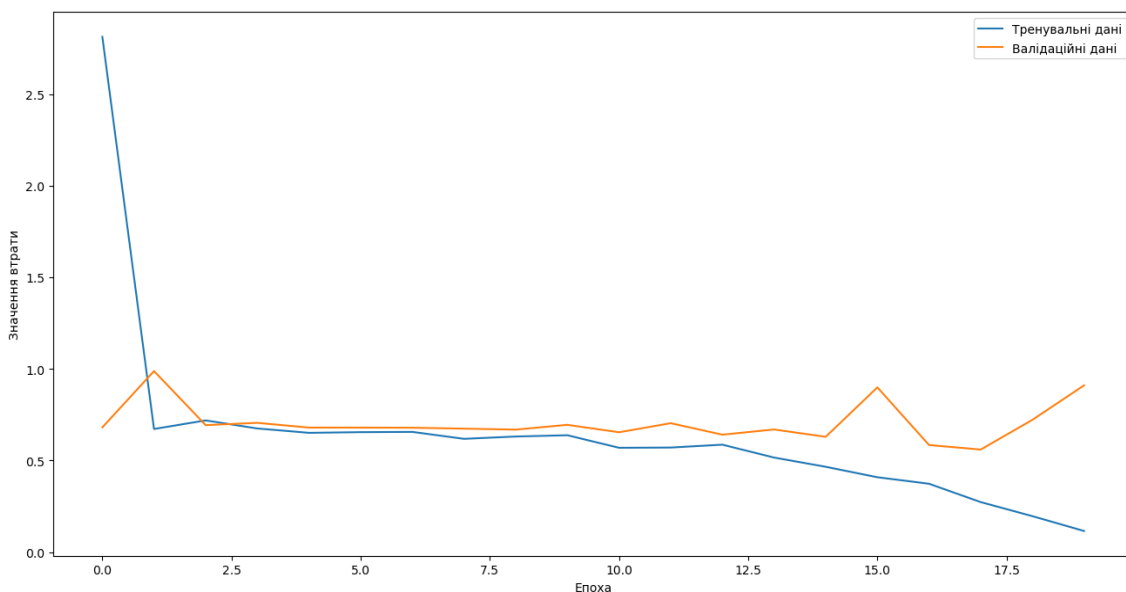
# Оцінка моделі
test_loss, test_acc = model.evaluate(X_test, y_test, verbose=2)
print(f'\nТестова точність: {test_acc:.4f}')

# Візуалізація графіка залежності помилки від епох
plt.plot(history.history['loss'], label='Тренувальні дані')
plt.plot(history.history['val_loss'], label='Валідаційні дані')
plt.xlabel('Епоха')
plt.ylabel('Значення втрати')
plt.legend(loc='upper right')
plt.show()
```

Рисунок 4 – Програмна модель створення та навчання КНМ
виявляти аномальну роботу електродвигуна

Джерело: розроблено авторами

Процес навчання запропонованої КНМ дав результат, який відображено у вигляді графіка на рисунку 5 а. Навчання тривало двадцять епох в результаті яких сітка отримала можливість з точністю 99,02 % визначати аномалії на навчальних даних та з точністю 68,75% на даних валідації рисунок 5 б.



а

```

Epoch 17/20
6/6 ██████████ 28s 5s/step - accuracy: 0.7841 - loss: 0.3980 - val_accuracy: 0.7500 - val_loss: 0.5841
Epoch 18/20
6/6 ██████████ 28s 5s/step - accuracy: 0.9141 - loss: 0.2583 - val_accuracy: 0.6250 - val_loss: 0.5595
Epoch 19/20
6/6 ██████████ 28s 5s/step - accuracy: 0.9790 - loss: 0.1800 - val_accuracy: 0.7500 - val_loss: 0.7218
Epoch 20/20
6/6 ██████████ 41s 5s/step - accuracy: 0.9920 - loss: 0.1131 - val_accuracy: 0.6875 - val_loss: 0.9100
1/1 - 1s - 939ms/step - accuracy: 0.7500 - loss: 0.8823
  
```

б

Рисунок 5 – Результати навчання конволюційної нейронної мережі, що визначає кореляцію між надійністю функціонування та акустичними спектрами обладнання:

а – графік залежності помилки від номера епохи навчання; б - значення помилки для останніх трьох епох навчання

Джерело: розроблено авторами

Розглянутий метод кореляції між характеристиками звукових сигналів та надійністю обладнання, дозволяє використовувати акустичні спектри, для ідентифікації патернів аварійного функціонування обладнання, що є важливим для підвищення ефективності технічного обслуговування та запобігання аваріям.

Запропонований підхід демонструє перспективи використання машинного навчання у виробничих процесах, де раннє виявлення проблем може значно зменшити витрати та підвищити якість продукції. Завдяки високій точності та швидкості обробки даних, КНМ стає важливим інструментом для покращення надійності функціонування та ефективності експлуатації автоматизованих виробничих ліній.

Висновки:

1 Запропоновано метод виявлення кореляції між акустичним спектром роботи обладнання та його параметрами надійності. При цьому використовували фононові

акустичні сигнали з характеристичними спектральними лініями, які мали нахил у відповідності до зменшення обертів двигуна, як електроприладу.

2 Розглянуто спосіб впровадження машинного навчання в автоматизовані виробничі лінії для підвищення їх ефективності. Машинне навчання було реалізовано на DataSet графічних матеріалах конволюційних нейронних мереж для виявлення аномальної роботи електродвигуна.

3 Побудована структура та програмна модель створення та навчання конволюційних нейронних мереж для розпізнавання двовимірних патернів стану виробничого обладнання. Визначено, що результат процесу навчання здійснюється з точністю 99,02% відносно аномалії процесів функціонування виробничого обладнання і 68,75% – на даних валідації. Показано можливість ідентифікації патернів аварійного функціонування обладнання, що важливо для підвищення ефективності і надійності функціонування виробничих ліній технічним обслуговуванням.

Список літератури

1. Zhiqiang Gao, Qi Chang, Yu Deng, Wei Liu, Pengfei M, Pu Zhou, Lei Si. "Tilt noise extraction method based on fourier transform and fitting of 2D images". Optics Communications. Volume 577, March 2025, 131372. URL: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2024.131372>
2. Аулін В.В., Гриньків А.В., Лисенко С.В., Голуб Д.В. Синергетика підвищення надійності машин використанням моделей марківських процесів. *Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу с/х машин і знарядь*: зб. матеріалів доп. учасн. V Всеукраїнської науково-практичної конф. Житомир: Житомирський агротехнічний коледж, 2019. С. 242-245.
3. Аулін В. В., Гриньків А. В., Головатий А. О., Лисенко С. В., Голуб Д. В., Кузик О.В., Тихий А. А. Методологічні основи проектування та функціонування інтелектуальних транспортних і виробничих систем: монографія під заг. ред. д.т.н., проф. Ауліна В.В. Кропивницький: Видавець Лисенко В.Ф., 2020. 428с.
4. Kenta Ohira, Toru Ohira. Solving a delay differential equation through the Fourier transform. Physics Letters A. Volume 531, 28 January 2025, Page 130138. URL: <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2024.130138>.
5. Mehieddine Derbas, Stephan Frömel-Frybort, Hans-Christian Möhring, Martin Riegler. Accelerated Singular Spectrum Analysis and Machine Learning to investigate wood machining acoustics. Mechanical Systems and Signal Processing. Volume 223, 15 January 2025, 111879. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2024.111879>.
6. В.В. Аулін, С.Г. Ковальов, А.В. Гриньків, В.В. Варваров. Алгоритм оптимізації надійності функціонування та ефективності використання виробничого обладнання методами штучного інтелекту. *Збірник наукових праць «Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки»*. Вип.10 (41), ч. I. Кропивницький. 2024, С. 60-67.
7. Ковальов С.Г. Ковальов Ю.Г. Особливості реалізація моделі штучної нейронної мережі апаратними засобами. «Наука і технікасьогодні» (Серія «Педагогіка», Серія «Право», Серія «Економіка», Серія «Фізико-математичні науки», Серія «Техніка»): журнал. 2024. №6(34) 2024. С. 1131. URL: DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-6\(34\)](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-6(34))
8. Tao Liu, Xinsan Li, Junshuai Sun, Mindong Lyu. Shaoze Yan A post-processing method called Fourier transform based on local maxima of autocorrelation function for extracting fault feature of bearings. Advanced Engineering Informatics. Volume 62, Part B, October 2024, 102766 URL: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102766>.
9. Xuanqi Lin, Yong Zhang, Shun Wang, Yongli Hu, Baocai Yin. Multi-scale wavelet transform enhanced graph neural network for pedestrian trajectory prediction. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. Volume 659, 1 February 2025, 130319. URL: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2024.130319>.
10. Seong-Heon Seo. Instantaneous frequency estimation by interpolating continuous wavelet transform coefficients. Digital Signal Processing. Volume 159, April 2025, 104989. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2025.104989>.
11. Elizabeth Shoop, Suzanne J. Matthews, Richard Brown, Joel C. Adams. Hands-on parallel & distributed computing with Raspberry Pi devices and clusters. Journal of Parallel and Distributed Computing. Volume 196, February 2025, 104996. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2024.104996>.
12. M.D. Rakesh, M. Jeevankumar, S.B. Rudraswamy. Implementation of real time root crop leaf classification using CNN on raspberry-Pi microprocessor. Smart Agricultural Technology. Volume 10, March 2025, 100714. URL: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100714>.

13. Luca Barillaro. Deep Learning Platforms: TensorFlow. Reference Module in Life Sciences. 2024. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95502-7.00167-6>.
14. Luca Barillaro. Deep Learning Platforms: Keras. Reference Module in Life Sciences 2024. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95502-7.00092-0>.
15. Sharnil Pandya, Hemant Ghayvat. Ambient acoustic event assistive framework for identification, detection, and recognition of unknown acoustic events of a residence. *Advanced Engineering Informatics*. Volume 47, January 2021, 101238. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101238>.

References

1. Zhiqiang Gao, Qi Chang, Yu Deng, Wei Liu, Pengfei M, Pu Zhou, & Lei Si. (2025) "Tilt noise extraction method based on fourier transform and fitting of 2D images". *Optics Communications*. Volume 577, March 2025, 131372. URL: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2024.131372> [in English].
2. Aulin V.V., Hrynkiv A.V., Lysenko S.V., & Holub D.V. Synergetics of increasing machine reliability using Markov process models. Prospects and trends in the development of structures and technical service of agricultural machines and tools: collection of materials of the participants of the V All-Ukrainian Scientific and Practical Conference. Zhytomyr: Zhytomyr Agrotechnical College, 2019. P. 242-245. [in Ukrainian].
3. Aulin V.V., Hrynkiv A. V., Holovaty A. O., Lysenko S. V., Holub D. V., Kuzyk O. V., & Tykhy A. A. Methodological foundations of design and functioning of intelligent transport and production systems: monograph under the general editorship of Dr. Tech., Prof. Aulina V. V. Kropyvnytskyi: Publisher Lysenko V. F., 2020. 428p. [in Ukrainian].
4. Kenta Ohira, Toru Ohira. Solving a delay differential equation through the Fourier transform. *Physics Letters A*. Volume 531, 28 January 2025, Page 130138. URL: <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2024.130138>. [in English].
5. Mehieddine Derbas, Stephan Frömel-Frybort, Hans-Christian Möhring, Martin Riegler. Accelerated Singular Spectrum Analysis and Machine Learning to investigate wood machining acoustics. *Mechanical Systems and Signal Processing*. Volume 223, 15 January 2025, 111879. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2024.111879>. [in English].
6. V.V. Aulin, S.G. Kovalev, A.V. Hrynkiv, & V.V. Varvarov. Algorithm for optimizing the reliability of functioning and efficiency of the use of production equipment using artificial intelligence methods. Collection of scientific papers "Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences". Issue 10 (41), part I. Kropyvnytskyi.. 2024, P. 60-67. [in Ukrainian].
7. Kovalev S.G. & Kovalev Yu.G. Features of the implementation of the artificial neural network model by hardware means. "Science and Technology Today" (Series "Pedagogy", Series "Law", Series "Economics", Series "Physical and Mathematical Sciences", Series "Technology")": journal. 2024. No. 6(34) 2024. P. 1131. URL: DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-6\(34\)](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-6(34)) [in Ukrainian].
8. Tao Liu, Xinsan Li, Junshuai Sun, Mindong Lyu. Shaoze Yan A post-processing method called Fourier transform based on local maxima of autocorrelation function for extracting fault feature of bearings. *Advanced Engineering Informatics*. Volume 62, Part B, October 2024, 102766 URL: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102766>. [in English].
9. Xuanqi Lin, Yong Zhang, Shun Wang, Yongli Hu, Baocai Yin. Multi-scale wavelet transform enhanced graph neural network for pedestrian trajectory prediction. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. Volume 659, 1 February 2025, 130319. URL: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2024.130319>.
10. Seong-Heon Seo. Instantaneous frequency estimation by interpolating continuous wavelet transform coefficients. *Digital Signal Processing*. Volume 159, April 2025, 104989. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2025.104989>. [in English].
11. Elizabeth Shoop, Suzanne J. Matthews, Richard Brown, Joel C. Adams. Hands-on parallel & distributed computing with Raspberry Pi devices and clusters. *Journal of Parallel and Distributed Computing*. Volume 196, February 2025, 104996. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2024.104996>. [in English].
12. M.D. Rakesh, M. & Jeevankumar, S.B. Rudraswamy. Implementation of real time root crop leaf classification using CNN on raspberry-Pi microprocessor. *Smart Agricultural Technology*. Volume 10, March 2025, 100714. URL: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100714>. [in English].
13. Luca Barillaro. Deep Learning Platforms: TensorFlow. Reference Module in Life Sciences. 2024. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95502-7.00167-6>. [in English].
14. Luca Barillaro. Deep Learning Platforms: Keras. Reference Module in Life Sciences 2024. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95502-7.00092-0>. [in English].
15. Sharnil Pandya, Hemant Ghayvat. Ambient acoustic event assistive framework for identification, detection,

and recognition of unknown acoustic events of a residence. *Advanced Engineering Informatics*. Volume 47, January 2021, 101238. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101238>. [in English].

Serhii Kovalov, Doctoral student, Ph.D., ped. sci., **Viktor Aulin**, Prof., DSc., **Andrii Hrynkiv**, Senior Researcher, PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Valerii Varvarov, PhD tech. sci.

Kharkiv National Ivan Kozhedub Air Force University, Kharkiv, Ukraine

Increasing the Reliability and Efficiency of Production Lines Using Artificial Intelligence Methods Using Acoustic Signal Monitoring

The article provides an in-depth analysis of a method to improve the reliability and efficiency of automated production lines by reducing maintenance costs and minimizing downtime using artificial intelligence algorithms. The method involves the application of acoustic spectra generated by the production line nodes during operation to establish a correlation with the reliability and efficiency of these lines. A model for representing acoustic spectra as a two-dimensional data array, which captures the change in acoustic spectra over time, has been proposed. The format of acoustic spectra as two-dimensional data is used to recognize equipment operation patterns. To recognize these patterns, the use of a convolutional neural network is proposed, and its software model has been developed, allowing simulation and assessment of the accuracy of using machine learning methods.

Additionally, the article highlights the results of the functioning of the developed neural network, which indicate a significant correlation between the measured acoustic spectra of the production line equipment and its reliability and efficiency indicators. The importance of this approach lies in the ability to timely detect potential problems and quickly eliminate them, which in turn contributes to reducing maintenance costs and increasing productivity.

Moreover, the implementation of this method can significantly impact the overall efficiency of production processes, providing more accurate and reliable monitoring of equipment conditions. Further research may be directed towards improving the proposed models and algorithms, as well as developing new approaches to the analysis and interpretation of acoustic spectra.

Furthermore, the integration of such advanced technologies into the production environment demonstrates a progressive shift towards more intelligent and autonomous manufacturing systems. These advancements not only enhance the performance and sustainability of industrial operations but also pave the way for future innovations. By continually refining the models and algorithms used in acoustic spectrum analysis, industries can achieve higher levels of precision in fault detection and maintenance planning. This proactive approach ensures that equipment operates at optimal levels, thereby extending its lifespan and reducing unexpected downtime. Overall, the adoption of AI-driven methodologies in industrial settings represents a significant leap forward in modernizing production lines and achieving unprecedented levels of operational excellence.

reliability of operation, efficiency of operation, automated production lines, acoustic spectrum, machine learning, convolutional networks

Одержано (Received) 31.10.2024

Прорецензовано (Reviewed) 05.12.2024

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2024

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ

UDC 666.973.6

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.152-160](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.152-160)**Roman Sivak**, post-graduate*Vinnitsia National Technical University, Vinnitsa, Ukraine**e-mail: sivak10052@gmail.com*

Modified Cellular Concrete: Structure, Properties, and Potential Applications

The article proposes a method for the autoclave-free production of ultra-lightweight cellular concrete based on Portland cement, glass waste, and liquid glass. A hardening activator and a gas-forming agent are used to produce a porous material with high thermal insulation properties and water resistance. The proposed concrete can be used as thermal and sound insulation material, as well as for masonry and construction of non-bearing internal walls.

ellular concrete, waste glass, liquid glass, alkaline activation, porous structure, water resistance

Problem Statement. In the context of the need for conservation and efficient use of natural resources, special attention is given to the rational use of secondary materials in the production of construction products. The development of waste-free technologies and recycling contributes to improving the environmental situation and reducing the depletion of non-renewable resources. Glass waste is a large-volume secondary mineral resource whose recycling is a complex task. The disposal of glass negatively impacts the environment, as glass in landfills hinders soil reclamation. Therefore, finding new methods for utilizing glass waste is crucial.

Analysis of Recent Studies and Publications. Glass waste has been identified as an effective aggregate for building materials production. Ground glass is used in foamed glass, ceramic products, facade cladding, thermal insulation materials [1], cement mixtures, and geopolymer concretes. Research [2] shows glass's potential in road construction, including asphalt mixtures and road coverings, as well as improving road markings with glass beads. Ground glass is particularly promising for porous thermal insulation materials and aerated concrete, as it is less flammable than traditional insulation materials like polyurethane, polypropylene, and polystyrene [3]. However, fibrous mineral materials such as glass wool do not fully protect metal structures from corrosion without additional waterproofing.

Studies [4–5] highlight the high thermal conductivity of porous cement materials with artificial aggregates, but research [6] shows that temperature reduction can be achieved using liquid glass as an activator for slag mixtures. Moreover, liquid glass mixtures set at high temperatures and altered pH.

Problem Statement. Thus, despite the considerable number of studies conducted, the issue of obtaining porous materials based on glass and liquid glass, as well as investigating their properties, remains insufficiently explored. Therefore, the aim of this work is to determine the optimal conditions for forming a porous structure of foam concrete made from glass waste and liquid glass. This is an important step in the development of new, more efficient, and environmentally safe building materials.

Main Material Presentation: For the production of cellular concrete, the following materials were used: glass waste, liquid glass, sodium hydroxide, sodium hexafluorosilicate, Portland cement, and water.

Aluminum powder was used as a gas-forming agent. The chemicals had a purity grade of "chemical purity" and were used without additional purification[7].

Glass Waste: Uns sorted glass waste with a fineness modulus (F_m) of 0.945, true density of 2435 kg/m^3 , and bulk density of 1313 kg/m^3 was used in the work. Part of the glass waste was ground to a powdery state to achieve a specific surface of $450\text{--}550 \text{ m}^2/\text{kg}$. The grinding time to achieve the specific surface of the ground glass ($450\text{--}550 \text{ m}^2/\text{kg}$) was $40\text{--}60$ minutes. The average chemical composition of the glass waste used is provided in Table 1.

Table 1 – Chemical composition of cullet used in the work.

| Oxide | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO+MgO | Na ₂ O+K ₂ O | SO ₃ |
|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------|------------------------------------|-----------------|
| Content, mass. % | 71.5–72.6 | 2–2.6 | 0.1–0.25 | 10–10.5 | 15.0–16.0 | 0.3–0.4 |

Source: developed by the author

Liquid Glass: Sodium liquid glass was used, which is an alkaline aqueous solution of sodium silicates ($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$) with a mass fraction of SiO₂ ranging from 22.7 to 29.6%, a silicate modulus (n) between 2.3 and 2.6, and a density of $1360\text{--}1450 \text{ kg/m}^3$.

Aluminum Powder: To form the porous structure of concrete using glass as an aggregate, aluminum powder of grade PAP–1 was used as a gas-forming agent. The residue on sieve № 008 was 1%. The powder contains impurities in mass %: iron — 0.5, silicon — 0.4, copper — 0.05, manganese — 0.1, moisture — 0.2, oil — 3.8. Sodium hexafluorosilicate Na₂SiF₆ was used as a gas formation accelerator and hardener.

Purity of Reagent: 98 mass % Na₂SiF₆, insoluble residue no more than 1 mass %, water content no more than 0.5 mass %. Sodium hydroxide NaOH used in the study contained at least 99% NaOH, with a mass fraction of sodium carbonate (Na₂CO₃) not exceeding 0.8 mass %.

Portland Cement: To ensure strength and improved water resistance of pore walls in the porous material, Portland cement CEM I 42.5 R (EN 197–1) was used, containing tricalcium silicate not less than 60 mass % and tricalcium aluminate not more than 9 mass %; the specific surface area of the cement was $300\text{--}400 \text{ m}^2/\text{kg}$. **Water:** Distilled water was used to prepare the mixtures.

Mechanical Testing of Samples: Compression and bending tests of glass-filled samples were conducted in accordance with European standards [8-9]. The samples for compression strength tests had a cubic shape with a side of 10 cm, and for bending strength tests, they had a beam shape of $10 \times 10 \times 36 \text{ cm}^3$. The samples were cut from control blocks with dimensions of $20 \times 40 \times 40 \text{ cm}^3$. Control blocks were prepared by filling the molds with approximately 1/3 volume of a well-mixed component mixture, holding the mixture until the end of the foaming process, and then removing the blocks after 3 days of storage at $20 \pm 2^\circ\text{C}$. The blocks were then wrapped in polyethylene film and stored under the same conditions for 28 days. Prior to testing, the samples were dried at 60°C to a constant weight. Compression and bending tests were performed using presses with a loading rate of 0.05 kN/s . Each sample of the same composition was tested six times, and the average strength values were calculated from the results.

Specific Surface (S_{sp}): The specific surface of materials with developed microstructures and porosity was determined by the Brunauer–Emmett–Teller (BET) method.

The determination was based on experimental data from low-temperature nitrogen adsorption at 77 K, building adsorption isotherms.

Thermal Analysis: Thermal transformations during heating of the materials were studied using differential thermal analysis (DTA) and thermogravimetric analysis (TG). The samples were heated in alumina crucibles with an airflow rate of 100 mL/min and a heating rate of 10 K/min.

Sample Porosity: The porosity of the samples was calculated using experimentally determined values of true density and average density ρ in a dry state, applying the corresponding formula for determining porosity P (%) [10].

$$P = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right) \cdot 100\% \quad (1)$$

Open porosity P_{op} (%) is determined by the following formula:

$$P_{op} = W_0 \quad (2)$$

where W_0 – is the water absorption of the material by volume, %

The closed porosity P_c (%) was calculated using the following formula:

$$P_c = P - P_{op} \quad (3)$$

The normal density of the samples was calculated using the following formula:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4)$$

The production of cellular concrete containing cullet typically involves autoclave processing [11]. The key process in this treatment is the formation of insoluble silicates, especially in mixtures with at least 15% alkaline oxides. In this study, to improve energy efficiency, liquid glass was used instead of autoclave treatment. Due to its high modulus ($n = 2.3-2.6$) and increased viscosity, water was added to the mixture to enhance the porosity of the final material. Another important factor influencing the properties of the resulting cellular concrete is the dispersion of the glass.

Unsorted cullet, which is rarely used in glass factories due to its impact on the homogeneity and quality of the final glass products, was used here. However, for producing non-combustible porous materials containing cement, glass homogeneity is not critical, allowing for the use of cullet with varying chemical compositions and dispersions. The cullet was degreased in acetone, washed with distilled water, and dried at room temperature before being ground in a screw crusher to achieve the following characteristics: fineness modulus (F_m) = 0.945, true density of 2435 kg/m³, and bulk density of 1313 kg/m³. To optimize the packing density of the raw material grains and form a dense, strong structure, the proportion of large and small fractions of the ground cullet was balanced. The finely ground cullet serves as a structuring material due to the interaction of its amorphous silicon dioxide (SiO₂) with the alkaline environment of liquid glass and Portland cement, which affects the strength of the pore walls. To increase the fine fraction, part of the ground cullet was milled into powder to achieve a specific surface area of 450–550 m²/kg. The granulometric composition of the ground and milled cullet is shown in Table 2, and the particle size distribution is presented in Fig. 1.

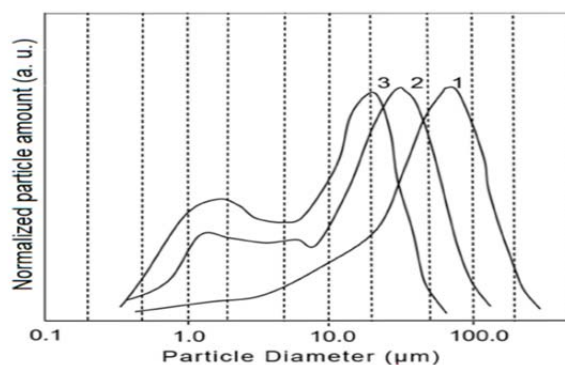


Figure 1 – Size distribution of glass particles with different specific surface area: (1) $S_{sp} = 450 \text{ m}^2/\text{kg}$; (2) $S_{sp} = 500 \text{ m}^2/\text{kg}$; (3) $S_{sp} = 550 \text{ m}^2/\text{kg}$.

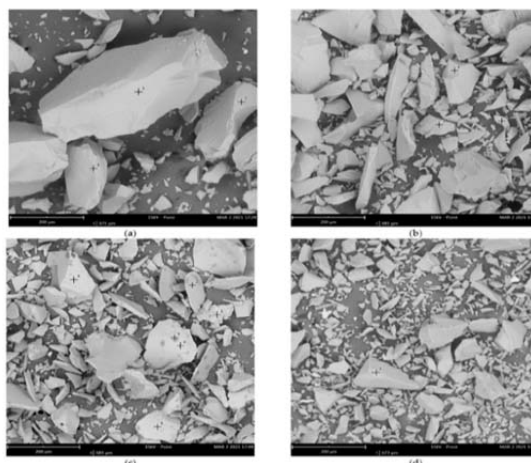
Source: developed by the author

Table 2 – Fractional composition of coarse crushed and highly dispersed milled cullet.

| Particle Size | Mass Fraction, wt. % | | | |
|------------------------------|----------------------|--|--|--|
| | Coarse Cullet | Milled Cullet, $S_{sp} = 450 \text{ m}^2/\text{kg}$ | Milled Cullet, $S_{sp} = 500 \text{ m}^2/\text{kg}$ | Milled Cullet, $S_{sp} = 550 \text{ m}^2/\text{kg}$ |
| $d > 1 \text{ mm}$ | 10.5 | 0 | 0 | 0 |
| $0.2 < d < 1.0 \text{ mm}$ | 21.5 | 5.2 | 1.7 | 1.9 |
| $0.063 < d < 0.2 \text{ mm}$ | 49.3 | 76.1 | 89.7 | 91.3 |
| $d < 0.063 \text{ mm}$ | 13.2 | 18.7 | 8.6 | 6.8 |

Source: developed by the author

Electron microscope analysis revealed the irregular shape of the glass cullet particles (Fig. 2). Using light scattering dispersion, the particle size characteristics were determined: volumetric D43, surface D32, and arithmetic D10 equivalent diameters. Ground glass with $S_{sp} = 450 \text{ m}^2/\text{kg}$ (Table 3) was used.



(a) large-fraction cullet; (b) ground cullet with $S_{sp} = 450 \text{ m}^2/\text{kg}$; (c) ground cullet with $S_{sp} = 500 \text{ m}^2/\text{kg}$; (d) ground cullet with $S_{sp} = 550 \text{ m}^2/\text{kg}$.

Figure 2 – Microphotographs of particles of various size fractions of waste glass

Source: developed by the author

Table 3 – Fractional composition of coarse crushed and highly dispersed milled cullet.

| Sample | Glass Particle Size, μm | | | | | |
|---|------------------------------------|-------------------------------|------------------|-------------------------------|---------------------|-------------------------------|
| | Volume Mean D43 | | Surface Mean D32 | | Arithmetic Mean D10 | |
| | μm^3 | Ratio to the Reference Sample | μm^2 | Ratio to the Reference Sample | μm | Ratio to the Reference Sample |
| Milled cullet $S_{sp} = 450 \text{ m}^2/\text{kg}$ | 46.68 | – | 19.2 1 | – | 15.45 | – |
| Milled cullet $S_{sp} = 500 \text{ m}^2/\text{kg}$ | 22.77 | 2.05 | 11.4 3 | 1.68 | 12.16 | 1.27 |
| Milled cullet $S_{sp} = 550 \text{ m}^2/\text{kg}$ | 22.34 | 2.09 | 11.0 8 | 1.73 | 11.61 | 1.33 |

Source: developed by the author

Previous study [12] showed that to obtain cellular concrete with acceptable strength properties under natural curing conditions, certain component ratios must be followed: liquid glass 28–32 wt.%, poly-disperse glass cullet 38–47 wt.%, Portland cement 9–12 wt.%, sodium hexafluorosilicate 3.5–4.5 wt.%, sodium hydroxide 2.5–3.5 wt.%, aluminum powder 1–1.2 wt.%, water 8–9 wt.%. During the preparation of the cement paste, liquid glass and water are added to the mixture, initiating exothermic reactions and raising the mixture temperature to 80–100 °C. The formation of a porous structure and hardening lasts 20–40 minutes, after which the material cools and does not require further thermal treatment. Changes in the component ratios significantly affect the strength and structure of the resulting material.

The effect of S_{sp} glass waste on the strength of cellular concrete was studied on samples containing 40 wt.% cullet, 30 wt.% liquid glass ($\rho = 1300 \text{ kg/m}^3$), 12 wt.% Portland cement, 4.3 wt.% sodium hexafluorosilicate, 3.5 wt.% sodium hydroxide, 1.2 wt.% aluminum powder, and 9 wt.% water. The results showed that the compressive and bending strength increases with the increase in the specific surface area of milled glass to 450–550 m^2/kg (Fig. 3). The increase in dispersion contributes to a higher reactivity of the particles, which enhances the formation of silicate structures under the influence of an alkaline environment.

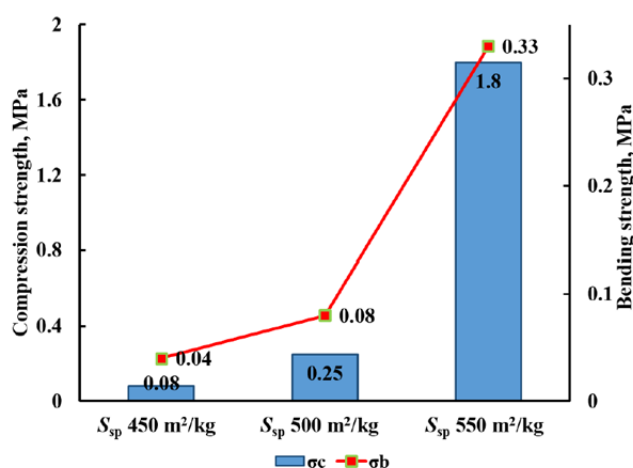
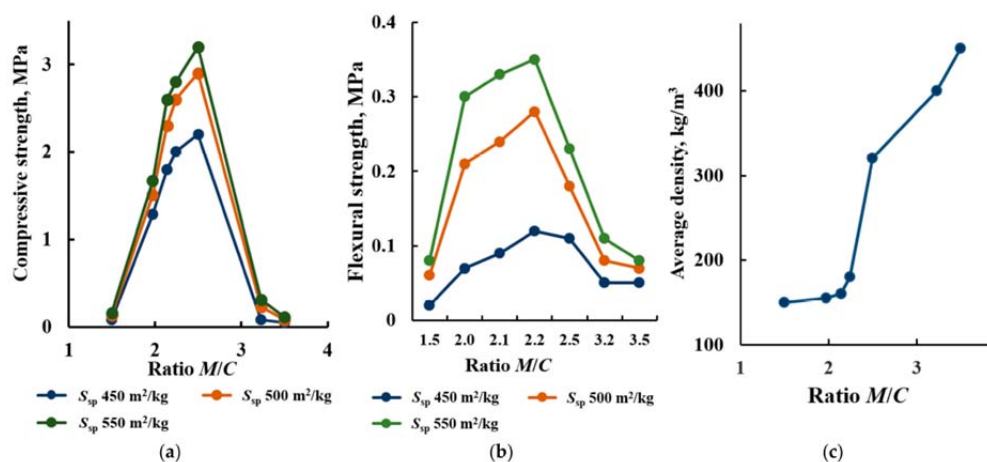


Figure 3 – Dependence of the strength of cellular concrete samples based on waste glass and liquid glass on the specific surface area of milled glass

Source: developed by the author

Sodium aluminate formed in liquid glass in the presence of calcium hydrosilicates promotes the formation of insoluble aluminosilicates, such as $\text{Na[AlO}_2\text{]}\cdot\text{Al[SiO}_4\text{]}\cdot 6\text{SiO}_2$ and $\text{Ca[Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8\text{]}$, stabilizing the pore wall structure in the final material. The reaction of amorphous silica with liquid glass at the "solution–particle" interface is accompanied by polymerization processes, which strengthen the bond between glass particles by forming three–dimensional silicate structures. The optimal ratio of finely ground to coarsely ground cullet for achieving maximum strength is 1.97–2.24, which provides strong samples with a dry bulk density ranging from 150 to 300 kg/m^3 (Fig. 4).

Both high and low content of large glass cullet fractions fail to achieve adequate strength in the samples. With low crushed glass content, the density of the samples increases significantly, but they become brittle. The glass fraction ratio also affects the thermal conductivity of the cellular concrete samples: as the ratio increases from 1.5 to 3.5, thermal conductivity reaches its maximum. Phase transitions during heating were evaluated using differential thermal analysis. After drying, hydrated structures with small amounts of crystallization water remain, with water loss occurring between 100–150 °C.



(a) – compressive strength; (b) – flexural strength; (c) – density

Figure 4 – Dependence of compressive strength (a), flexural strength (b) and density (c) of glass–filled cellular concrete samples in the dry state with a density of 360 kg/m^3 on the mass ratio of finely milled and crushed glass

Source: developed by the author

With temperature increase from 150 to 550 °C, polycondensation processes occur in the pore wall structure, accompanied by water loss of 3–5%. In this range, dehydration of hydro–silicates takes place. As the temperature increases from 550 to 850–950 °C (ascending exothermic peak), crystallization of liquid glass and finely milled glass cullet occurs, with an exothermic peak of 7–9 mW/mg without mass loss. Polymorphous transformations of calcium silicates also happen in this range. Higher temperatures lead to melting of the samples above 900 °C. Increasing the finely milled glass proportion reduces the upper temperature limit range from 800 to 400 °C, as phase transformations in samples with finely milled glass occur at lower temperatures.

Thus, glass dispersion significantly affects pore wall strength in porous concrete. The highest strength is achieved with a milled–to–crushed glass ratio of 1.97–2.24. In this case, small glass particles form the polymeric silicate bond, while large particles act as reinforcements.

The density of liquid glass affects hydration intensity, setting time, and strength of the resulting porous material. The liquid glass density used ranged from 1130 to 1350 kg/m^3 .

Increasing liquid glass density increases both the density and strength of the cellular concrete. Strength depends linearly on the liquid glass density between 1200–1350 kg/m³, but at higher densities, strength increases more slowly due to high viscosity, impairing gas formation. At lower liquid glass densities (1130–1200 kg/m³), it's impossible to achieve a strong porous structure, with pore walls breaking under slight mechanical impact.

Increasing water content in low-density liquid glass decreases pH, reducing amorphous silica dissolution intensity and material strength. Therefore, the optimal liquid glass density is between 1230 and 1350 kg/m³, allowing for the production of low-density products with sufficient strength.

The porosity of cellular concrete is characterized by pore content, diameter, and uniformity of distribution. Macropores with diameters of 1 mm or more are formed due to gas formation. In systems with macropore volumes over 50%, porosity can exceed 90%, with the pore wall material occupying a smaller area.

For foam concrete samples based on glass, compositions were selected with a finely milled-to-crushed glass ratio of 2.24, and liquid glass density between 1130 and 1350 kg/m³. The macro- and microstructure of the samples were evaluated using electron microscopy, and macroporosity was measured microscopically. The results of macroporosity measurements based on liquid glass density are presented in Table 3.

Table 3 – Macroporosity of glass-filled aerated concrete samples at different densities of liquid glass.

| No | Liquid Glass Density, kg/m ³ | Total Porosity, % | Open Porosity, % | Closed Porosity, % |
|----|---|-------------------|------------------|--------------------|
| 1 | 1350 | 68.7 | 14.63 | 54.07 |
| 2 | 1310 | 73.5 | 10.05 | 63.45 |
| 3 | 12301 | 78.9 | 10.77 | 68.13 |
| 4 | 1200 | 82.4 | 10.72 | 71.68 |
| 5 | 1130 | 85.6 | 8.90 | 76.7 |

Source: developed by the author

Cellular concrete samples exhibit high porosity with mostly closed pores, resulting in low thermal conductivity. The pore shape is nearly spherical, and their diameter varies with material density. At densities of 280–300 kg/m³, pores measure 650–850 μm, while at higher densities, they shrink to 350–600 μm. Pore size distribution curves were plotted, and calculations for mean pore diameters (arithmetic and volumetric) and sample polydispersity ($P = dN/dV$) were performed. Lower-density samples have less homogeneous structures, while higher-density samples are more uniform.

The pore walls exhibit a spongy structure typical of hardened gels. Adsorption measurements reveal polymer adsorption in small pores, while capillary condensation occurs in mesopores (1.5–2 nm in size) within the pressure range of 0.5–0.95.

Water absorption tests show that the material has high porosity, with water absorption by weight ranging from 36 to 38.5%. Water absorption is more stable when liquid glass density is between 1200–1310 kg/m³. Outside this range, the porous structure changes, affecting water absorption. Higher-density liquid glass (1350 kg/m³) results in more macro and mesopores, increasing volumetric water absorption.

Despite high water absorption, the samples retain strength when saturated, showing high water resistance due to the material's hydrophobic properties. Water absorption and resistance depend on the porous structure and raw material ratios.

Compared to other construction materials, this cellular concrete belongs to the lightest cementitious group. Its compressive strength (up to 2 MPa) makes it suitable for non-load-bearing applications. It is not ideal for high-humidity or structural use due to its water absorption and low strength but works effectively as a thermal insulator. It can be used in non-load-bearing interior walls and infill masonry. The formation process also allows flexibility in product shapes and sizes without the need for formwork.

Conclusions. The production of ultra-lightweight cellular concrete based on glass, Portland cement, liquid glass, and an activator for mixing components has been proposed. This initiates complex hydrolytic and gas-forming exothermic reactions, leading to the formation of a porous structure within 20–40 minutes without additional thermal treatment. Depending on the composition and dispersion of the components, an average density of 150–320 kg/m³, compressive strength up to 2.0 MPa, and thermal conductivity coefficient of 0.05–0.09 W/(K·m) are achieved. Optimal characteristics are achieved with a ratio of fine to coarse glass of 1.97–2.24.

The mechanism for forming a strong porous structure lies in the partial dissolution and subsequent joint hardening of layers at the "solution/glass particle" boundary due to the formation of a three-dimensional structural foundation. This ensures structural stabilization due to reinforcement with large glass particles and the formation of insoluble compounds. A comparison of the properties of the obtained material with known data shows that it can be used as a thermal and sound insulation material, as well as for filling masonry and constructing non-load-bearing interior walls. It offers advantages such as energy-saving production technology, resource efficiency due to the use of glass as a raw material, and high fire resistance.

References

1. Popovych, O. R., Zakharko, Ya. M., & Malovanyi, M. S. (2013). Problemy utylizatsiyi ta pererobky budivel'nykh vidkhodiv [Problems of utilization and processing of construction waste]. *Visnyk Natsional'noho universytetu "L'vivs'ka politehnika"*. Teoriya i praktyka budivnytstva, (755), P. 321–324 [in Ukrainian].
2. Dobrotvor, A. A. (2024). Napryamky vykorystannya vidkhodiv znesennya ta ruyinatsiyi v budivel'niy haluzi [Directions for using demolition and destruction waste in the construction industry] [in Ukrainian].
3. Pyatnychuk, T. V., Gomenyuk, D. V., & Zaslavska, S. I. (2024). *Zbirnyk osvitnikh keysiv z enerhoefektyvnosti ta bezpeky pratsi v povoyennomu budivnytstvi: praktychnyy posibnyk* [Collection of educational cases on energy efficiency and labor safety in post-war construction: A practical manual] [in Ukrainian].
4. Boyko, V. O. (2024). Doslidzhennya skladu vysokomitsnoho betonu z skloboyu ta udoskonalennya tekhnolohiyi yoho pryhotuvannya [Investigation of the composition of high-strength concrete with cullet and improvement of its preparation technology] [in Ukrainian].
5. Kondrashchenko, O. V. (2007). *Materialoznavstvo: Navchal'nyy posibnyk* [Material Science: A textbook] [in Ukrainian].
6. Tatarenko, V. P. (2023). Pokrashchennya vlastyvostey nizdryuvatykh betoniv za rakhunok modyfikatsiyi yikh skladovykh [Improving the properties of cellular concrete through the modification of its components] [in Ukrainian].
7. Abd El-Fattah, Z. M., Ahmad, F., & Hassan, M. A. (2017). Tuning the structural and optical properties in cobalt oxide-doped borosilicate glasses. *Journal of Alloys and Compounds*, 728, P. 773–779. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.09.123>
8. Akkurt, I., Gunoglu, K., Kurtuluş, R., & Kavas, T. (2021). X-ray shielding parameters of lanthanum oxide added waste soda-lime glass. *X-Ray Spectrometry*, 50(3), P. 168–179. <https://doi.org/10.1002/xrs.3142>
9. Liu, Y. L., Liu, C., Qian, L. P., Wang, A. G., Sun, D. S., & Guo, D. (2023). Foaming processes and properties of geopolymer foam concrete: Effect of the activator. *Construction and Building Materials*, 391, 131830. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131830>

10. Berezovskyi, A. I., Sidnei, S. O., & Rudesko, I. V. (2019). Otsinka efektyvnosti materialiv dlya hermetyzatsiyi pustot budivel'nykh konstruksiy [Evaluation of the effectiveness of materials for sealing voids in building structures] [in Ukrainian].
11. Herasyutenko, S. I. (2023). Analiz vplyvu disperhuyuchykh dobavok na vlastyvoli hazobetonu [Analysis of the effect of dispersing additives on the properties of gas concrete] [in Ukrainian].

Р.В. Сівак, асп.

Вінницький національний технічний університет, м.Вінниця, Україна

Модифікований ніздрюватий бетон: структура, властивості та потенційні сфери застосування

Використання відходів у виробництві будівельних матеріалів є одним із можливих рішень проблеми сталого управління непереробними відходами та вторинними ресурсами, що важко утилізуються. У цьому дослідженні запропоновано метод безавтоклавного виготовлення ніздрюватого бетону на основі портландцементу, склобою та рідкого скла. Як активатори тверднення використано гексахлоросилікат і гідроксид натрію, а газоутворювачем слугує алюмінієвий порошок. Тверднення сирих сумішей відбувається завдяки екзотермічному тепловиділенню, зумовленому комплексом хімічних реакцій у системі, що усуває потребу в додатковій термічній обробці. Для досягнення прийнятної міцності матеріалу оптимальним є використання двох фракцій склобою: грубодисперсного (модуль крупності $F_m = 0,945$) та дрібнодисперсного (питома поверхня $S_{sp} = 450\text{--}550 \text{ м}^2/\text{кг}$). Дрібні скляні частинки разом із портландцементом беруть участь у гідролітичних і структуроутворювальних процесах, тоді як грубі частинки виконують функцію армувального наповнювача.

У ході дослідження визначено вплив дисперсності скла та густини рідкого скла на густину, пористість, міцність, водопоглинання та водостійкість отриманого пористого матеріалу. Для ніздрюватого бетону із середньою густиною у сухому стані $150\text{--}320 \text{ кг/м}^3$ отримано такі характеристики: міцність на стиск до 2,0 МПа, міцність на вигин до 0,38 МПа, коефіцієнт теплопровідності 0,05–0,09 Вт/(К·м) і максимальна робоча температура 800°C. Запропонований ніздрюватий бетон може використовуватися як негорючий тепло- та звукоізоляційний матеріал. Крім того, блоки з ніздрюватого бетону придатні для заповнення кладки та зведення ненесучих внутрішніх стін, забезпечуючи переваги у сфері енергоефективного виробництва та переробки ресурсів.

ніздрюватий бетон, склобій, рідке скло, безавтоклавне виробництво, пористі матеріали, теплоізоляція, легкий бетон

Одержано (Received) 05.11.2024

Прорецензовано (Reviewed) 11.12.2024

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2024

АГРОІНЖЕНЕРІЯ

УДК 656.338.12

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.161-168](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.161-168)

М.В. Красота, доц., канд. техн. наук, **І.В. Шепеленко**, проф., д-р техн. наук,
Ю.В. Кулешков, проф., д-р техн. наук, **Р.А. Осін**, доц, канд. техн. наук, **Т.В. Руденко**,
доц. канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: krasotamv@ukr.net

Стан і напрямки підвищення ефективності технічного сервісу вантажних автомобілів в агропромисловому комплексі

В роботі виконано аналіз організації технічного сервісу вантажних автомобілів в умовах сільськогосподарського виробництва. Встановлено, що для даної галузі характерно висока трудомісткість сервісних дій, низька технічна та інформаційна забезпеченість технічного сервісу, що приводить до зниження продуктивності транспортних операцій та рентабельності сільськогосподарського виробництва.

З метою підвищення ефективності сервісу вантажних автомобілів запропоновано підвищувати роль технічної діагностики, що неможливо без забезпечення нормативно-технічною документацією. Пропонується запровадити на всіх етапах сервісу вантажних автомобілів використання інформаційних технологій, зокрема використання баз даних та баз інформації, що дозволить скоротити весь цикл технологічного процесу обслуговування автомобілів.
автомобіль, технічний сервіс, діагностування, ремонт

Постановка проблеми. Технічне обслуговування є основним видом виробничого обслуговування вантажних автомобілів в сільському господарстві. Рівень роботи підприємств технічного сервісу значною мірою впливає на ефективність всього с.-г. виробництва. На сьогоднішній день цей вид діяльності реалізується у формі внутрішньогосподарського обслуговування с.-г. підприємств ремонтно-технічними підрозділами та спеціалізованими сервісними підприємствами.

Технічне обслуговування вантажних автомобілів, що працюють в агропромисловому комплексі (АПК), виконується на автотранспортних підприємствах (АТП) або спеціалізованих автосервісних і ремонтних підприємствах: станціях технічного обслуговування (СТО), ремонтних майстернях, спеціалізованих сервісних центрах.

Технічне обслуговування характеризується високою трудомісткістю виконуваних робіт, що необхідні для стійкого забезпечення працездатності вантажних автомобілів, від ефективності здійснення якого залежать такі показники транспортних засобів як безвідмовність, довговічність та продуктивність виконання транспортних операцій. Обсяг операцій по обслуговуванню вантажних автомобілів водіями у ремонтних базах с.г. підприємств може сягати від 25 до 85 %.

З метою досягнення високих показників продуктивності водночас при задовільній якості експлуатації вантажних автомобілів, водії транспортних засобів

повинні витратити при виконанні щоденних технічних обслуговувань від 1 до 1,5 год, а т також понад 1 год. на проведення регульовальних робіт та проведення технологічних робіт, загальна трудомісткість виконання вказаних операцій може сягати від 2 до 2,5 год. за добу. Для підвищення часу на виконання транспортних операцій водії вантажних автомобілів повинні зменшувати час, що витрачається на підготовку автомобілів, що у кінцевому випадку зменшує ефективність використання техніки [1, 2].

Таким чином, тривалість простоїв при неефективному проведенні технічних обслуговувань вантажних автомобілів може сягати від 25 до 30% від загальної тривалості робочої зміни, а що приводить до зниження показників технічної готовності вантажних автомобілів до 60...70% [3], а матеріальні витрати на технічне обслуговування автомобілів перевищують витрати на їх виробництво у 5-10 разів .

Забезпеченість господарств пунктами технічного обслуговування машин становить близько 60 % від потреби, ремонтними майстернями сільськогосподарських господарств – 91 %. На існуючій ремонтно-обслуговуючій базі у господарствах виконується понад 80 % всього обсягу робіт із забезпечення ефективної експлуатації машин. Витрати на технічне обслуговування сягають 23% балансової вартості машинно-тракторного парку [4].

В умовах низької технічної оснащеності с.-г. підприємств підтримка працездатності вантажних автомобілів є завданням першорядної важливості, що значною мірою залежить від застосовуваних форм та методів організації технічного сервісу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сільськогосподарські та спеціалізовані підприємства утворюють у масштабі країни підсистему технічного сервісу. Вони організують з цією метою дилерські пункти, яким надають необхідну допомогу: навчають персонал, постачають довідковою технічною літературою, і навіть постачають устаткування виконання обслуговуючих робіт. Технічне обслуговування дилерами здійснюється безкоштовно лише у гарантійний період і за умови, що не використовуються інші витратні матеріали, що не рекомендуються фірмою. Після закінчення гарантійного періоду обслуговування техніки проводиться самими сільгосппідприємствами або підприємствами технічного сервісу [5].

Розглядаючи технічний сервіс автомобілів в АПК, слід зазначити, що за минуле десятиліття він не отримав розвитку, як того вимагають інтереси держави та науково-технічний прогрес. Сучасний стан технічного обслуговування вантажних автомобілів залишає бажати кращого. ТО автомобілів зараз займає одне з останніх місць. Тому, удосконалення технічного обслуговування вантажних автомобілів є актуальним завданням. У зв'язку з цим одним із основних напрямків, на які мають концентруватися зусилля всіх підприємств та служб ТО в АПК є організація обслуговування вантажних автомобілів .

Основною метою реформування системи технічного сервісу в АПК є забезпечення високої якості послуг із технічного обслуговування вантажних автомобілів. Якість робіт, що виконуються сервісними підприємствами, залежить від оснащеності підприємства технологічним обладнанням, рівня кваліфікації та професійної майстерності персоналу підприємства, якості запасних частин, рівня організації робочого процесу, нормативно-документального забезпечення проведення операцій ТО і діагностування тощо.

Внесок системи технічного обслуговування вантажних автомобілів у підвищення ефективності їх технічної експлуатації досить значний. При раціональному

проведенні технологічних процесів ТО скорочується час на ТО та ремонти, збільшується напрацювання автомобіля і підвищується його продуктивність [6, 7].

ТО вантажних автомобілів займає великий обсяг часу та праці у загальному часі експлуатації автомобіля. Структура трудових витрат за весь час експлуатації вантажних автомобілів складає: 1,5% - виготовлення; 45,5% - ТО; 45% - поточний ремонт; 8% - капітальний ремонт [8]. В умовах України водії значну частину свого робочого часу зайняті проведенням ТО та ремонтів машин [3]. Тому, сфера технічного обслуговування вантажних автомобілів, як складова частина технічного сервісу, сьогодні одна з найефективніших галузей сільського господарства.

В даний час забезпеченість АПК ремонтно-обслуговуючою базою становить близько 60%, тоді як вимоги до неї зростають у зв'язку з підвищенням конструктивної складності машин у результаті інтенсивних технологій у с.-г. виробництві [6].

Кількість сільськогосподарських підприємств, які потребують обслуговування у спеціалізованих пунктах ТО невелике. На недостатній рівень якості технічного обслуговування у пунктах вказали 8%, низький рівень компетенції працівників сервісу близько 6%, значний час очікування обслуговування 8,3 %, а на високу трудомісткість оформлення документів вказали близько 6% клієнтів [6].

Основними показниками, що відображають вплив професійної майстерності водіїв та обслуговуючих робітників на ефективність технічної експлуатації автомобілів, є показники експлуатаційної надійності, економічності та інші, такі як напрацювання на відмову або несправність, тривалість простою в обслуговуванні, витрата запчастин, витрата палива, напрацювання до чергового ТО та ремонту та ін.

За попередньою оцінкою сукупного впливу водіїв та обслуговуючих робітників на рівень технічної готовності та витрат на технічне обслуговування вантажних автомобілів на частку водіїв припадає приблизно від 33 до 36 %, а на частку обслуговуючих робітників від 64 до 67 % [6].

Наявність у системі ТО елементів технічної діагностики дозволяє запобігти можливим відмовам, скоротити кількість невинуватених розбирань, повніше використовувати технічний ресурс машин.

Діагностування, як процес, є комплексом робіт з визначення технічного стану машин, і призначенням відповідних цього стану ремонтно-обслуговуючих впливів. За наявності технічних засобів та у разі економічної доцільності діагностування машин може повністю виконуватися силами та засобами с.-г. підприємств.

Впровадження достовірної діагностики дозволяє значно, в разі збільшити фактичне міжремонтне напрацювання та зменшити кількість відмов у 2-2,5 рази, зменшити витрату палива на 5-8% [7].

Виконуються дослідження зі створення системи ТО за станом у напрямку розвитку нових технологій контролю та діагностування у зв'язку з дедалі ширшим застосуванням інтелектуальних засобів вимірювання та обробки діагностичної інформації на базі персонального комп'ютера.

В зазначених дослідженнях питання нормативно-документальної підтримки ТО і технічної діагностики автомобілів не отримали відображення.

В даний час у нашій країні та за кордоном проводяться науково-дослідні роботи з удосконалення методів та технологій ТО на основі автоматизованого контролю технічного стану машин. Намітився перспективний напрямок, досліджень, до якого належать методи та створені на їх основі технології діагностування транспортних засобів за параметрами характеристик швидкоплинних процесів, що мають місце при роботі двигунів машин у перехідних, тестових режимах вільного розгону та вибігу.

Визначено пріоритетні напрями досліджень з метою вибору найбільш інформативних динамічних характеристик [8, 9].

Постановка завдання. Метою даної роботи є дослідження сучасного стану сервісу вантажних автомобілів в галузі сільськогосподарського виробництва та виявлення шляхів підвищення ефективності обслуговування вантажних автомобілів в умовах АПК.

Викладення основного матеріалу. Світовий та вітчизняний досвід свідчить, що ефективний комплекс послуг із технічного сервісу автомобілів дозволяє суттєво знизити собівартість сільгосппродукції.

Сукупність взаємодії підсистем технічного сервісу дозволяє у результаті підвищити ефективність використання машин. Однак, досягти ефективності системи технічного сервісу можливо за рахунок досягнення узгодженої роботи різних ланок системи та покращення його нормативно-технічної документації. З цією метою можна виділити підсистему завдань технічного сервісу.

Схема забезпечення виконання функцій технічного сервісу вантажних автомобілів показана на рис. 1.

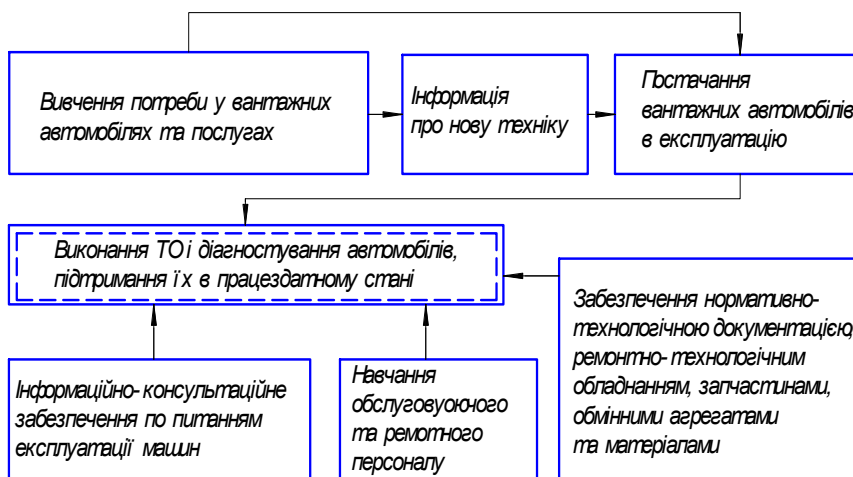


Рисунок 1 – Схема забезпечення виконання функцій технічного сервісу вантажних автомобілів
Джерело: розроблено авторами

Ефективність функціонування системи сервісу вантажних автомобілів повністю залежить від добре налагодженої нормативно-технічної документації і сприяє підвищенню продуктивності перевезень автомобілями сільськогосподарської продукції (рис. 2).

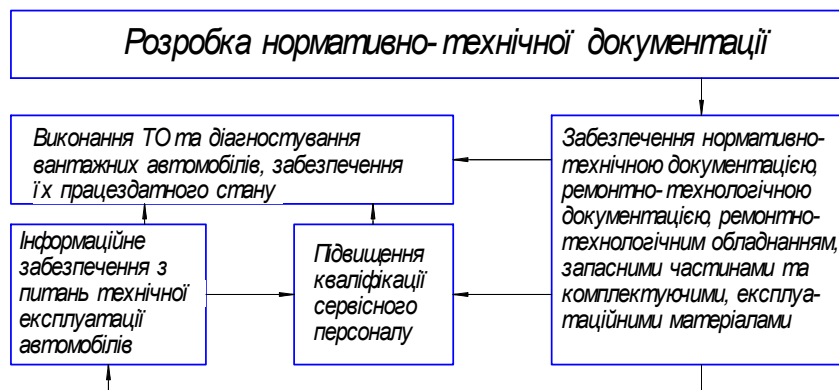


Рисунок 2 – Роль нормативно-технологічної документації в процесах обслуговування автомобілів

Джерело: розроблено авторами

На підвищення ефективності функціонування системи сервісу вантажних автомобілів впливу нормативно-технічної документації становить від 50 до 60 %.

Слід відмітити, що підвищення ефективності функціонування вантажних автомобілів в цілому залежить від якості та надійності експлуатованої техніки та відповідно збільшенням такого важливого показника, як напрацювання на відмову.

Підвищення ефективності технічного обслуговування вантажних автомобілів дозволить підвищити якість і надійність техніки, а також зменшити час простою техніки з допомогою скорочення часу на ТО автомобіля.

На даний час слід віддавати перевагу більш досконалії схемі управління процесами ТО, що передбачає визначення стану вузлів шляхом інструментального контролю.

Найбільш перспективним напрямком є впровадження автоматизації здійснення управління технологією ТО за результатами виконання технічної діагностики систем та механізмів автомобілів, що потребує впровадження перспективних інформаційних технологій у всіх складових транспортного процесу, починаючи з бортової електроніки вантажного автомобіля та закінчуючи інформаційною системою, яка має бути впроваджена у всі структури АПК.

Аналіз процесу управління технічним станом автомобіля дає можливість встановити роль та потребу застосування інформації для прийняття правильного рішення. Таким чином, управління технічним станом конкретного автомобіля полягає у вимірюванні параметрів технічного стану його систем, порівняння отриманих значень з встановленими виробником величинами, прогнозування залишкового ресурсу систем чи агрегатів, встановлення виду та об'єму робіт з технічного обслуговування автомобілів.

Пропонується запровадити при всіх видах технічного сервісу вантажних автомобілів використання інформаційних засобів та технологій, зокрема організація створення баз даних, що показано на рис. 3.

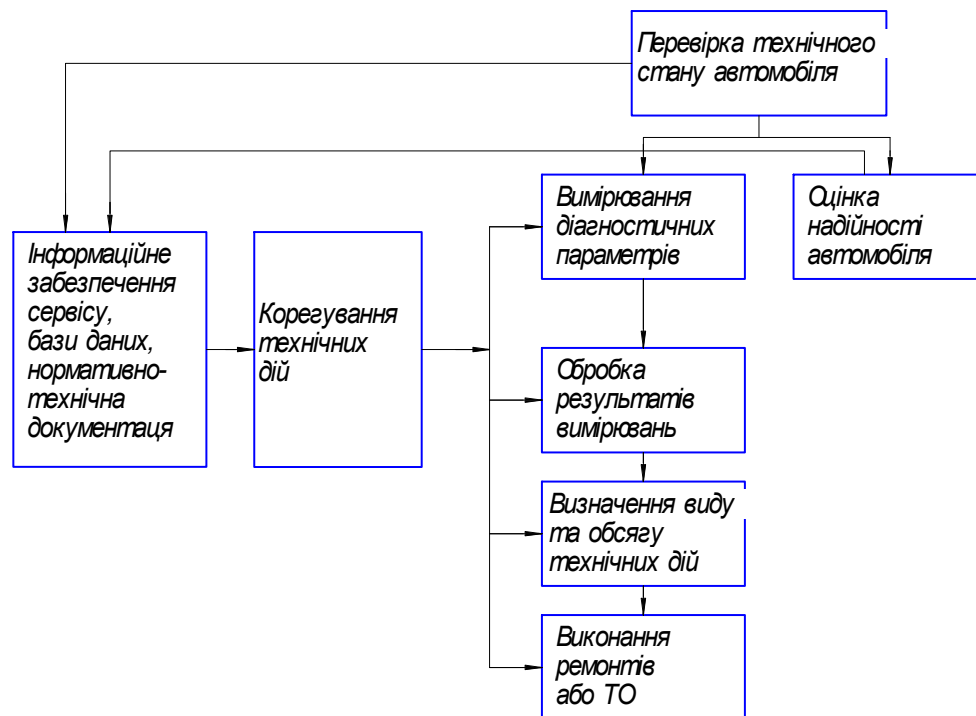


Рисунок 3 – Схема підтримання працездатного технічного стану машини

Джерело: розроблено авторами

Частка наявності нормативно-технічної документації в усьому технологічному процесі становить середньому 40 % від потрібного обсягу. При використанні розробленої інформаційної бази час на обробку інформації скорочується вдвічі, що призводить до скорочення всього циклу технологічного процесу обслуговування автомобілів.

Дослідження та аналіз завдань, розв'язуваних системою ТО, дозволили зробити висновок, що вдосконалення даної системи має відбуватися у взаємозв'язку з передовими інформаційними технологіями, ефективним використанням нормативно-технічної документації.

Як правило, виконання технічного обслуговування вантажних автомобілів полягає на оператора та залежить від його рівня кваліфікації. Отже, на особливу увагу заслуговують завдання створення систем підтримки нормативно-технічної документацією професійної діяльності оператора, що підвищує його ефективність при проведенні об'єму робіт з технічного обслуговування. Важливим напрямком є створення експертних цифрових систем в галузі транспорту.

Основна перевага цього напрямку полягає у тому, що інтелектуальні цифрові системи проектуються з урахуванням знань фахівців-практиків (конструкторів, технологів, випробувачів, експлуатаційників). База інформації таких систем легко поповнюється новими даними та легко впроваджується у транспортне виробництво.

Закордонний досвід та тенденції свідчать, що впровадження нормативно-технічної документації протягом всього часу існування технічної системи є одним з головних завдань в управлінні якістю.

Таким чином, для покращення ефективності експлуатації автомобілів, зменшення витрат при їх функціонуванні є необхідність у вирішенні питань вдосконалення методів технічного обслуговування вантажних автомобілів шляхом розробки та впровадження інформаційних систем під час обслуговування автомобілів.

Доцільно побудувати для підприємства інформаційну систему технічного обслуговування та ремонту устаткування. Описана методика успішно може застосовуватися під час побудови конкретної інформаційної системи ТО у будь-якому окремому господарстві або сервісних підприємствах.

Висока ефективність інформаційної системи пов'язана з її організаційною структурою (кількість і склад автоматизованих робочих місць робітників сервісу, перелік розв'язуваних завдань, використовувані технічні засоби тощо), а застосування інформаційної системи збільшує ефективність роботи як персоналу, але переважно самого виробництва.

Висновки. Виконано аналіз організації та стану сервісу вантажних автомобілів в умовах сільськогосподарського виробництва. Встановлено, що для даної галузі характерно велика трудомісткість сервісних дій, низька технічна та інформаційна забезпеченість технічного сервісу, що приводить до зниження продуктивності транспортних операцій та рентабельності сільськогосподарського виробництва.

Для підвищення ефективності сервісу вантажних автомобілів слід добиватися узгодженої роботи різних ланок системи сервісу, зокрема технічної діагностики, що неможливо без забезпечення нормативно-технічною документацією.

Пропонується запровадити на всіх етапах сервісу вантажних автомобілів використання інформаційних технологій, зокрема, використання баз даних та баз інформації, що дозволить скоротити весь цикл технологічного процесу обслуговування автомобілів. Дані рекомендації успішно можуть застосовуватися під час побудови конкретної інформаційної системи ТО у будь-якому окремому господарстві або сервісних підприємствах.

Список літератури

1. Волков В. П. Загальний підхід до формування моделей оцінювання технічного стану автомобіля в умовах експлуатації/ В. П. Волков, І. В. Грицук, Ю. В. Грицук та інш. *ВМТ*, вип. 9, вип. 1, С. 27–37, 2019.
2. Молодик М. В. Наукові основи системи технічного обслуговування і ремонту машин у сільському господарстві. Кіровоград : КОД, 2009. 180 с.
3. Формальчик Є. Ю., Качмар Р. Я. Основи технічного сервісу транспортних засобів. Львів: Львівська політехніка, 2017. 324 с.
4. Аулін В. В. Вплив системи технічного обслуговування і ремонту автомобілів на собівартість вантажних перевезень. В. В. Аулін, О. М. Замота. *Наукові праці Кіровоградського національного технічного університету. Економічні науки*. 2010. Вип. 17. С. 308-315.
5. Волков В. П. Сучасні технології в технічній експлуатації автомобілів / В. П. Волков, І. В. Грицук, Т. В. Волкова, В. І. Белов, Ю. В. Волков, В. П. Онищук. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. 2019. № 2. С. 30-37. DOI: <https://doi.org/10.36910/automash.v2i13.85>
6. Хітров І. О., Корнієнко В.Я. Роль дилерських підприємств в організації технічного сервісу машин. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Технічні науки*. Рівне, 2012. Вип. 4(60). С. 129-136.
7. Красота М.В. Дослідження шляхів підвищення оперативності виконання діагностичних операцій електронних систем автотракторної техніки/ М.В. Красота, Ю.В. Кулешков, Р.А. Осін та інш. // *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2024. Col.9(40), Part I С. 144-151.
8. Adefemi A. Adekunle, Peter P. Ikubanni and Olayinka O. Agboola. An Expert System for Automobile Repairs and Maintenance. *Mindanao Journal of Science and Technology*. 2018. Vol. 16. P.41- 56.
9. Andersson, R. Manfredsson, P. Lantz, B. (2015) Total productive maintenance in support processes: an enabler for operation excellence *Total Quality Management&Business Excellence*, 26 (9-10), pp. 1055.

References

1. Volkov V. P. (2019) *A general approach to the formation of models for evaluating the technical condition of a car in operating conditions* / V. P. Volkov, I. V. Hrytsuk, Yu. V. Hrytsuk ta insh. *VMT*, vyp. 9, vyp. 1, P. 27–37. [in Ukrainian]
2. Molodyk M. V. (2009) *Scientific basis of the system of maintenance and repair of machines in agriculture*. Kirovohrad : KOD. 180 p. [in Ukrainian]
3. Fomalchuk Ye. Yu., & Kachmar R. Ya. (2017) *Basics of vehicle technical service*. Lviv : Lvivska politekhnika., 324. [in Ukrainian]
4. Aulin V.V., & Zamota O.M. (2010) The influence of the system of maintenance and repair of cars on the cost of freight transportation. *Scientific works of the Kirovohrad National Technical University. Economic sciences.*, vyp. 17 - Kropyvnytskyi, KNTU. [in Ukrainian]
5. Volkov V. P., Hrytsuk I. V., Volkova T. V., Belov V. I., Volkov Yu. V., & Onyschuk V. P. (2019). Modern technologies in the technical operation of cars. *Modern technologies in mechanical engineering and transport*. № 2. P. 30-37. DOI: <https://doi.org/10.36910/automash.v2i13.85> DOI: <https://doi.org/10.36910/automash.v2i13.85> [in Ukrainian]
6. Khitrov I. O., & Korniienko V.Ia. (2012) The role of dealerships in the organization of technical service of machines. *Bulletin of the National University of Water Management and Nature Management. Technical sciences*. Rivne, Vyp. 4(60). P. 129-136. [in Ukrainian].
7. Krasota M.V., Kulieshkov Yu.V., Osin R.A. et al. (2024) Research of ways to improve the efficiency of performing diagnostic operations of electronic systems of auto-tractor equipment. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. Col.9(40), Part I 144-151. [in Ukrainian].
8. Adefemi A. Adekunle, Peter P. Ikubanni and Olayinka O. Agboola. An Expert System for Automobile Repairs and Maintenance. *Mindanao Journal of Science and Technology*. 2018. Vol. 16. P.41- 56. [in Philippines]
9. Andersson, R. Manfredsson, P. & Lantz, B. (2015) Total productive maintenance in support processes: an enabler for operation excellence *Total Quality Management&Business Excellence*, 26 (9-10), pp. 1055. [in UK]

Mykhailo Krasota, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Igor Shepelenko**, Prof., DSc., **Yuriy Kuleshkov**, Prof., DSc., **Ruslan Osin**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Timofey Rudenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

State and Directions for Improving the Efficiency of Technical Service for Trucks in the

Agro-Industrial Complex

The purpose of this work is to study the current state of truck service in the agricultural production sector and identify ways to improve the efficiency of truck maintenance in the conditions of the AIC.

The work analyzes the organization and state of truck service in agricultural production conditions. It is established that this sector is characterized by high labor intensity of service actions, low technical and information support of technical service, which leads to a decrease in the productivity of transport operations and the profitability of agricultural production.

A conclusion is drawn that to improve the efficiency of truck service, one should strive for coordinated work of various links in the service system, particularly technical diagnostics, which is impossible without providing normative-technical documentation.

The work proposes introducing the use of information technologies at all stages of truck service, in particular the use of databases and information bases, which will help reduce the entire cycle of the technological process of vehicle maintenance. These recommendations can be successfully applied when building a specific maintenance information system in any individual farm or service enterprises.

car, technical service, diagnosis, repair

Одержано (Received) 31.10. 2024

Прорецензовано (Reviewed) 10.12.2024

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2024

АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.3.013

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.169-187](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.169-187)

В.В. Аулін, проф., д-р. техн. наук, **О.М. Тертиця**, асп., **Т.М. Надич**, асп., **А.В. Гриньків**, ст. дослід., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

О.Л. Ляшук, проф., д-р. техн. наук, **В.З. Гудь**, проф., д-р. техн. наук

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна

С.З. Залуцький, канд. техн. наук

ВСП «Тернопільський фаховий коледж ТНТУ ім. І.Пулюя», м. Тернопіль, Україна

e-mail: AulinVV@gmail.com

Критерії вибору великовагових транспортних засобів для ефективних і безпечних перевезень

Визначено етапи вибору великовагових транспортних засобів для безпечного перевезення продукції підприємства. Обґрунтовано технічні, організаційні та економічні критерії. Враховано габаритні та вагові параметри, обмеження навантаження на вісь, а також типи комплектації (шторна, бортова, фургон/рефрижератор). Розглянуто дев'ять варіантів із позиціонуванням центру ваги. Запропоновано механізм вибору транспорту за технічною готовністю та економічною ефективністю. Виконано ранжування, з якого обрано три оптимальні варіанти для перевезень підприємства ЗАТ "Кіровоградграніт".

великоваговий транспортний засіб, критерій, ефективність, безпека, надійність, граничне навантаження, допустима вага, м'які контейнери

Постановка проблеми. Обґрунтування та вибір типу великовагових транспортних засобів (ВТЗ) для ефективного і безпечного перевезення готової продукції підприємства ґрунтуються на необхідності запропонування підходів, методів та інструментів, які дозволять отримати максимальну ефективність транспортної складової при стабільному та керованому ланцюгу постачань продукції [1-4]. При цьому за неправильну вказівку ваги та за перевищення допустимої маси та габаритів ВТЗ, навантаження на вісь ВТЗ, юридичними особами або індивідуальними підприємцями, що здійснювали навантаження вантажу на ВТЗ, передбачені штрафні санкції [5-7]. Тому важливим є вирішення завдання вибору ВТЗ, формування структури оцінюючих критеріїв та впорядкування ВТЗ для перевезень готової продукції підприємства.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В існуючих модельних уявленнях великі обсяги перевезення вантажів та вантажопідйомності ВТЗ на різних маршрутах доставки є рівноцінними [8,9]. В той час у ряді випадків буває більш ефективно змінити (збільшити), або зменшити обсяги перевезень вантажів на окремих маршрутах з використанням ВТЗ [10,11]. Можливо також пропорційно (у місці та часі) сформувати план перевезень між учасниками транспортно-логістичного ланцюга [11,12]. У цьому випадку модель перевізного процесу необхідно трансформувати, виходячи з введених додаткових умов функціонування транспортно-логістичної системи і вибору необхідних ВТЗ [13,14].

За наявності у підприємств автопоїздів різної вантажопідйомності, що обслуговують кілька маршрутів доставки, ефективна продуктивність доставки продукції залежатиме від типу ВТЗ та маршруту (плеча доставки, характеристики та обмежень автодоріг) доставки вантажу. У такій постановці ВТЗ, що є в наявності, необхідно розподілити по маршрутах таким чином, щоб максимізувати загальний обсяг перевезень, дотримуючись встановлених співвідношень обсягів доставки між маршрутами [16,17].

Критерієм оптимальності в даній постановці приймають сумарний обсяг перевезення вантажів у транспортно-логістичній системі, який дозволить досягти найбільш продуктивної роботи автопоїздів. У свою чергу необхідно знизити як сумарні, так і питомі витрати на перевезення готової продукції підприємства. У разі необхідності слід врахувати рівень значущості (пріоритетності) певних маршрутів, а також необхідності дотримання заходів безпеки на маршрутах [10,18,19]. При цьому для співвідношення обсягів доставки вантажів, що визначаються плановими умовами перевезень, можна запровадити коефіцієнт пріоритетності певного маршруту доставки K_j [20,21], відповідно, для сукупності всіх маршрутів транспортно-логістичної системи

підприємства $\sum_{j=1}^{j=m} K_j = 1$ [22,23]. В такій постановці завдання цільова функція має вигляд:

$$\sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=m} x_{ij} K_j \rightarrow \max \quad (1)$$

Спостерігається обмеження по кількості ВТЗ (автопоїздів):

$$\sum_{i=1}^{i=n} \frac{x_{ij}}{\text{Пр}_{ij}} \leq N_i, \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

де N_i – кількість ВТЗ i -го типу.

При цьому необхідне дотримання встановленого співвідношення обсягів перевезень між маршрутами [24,25]:

$$\frac{\sum_{j=1}^{j=m} x_{ij}}{\sum_{j=1}^{j=m} \sum_{i=1}^{i=n} x_{ij}} = V_j, \quad j = \overline{1, m}, \quad (3)$$

де V_j – відношення обсягів перевезень за формою маршруту до загального обсягу доставки вантажів.

Не зважаючи на зазначене, не надано обґрунтування критеріїв і моделей вибору ВТЗ (автопоїздів) для перевезення готової продукції підприємств з урахуванням питань безпеки в процесах вантажних перевезень.

Постановка завдання. Метою даної роботи є обґрунтування критеріїв і моделей вибору великовагових транспортних засобів для ефективних і безпечних перевезення готової продукції підприємства з врахуванням перевантажень та варіантів розміщення вантажів.

Для реалізації поставленої мети в роботі розв'язувались наступні завдання:

1. Обґрунтувати сукупність технічних, організаційних та економічних (ринкових) оціночних критеріїв для формування вихідної множини альтернативних варіантів великовагових транспортних засобів ефективності перевезень.

2. Виявити можливі варіанти використання з урахуванням граничних навантажень на вісь та повної ваги великовагових транспортних засобів.

3. Оцінити та проаналізувати розміри шкоди від перевищення допустимих осьових навантажень та від перевищення значень допустимої маси, оціночні критерії вибору великовагових транспортних засобів з метою оцінки ефективності перевезень готової продукції підприємства.

Виклад основного матеріалу. Основні етапи вирішення проблеми вибору ВТЗ для ефективного та безпечного транспортування готової продукції підприємства полягають у наступному:

Етап 1. Формування вихідної множини альтернативних варіантів ВТЗ та сукупності критеріїв для оцінки ефективності перевезення готової продукції підприємства;

Етап 2. Формування структури переваг оціночних критеріїв для певного типу ВТЗ перевезення готової продукції підприємства з урахуванням навантаження на вісь ВТЗ і безпеки перевезень;

Етап 3. Формування впорядкованої множини ВТЗ для перевезення готової продукції підприємства з оцінкою заподіяної шкоди при перевищенні допустимого навантаження на вісь та перевищення маси в цілому.

У рамках першого етапу вибір ВТЗ відбувався на підставі наступних груп критеріїв:

Група 1. Технічні особливості рухомого складу та вагових параметрів ВТЗ (технічні критерії):

- 1.1 Вантажопідйомність автомобіля, т (ТКр₁);
- 1.2 Споряджена маса автомобіля, т (ТКр₂);
- 1.3 Повна маса автопоїзда, т (ТКр₃);
- 1.4 Довжина автомобіля, м (ТКр₄);
- 1.5 Ширина автомобіля, м (ТКр₅);
- 1.6 Висота автомобіля, м (ТКр₆);
- 1.7 Об'єм кузова автомобіля, м³ (ТКр₇);
- 1.8 Номінальна потужність двигуна автомобіля, кВт (ТКр₈);
- 1.9 Максимальна швидкість автомобіля, км/год (ТКр₉);
- 1.10 Витрати палива, л/100 км (ТКр₁₀);
- 1.11 Об'єм двигуна автомобіля, л (ТКр₁₁);
- 1.12 Потужність двигуна автомобіля, кВт (ТКр₁₂);
- 1.13 Шини, дюйми (ТКр₁₃);
- 1.14 Об'єм паливного бака автомобіля, л (ТКр₁₄);
- 1.15 Радіус розвороту, м (ТКр₁₅).

Група 2. Розташування вантажу в кузові, збереження вантажу при транспортуванні, безпеки вантажно-розвантажувальних операцій (організаційні критерії):

- 2.1 Час у наряді за добу, год (ОКр₁);
- 2.2 Число робочих днів на рік, дні (ОКр₂);
- 2.3 Число днів у капітальному ремонті, дні (ОКр₃);
- 2.4 Ресурс до капітального ремонту, тис. км (ОКр₄);
- 2.5 Коефіцієнт ТОіР, К, чол.·год/1000 км (ОКр₅);
- 2.6 Простої з організаційних причин, дні (ОКр₆);
- 2.7 Кількість ремонтних робітників, чол. (ОКр₇);
- 2.8 Кількість механіків у гаражі, чол. (ОКр₈).

Система обмежень за цією групою оціночних критеріїв полягає в наступному: дотримання допустимих осьових навантажень за максимального корисного

навантаження ВТЗ; відповідальність відправника вантажу за збереження вантажу при транспортуванні; оптимізація часу вантажно-розвантажувальних операцій.

Група 3. Поєднання потенційних технічних та технологічних інтересів з можливостями ринку автотранспортних послуг (економічні (ринкові) критерії).

- 3.1 Термін служби автомобіля, років;
- 3.2 Темп зростання експлуатаційних витрат на ТОіР на рік, % (РКр₁);
- 3.3 Тарифна ставка ремонтників, грн./год (РКр₂);
- 3.4 Коефіцієнт накладних витрат (РКр₃);
- 3.5 Коефіцієнт витрат за запасні частини (РКр₄);
- 3.6 Вартість шини, тис. грн. (РКр₅);
- 3.7 Ціна автопоїзда, млн. грн. (РКр₆);
- 3.8 Частка залишкової вартості ціни після 8 років експлуатації, % (РКр₇).

На другому етапі кожна комплектація рухомого складу аналізувалась з дотриманням вагових параметрів у порожньому стані, при рівномірному (розташування центру тяжіння посередині вантажного відсіку) завантаженні до повної маси, при завантаженні до повної маси зі зміщенням центру тяжіння та при весняно-осінніх обмеженнях: 6 т на одну вісь, 10 т на групу з двох осей, 12 т на групу з трьох осей, 16 т на групу з чотирьох осей.

Найпопулярніший (поширений) тип ВТЗ є сідельний автопоїзд, у складі тягача з колісною формулою 4X2 (двохосний з двосхилим ошиновуванням) і тривісного шторного напівпричепа. Оптимальний варіант причіпного рухомого складу - стандартний шторний напівпричіп власною масою не більше 6500 кг у складі з двовісним сідельним тягачем і 6800 кг з сідельним тривісним тягачем.

Переваги шторної комплектації перед бортовим варіантом тенту полягає в тому, що даний варіант легше на 300..350 кг, немає необхідності відкривати і закривати борти, отже, швидше можливо здійснити навантаження і розвантаження, спрощена система кріплення стяжними пасками. Алюмінієві борти сучасних напівпричепів не можуть бути засобом кріплення, оскільки при перевищенні навантаження висока ймовірність його деформації і, отже, виникнення додаткових витрат на ремонт та обслуговування ВТЗ.

Переваги шторної комплектації перед відкритим бортовим варіантом полягають у тому, що вантаж захищений від опадів, питома навантаження (на один погонний метр) на раму/підлогу шторного напівпричепа дещо вище, тому що частина навантаження забирає на себе надбудову. Переваги шторної комплектації перед фургоном/рефрижератором полягають у тому, що вона легша на 800...1000 кг і є можливість завантаження збоку відразу 2 м'які контейнери (МКР).

При перевезенні готової продукції підприємства в МКР масою в 1т і номінальною площею 1,0x1,0 м² можна досягти максимального корисного навантаження за рахунок точного розташування і оптимального кріплення вантажу.

Для вибору ВТЗ були розглянуті технічні особливості рухомого складу та розташування вантажу в кузові під час контейнерного перевезення для наступних варіантів комплектацій (табл. 1).

Крім того, у роботі були розглянуті різні варіанти використання автопоїздів при перевезенні готової продукції підприємства. У транспортно-логістичній системі підприємства має низку значних переваг, таких як: більший обсяг перевезення за один рейс; можливість різного рівня ремонту, технічного обслуговування чи заміни лише однієї частини автопоїзда; менші окремі статті експлуатаційних витрат порівняно з одиночними ВТЗ.

Варіант 1. П'ятивісний автопоїзд (табл. 1) у складі двовісного сідельного тягача з

колісною формулою 4x2 та тривісного напівпричепа ("єврофура").

Даний вид транспортного пропонується використовувати як один із основних, виходячи з описаних критеріїв вибору рухомого складу.

Внутрішні розміри напівпричепа: тент 13,62 м x 2,47 м x 2,67-2,71 м, допустиме осьове навантаження навантажувача на підлогу 5,4 або 7,1 т; рефрижератор 13,31 м x 2,46 м x 2,6 м, допустиме осьове навантаження навантажувача на підлогу 7 т.

Таблиця 1 – Вихідна множина можливих варіантів використання великоваговими транспортних засобів для перевезення готової продукції підприємства

| № п/п | Тип ТЗ | Мінімально граничне навантаження на вісь при повному завантаженні ТЗ, т | Повна вага ТЗ при повному завантаженні, т |
|-------|--|---|---|
| 1 | П'ятивісний автопоїзд в складі двохвісного сидельного тягача з колісною формулою 4x2 і трьохвісного причепа (єврофура)(ТЗ ₁) | 10 | 40 |
| 2 | П'ятивісний автопоїзд в складі двохвісного сидельного тягача з рефрижератором і трьохколісного причепа (ТЗ ₂) | 10 | 40 |
| 3 | Шеститивісний автопоїзд в складі двохвісного сидельного тягача і трьохколісного причепа (ТЗ ₃) | 10 | 44 |
| 4 | Шеститивісний автопоїзд в складі двохвісного сидельного тягача і чотирьохколісного причепа (ТЗ ₄) | 10 | 44 |
| 5 | Одинична 2-х вісна вантажівка 4x2 (ТЗ ₅) | 10 | 18 |
| 6 | Одинична 3-х вісна вантажівка 6x2 (ТЗ ₆) | 15 на 2 осі | 25 |
| 7 | Одиночний самоскид з колісною формулою 8x4 (ТЗ ₇) | 16 на 2 осі | 32 |
| 8 | Самоскидний автопоїзд в складі трьохвісного сидельного тягача з колісною формулою 6x2 і трьохвісного напівпричепа (ТЗ ₈) | 36,5 на три осі | 44 |
| 9 | Самоскидний автопоїзд в складі двохвісного сидельного тягача з колісною формулою 4x2 і трьохвісного напівпричепа (ТЗ ₉) | 18 | 40 |

Джерело: розроблено авторами

Для розрахунку взято автопоїзд власною масою 15338 кг з допустимою повною масою для п'ятивісного автопоїзда в Україні 40 000 кг. Корисне навантаження може становити 24642 кг (рис. 1).

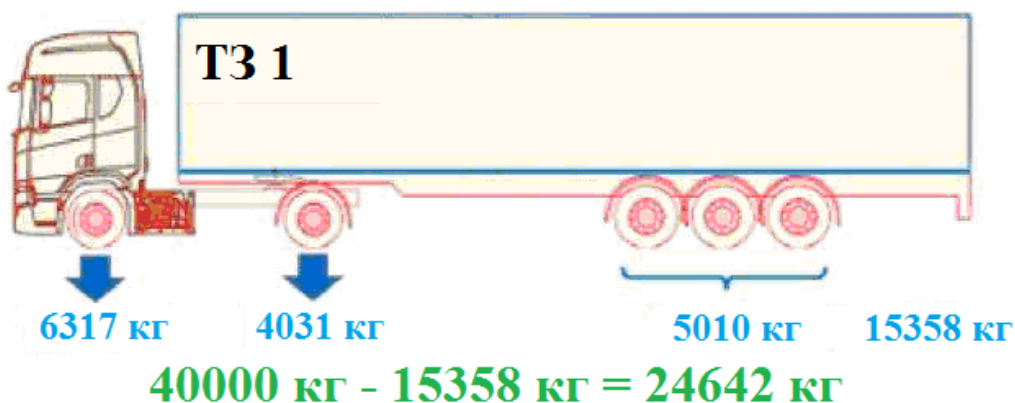


Рисунок 1 – Загальний вид автопоїзда власною масою 15338 кг з допустимою повною масою для п'ятивісного автопоїзда 40 000 кг та корисним навантаженням 24642кг

Джерело: розроблено авторами з використанням [15,26]

При цьому при рівномірному завантаженні даного автопоїзда до максимальної повної маси з розташуванням центру ваги посередині напівпричепи отримуємо перевантаження провідною віссю тягача (рис. 2).



Рисунок 2 – Варіант рівномірного завантаження автопоїзда до максимальної повної маси з розташуванням центру ваги посередині напівпричепи

Джерело: розроблено авторами з використанням [15,26]

При завантаженні з розташуванням центру тяжиння посередині без перевищення осьових навантажень максимальне корисне навантаження не повинно перевищувати 21900 кг (рис. 3).

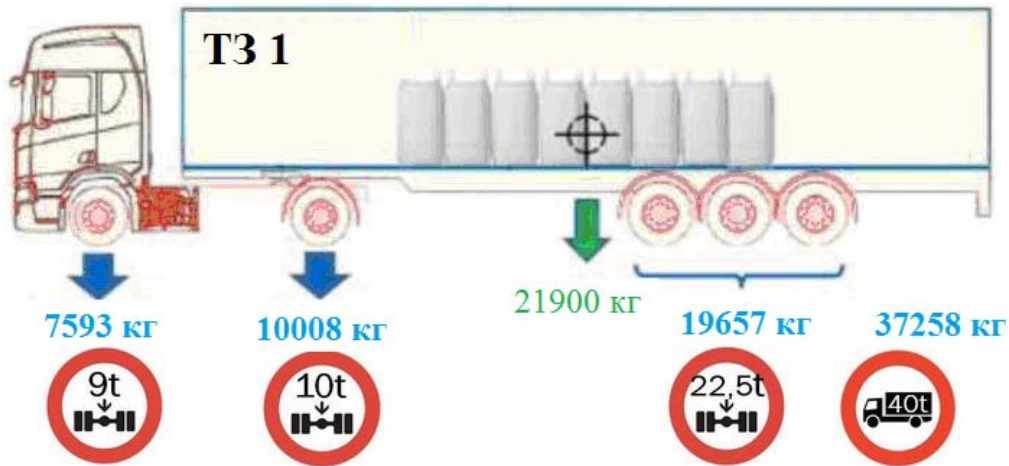


Рисунок 3 – Завантаження автопоїзда з розташуванням центру тяжіння посередині без перевищення осьових навантажень

Джерело: розроблено авторами з використанням [15,26]

Основною проблемою дотримання осьових навантажень даного виду автопоїзда є перевантаження провідної осі тягача при недовантаженій групі осей. Розставивши вантаж так, щоб центр ваги зрушив назад, можемо занурити 24 000 кг або 24 м'яких контейнерів (МКР) (рис. 4).

Було розглянуто два варіанти розміщення МКР: варіант 1 - розміщення 21 МКР; варіант 2 – розміщення 24 МКР.

Варіант 1 розміщення 21 МКР (спосіб 1). У цьому варіанті перші три ряди розставляються по 1 МКР без відстані між передньою стінкою та між собою. Далі слідує 9 рядів по два МКР у кожному. При цьому варіанті розміщення відбувається перевантаження по провідній осі тягача. Таким чином, такий спосіб розміщення МКР не допустимий (рис.5).

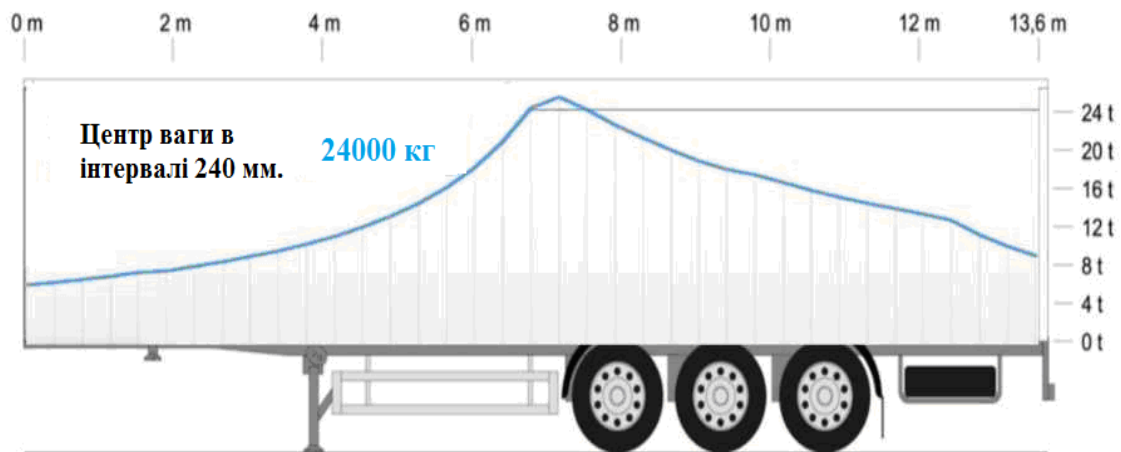


Рисунок 4 – Діаграма позиціонування центру ваги автопоїзда при максимальному завантаженню

Джерело: розроблено авторами

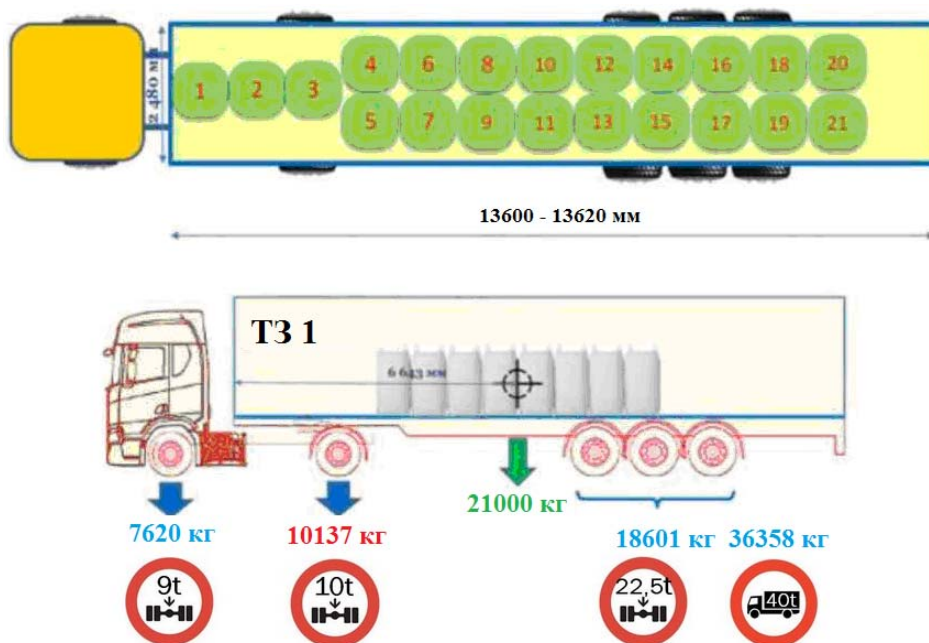


Рисунок 5 – Варіант розміщення в автопоїзді 21 м'яких контейнерів (спосіб 1)

Джерело: розроблено авторами з використанням [15,26]

Варіант 1 розміщення 21 МКР (спосіб 2) (рис. 6). У цьому варіанті перші чотири ряди розставляються по 1 МКР без відстані між передньою стінкою та між собою. Далі слідує 8 рядів по два МКР у кожному і ще один ряд по 1 МКР. При цьому варіанті розміщення перевантаження по осях немає. Необхідно використовувати цей варіант розміщення МКР (рис. 6).

Варіант 1 розміщення 24 МКР (рис. 7). У цьому варіанті перші два ряди розставляються по 1 МКР без відстані між передньою стінкою та між собою. Якщо решта 11 рядів стануть рівно в 11 м, то відстань від передньої стінки до 3-го ряду має бути не менше 2,1 м. Інакше буде перевантаження по провідній осі тягача. 24 МКР увійде, якщо в середньому в довжину кожен МКР не перевищуватиме 1,04 м.

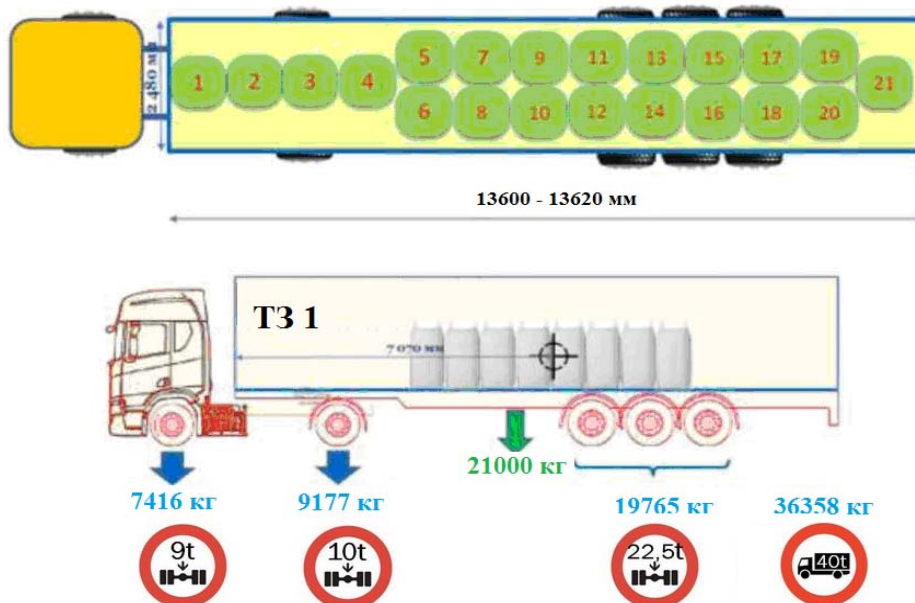


Рисунок 6 – Варіант розміщення в автопоїзді 21 м'яких контейнерів (спосіб 2)

Джерело: розроблено авторами з використанням [15,26]

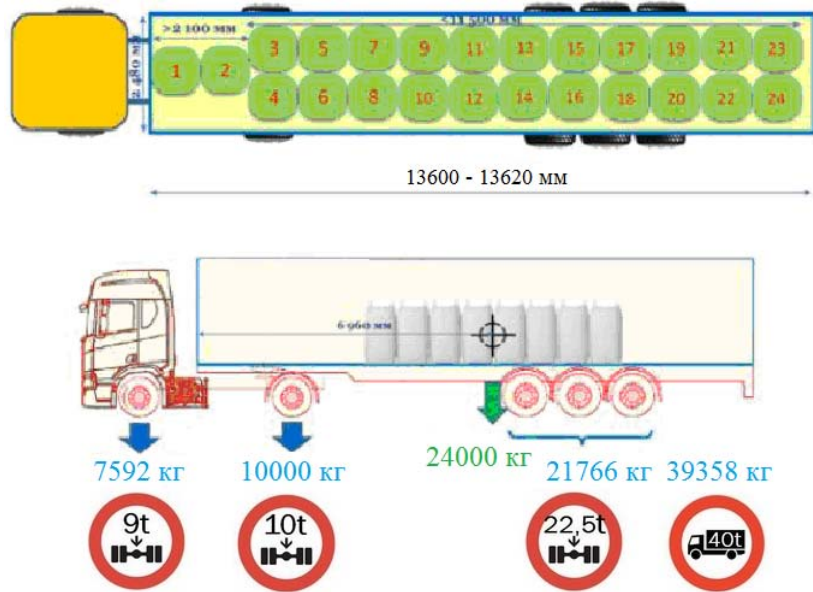


Рисунок 7 – Варіант розміщення в автопоїзді 24 м'яких контейнерів

Джерело: розроблено авторами з використанням [15,26]

Варіант 2 (табл. 1). П'ятівісний автопоїзд у складі двовісного сидельного тягача з рефрижератором та напівпричепа тривісного

Спосіб 1. У цьому способі перші три ряди розставляються по 1 МКР без відстані між передньою стінкою та між собою. Далі слідує 9 рядів по два МКР у кожному. Місткість складає 21 м'який контейнер (МКР). При цьому варіанті розміщення відбувається перевантаження по провідній осі тягача. Таким чином, такий спосіб розміщення МКР не допустимий.

Спосіб 2. У цьому способі перші чотири ряди розставляються по 1 МКР без відстані між передньою стінкою та між собою. Далі слідує 8 рядів по два МКР у кожному і ще один ряд по 1 МКР. Місткість складає 21 МКР. При цьому варіанті розміщення перевантаження по осях немає. Необхідно використовувати цей варіант розміщення МКР (рис. 8).

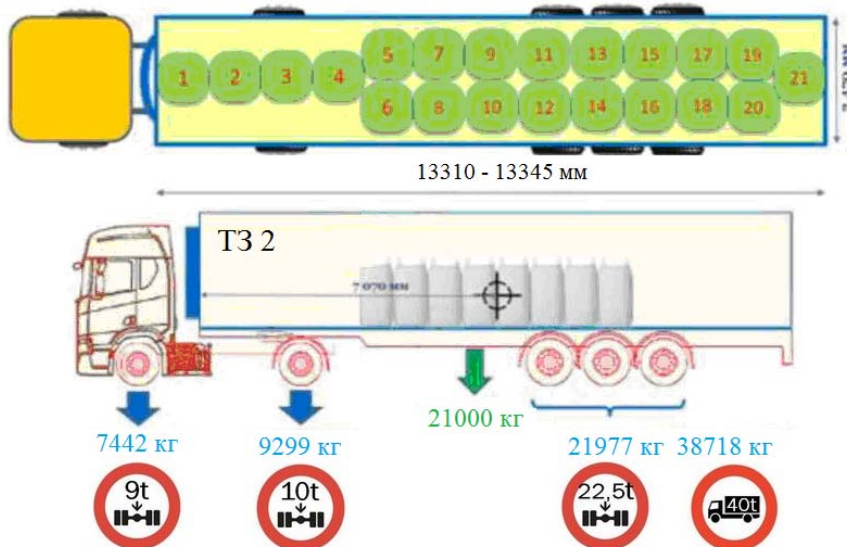


Рисунок 8 – Розстановка 21 МКР (спосіб 2) у двовісному сидельному тягачі з рефрижератором та тривісним напівприцепом

Джерело: розроблено авторами з використанням [15,26]

Варіант 9 (табл.1). Самоскидний автопоїзд у складі двовісного сідельного тягача з колісною формулою 4x2 та тривісного напівпричепа

У даного типу автопоїзда рульова вісь та ведуча вісь з подвійною ошиновкою, а об'єм кузова становить 34 м³. Це один із найбільших кузовів, що застосовуються на території України ("Тонар"), і один із найлегших.

При задньому положенні зчіпного шворня потенційне корисне навантаження становить 22352кг. При рівномірному завантаженні 22352кг до дозволеної повної маси 40000 кг відбувається перевантаження по провідній осі тягача. Передбачувано змістити центр тяжкості сипучого вантажу майже неможливо (рис. 9).

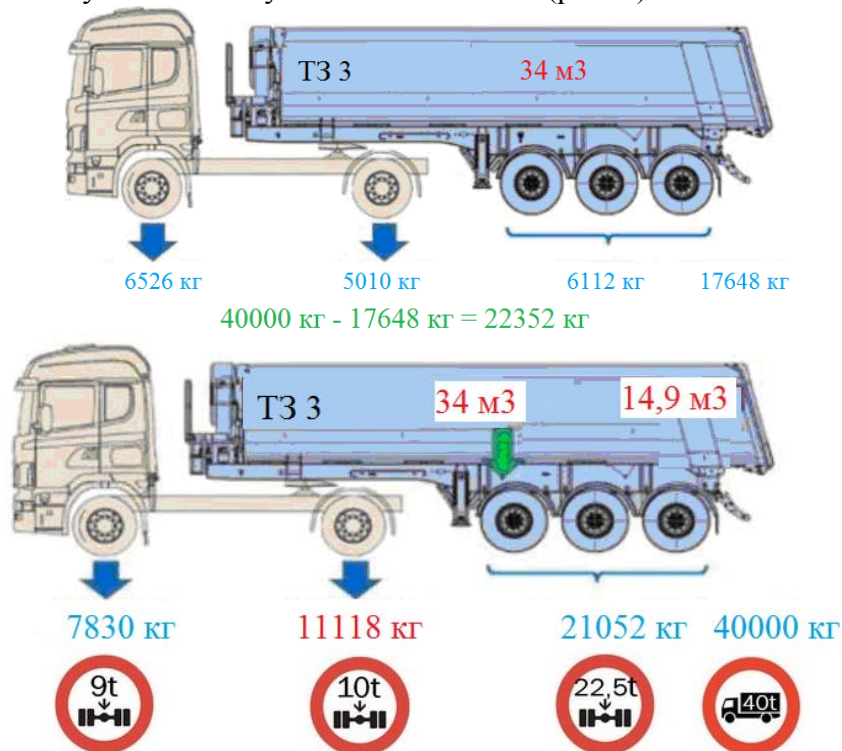


Рисунок 9 – Перевантаження по провідній осі тягача при рівномірному завантаженні 22352 кг до дозволеної повної маси 40000 кг

Джерело: розроблено авторами з використанням [15,26]

Без перевантаження по вісях у цю комбінацію можна завантажити 18259 кг (рис.10).

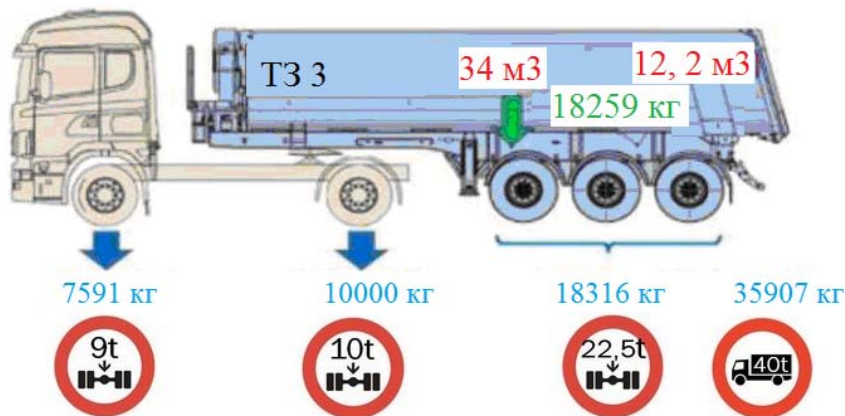


Рисунок 10 – Завантаження автопоїзда 18259 кг без перевантаження

Джерело: розроблено авторами з використанням [15,26]

При завантаженні 35000 кг виникає перевантаження, у тому числі технічний, по провідній осі тягача та групі осей причіпних (рис. 11).

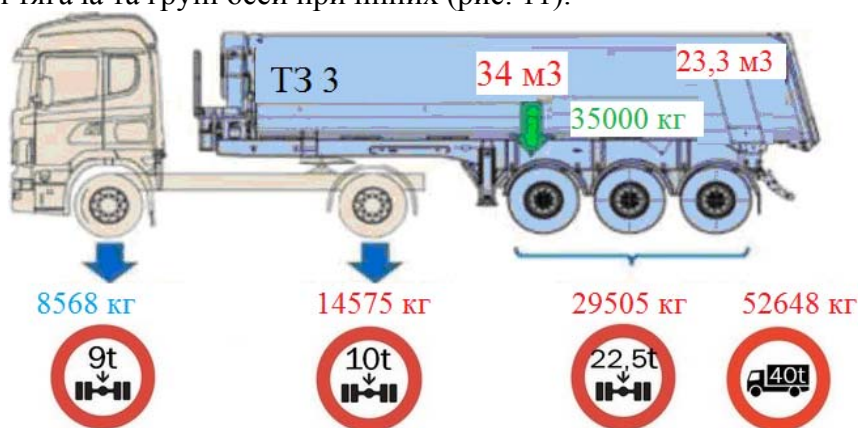


Рисунок 11 – Виникнення перевантаження, у тому числі технічного, по провідній осі тягача та групі осей причіпних при завантаженні 35000 кг

Джерело: розроблено авторами з використанням [15,26]

При завантаженні повного кузова 34м³ виникає перевантаження, у тому числі технічне, за всіма параметрами, що пов'язане з виникненням ризикових ситуацій: вибухи коліс від перегріву; відмова гальмівної системи; погана стабілізація під час руху автопоїзда (рис. 12).

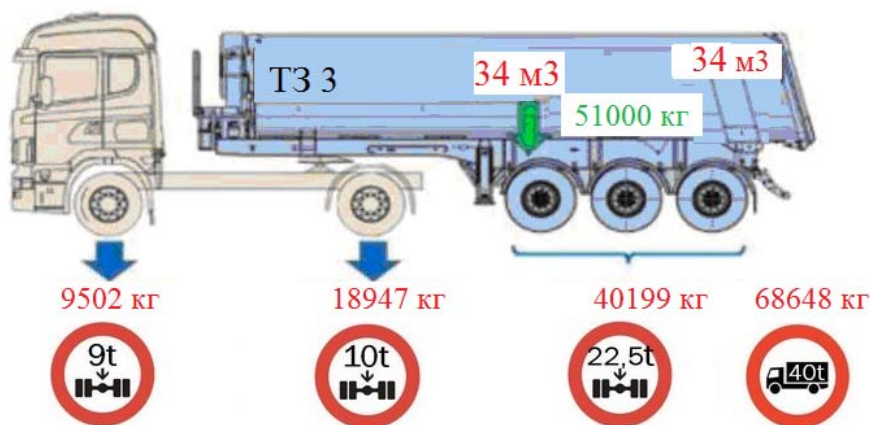


Рисунок 12 – Виникнення перевантаження, у тому числі технічного по всьому параметру при завантаженні повного кузова 34м³

Джерело: розроблено авторами з використанням [15,26]

При задньому положенні зчіпного шворня потенційне корисне навантаження ВТЗ становить 22352 кг. При рівномірному завантаженні продукцією масою 22352 кг до дозволеної повної маси 40000 кг відбувається перевантаження по групі причіпних осей на межі допустимих 2% (рис.13).

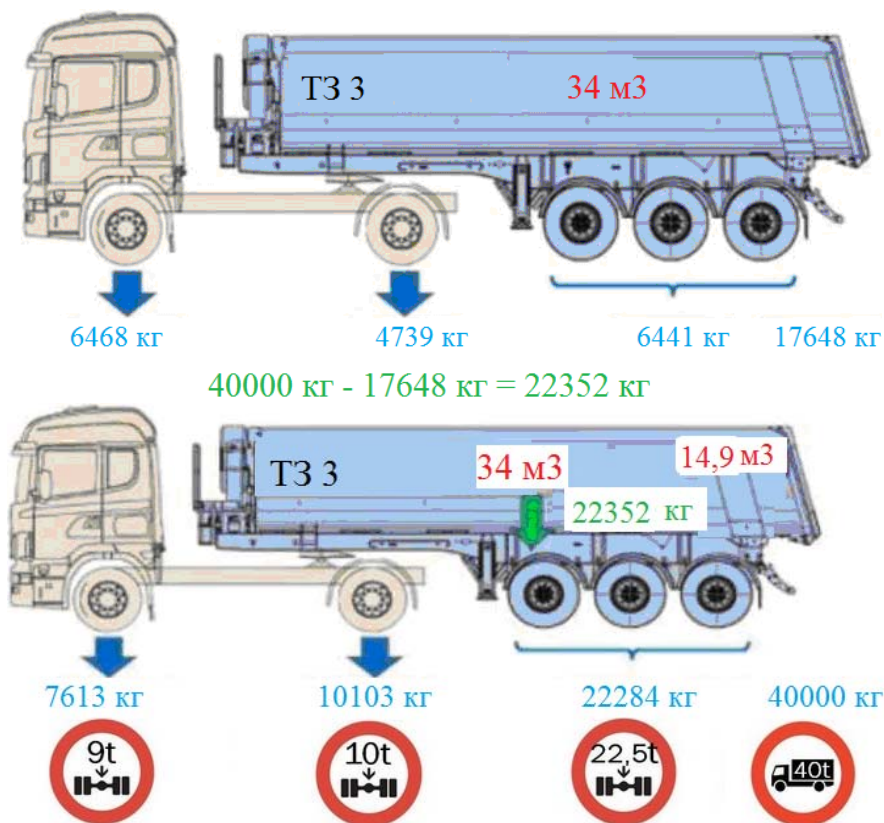


Рисунок 13 – Перевантаження групою причіпних осей на межі допустимих 2% при рівномірному завантаженні 22352кг до дозволеної повної маси в 40000кг

Джерело: розроблено авторами з використанням [15,26]

При завантаженні продукції масою 35000кг виникає перевантаження, зокрема і технічне, як у провідній осі тягача (невеликий, припустимий 13т), і більш істотний за групою причіпних осей (рис.14).

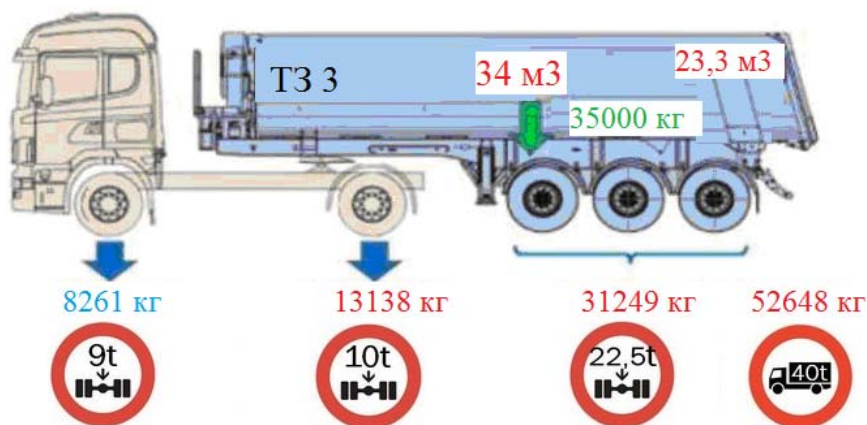


Рисунок 14 – Виникнення перевантаження, у тому числі технічного, по провідній осі тягача (невеликий, допустимий 13 т) і більш істотного за групою причіпних осей при завантаженні 35 000 кг

Джерело: розроблено авторами з використанням [15,26]

На третьому етапі проведені дослідження дозволили визначити розміри шкоди

при перевищенні значних допустимих осьових перевантажень на одну вісь і шкоди при перевищенні значень допустимої маси на кожні 100 кілометрів перевезення вантажів для кожного варіанта у ВТЗ.

Аналіз отриманих значень розмірів шкоди від перевищення допустимих осьових навантажень та від перевищення значень допустимої маси ВТЗ дозволив отримати регресійні рівняння взаємозв'язків цих показників для різних видів ВТЗ (табл.2, рис.15, рис. 16).

Таблиця 2 – Аналіз залежностей розмірів шкоди (РШ) від перевищення допустимих осьових навантажень $РШ=f_1$ (Пвісь) та від перевищення значень допустимої маси великовагового транспортного засобу $РШ=f_2$ (Пдм)

| Транспортний засіб | Вид регресивної залежності, коефіцієнт кореляції | |
|--------------------|--|---------------------------------------|
| | $РШ = f_1(\text{Пвісь}), R^2$ | $РШ = f_2(\text{Пдм}), R^2$ |
| Т31 | $РШ=127,2(\text{Пвісь})+3378, R^2=0,65$ | $РШ=27,78(\text{Пдм})+2389, R^2=0,63$ |
| Т32 | $РШ=178,38(\text{Пвісь})+4054, R^2=0,66$ | $РШ=28,88(\text{Пдм})+3000, R^2=0,69$ |
| Т33 | $РШ=256,2(\text{Пвісь})+4729, R^2=0,81$ | $РШ=36,66(\text{Пдм})+1778, R^2=0,72$ |
| Т34 | $РШ=289,18(\text{Пвісь})+5541, R^2=0,75$ | $РШ=37,03(\text{Пдм})+3222, R^2=0,83$ |
| Т35 | $РШ=75,68(\text{Пвісь})+2432, R^2=0,79$ | $РШ=37,78(\text{Пдм})+278, R^2=0,80$ |
| Т36 | $РШ=45,94(\text{Пвісь})+405, R^2=0,67$ | $РШ=32,22(\text{Пдм})+778, R^2=0,68$ |
| Т37 | $РШ=56,76(\text{Пвісь})+1486, R^2=0,74$ | $РШ=35,54(\text{Пдм})+1667, R^2=0,76$ |
| Т38 | $РШ=345,96(\text{Пвісь})+6486, R^2=0,83$ | $РШ=45,37(\text{Пдм})+3472, R^2=0,82$ |
| Т39 | $РШ=447,3(\text{Пвісь})+6973, R^2=0,71$ | $РШ=22,78(\text{Пдм})+2778, R^2=0,78$ |

Джерело: розроблено авторами

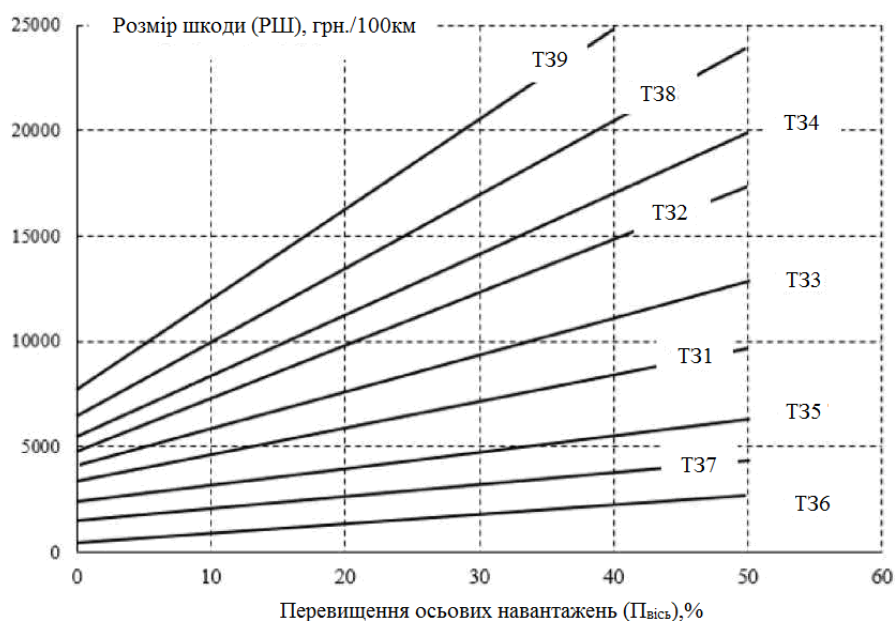


Рисунок 15 – Залежність розміру шкоди (РШ) (грн. на 100 км) від перевищень осьових перевантажень (П вісь), %

Джерело: розроблено авторами

Розроблений механізм, що базується на результатах моделювання розв'язання задачі вибору ВТЗ за їх технічною готовністю (технічні критерії), організаційної забезпеченості (організаційні критерії) та економічної ефективності (ринкові), (економічні критерії) (табл.3) дозволив здійснити ранжування (шарове впорядкування) ВТЗ для ефективного перевезення готової продукції підприємства (рис. 17).

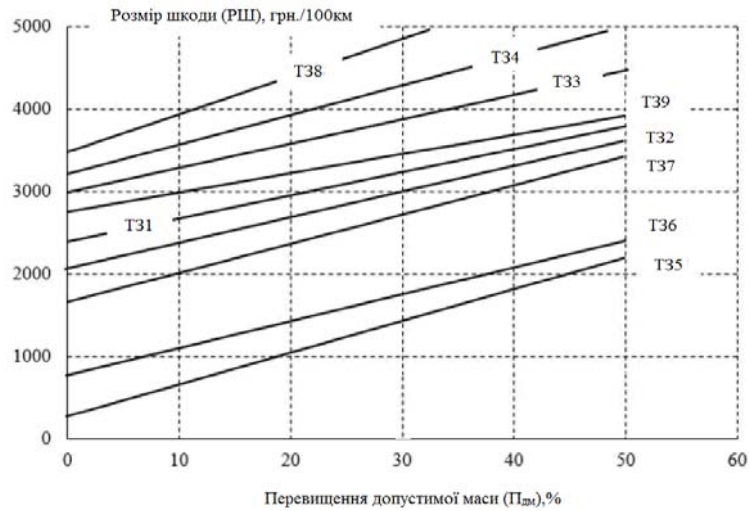


Рисунок 16 – Залежність розміру шкоди (РШ) (грн. на 100 км) від певщення значень допустимої маси транспортного засобу (Пдм), %

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 3 – Формування сукупності оціночних критеріїв (технічні, організаційні, економічні) з метою оцінки ефективності перевезення готової продукції підприємства

| № | Назва | T3 1 | T3 2 | T3 3 | T3 4 | T3 5 | T3 6 | T3 7 | T3 8 | T3 9 |
|-------------------|------------------------------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| Технічні критерії | | | | | | | | | | |
| 1 | Вантажопідйомність тягача, т | 10,6 | 10,6 | 17,16 | 29,4 | 3,7 | 14,5 | 32,57 | 17,16 | 10,6 |
| 2 | Споряджена маса тягача, т | 7,9 | 7,9 | 8,84 | 7,9 | 3 | 18 | 16,43 | 7,6 | 7,6 |
| 3 | Повна маса автопоїзду, т | 44 | 39 | 44 | 44 | 6,7 | 26 | 49 | 39 | 39 |
| 4 | Довжина м | 13,62 | 13,62 | 13,62 | 13,62 | 6,51 | 10,6 | 9,23 | 9,97 | 9,97 |
| 5 | Ширина, м | 2,48 | 2,48 | 2,48 | 2,48 | 23 | 2,5 | 2,55 | 2,55 | 2,55 |
| 6 | Висота, м | 2,7 | 2,7 | 2,45 | 2,7 | 3,16 | 3,8 | 3,37 | 3,325 | 3,325 |
| 7 | Об'єм кузова, м ³ | 82 | 84 | 52 | 92 | 20,2 | 48,3 | 20 | 30 | 30 |
| 8 | Номинальна потужність двигуна, кВт | 315 | 315 | 295 | 315 | 97,8 | 295 | 287 | 295 | 315 |
| 9 | Максимальна швидкість, км/ч | 110 | 110 | 90 | 110 | 70 | 100 | 90 | 90 | 110 |
| 10 | Витрата палива, л/100 км | 33 | 33 | 33 | 33 | 15 | 25 | 37 | 33 | 33 |
| 11 | Об'єм двигуна, л | 12 | 12 | 12 | 12 | 2,8 | 12 | 8,9 | 12 | 12 |
| 12 | Потужність двигуна, к.с. | 428 | 428 | 401 | 428 | 133 | 401 | 390 | 401 | 428 |
| 13 | Шини | 315/60 R 22,5 | 385/65 R22,5 | 315/70 R 22,5 | 385/65 R 22,5 | 315/60 R 22,5 | 315/80 R 22,5 | 315/60 R 22,5 | 385/65 R22,5 | 385/65 R22,5 |
| 14 | Об'єм паливного баку, л | 2x 400 | 2x 400 | 500 | 2x 400 | 125 | 450 | 310 | 500 | 2x 400 |

Продовження таблиці 3

| | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|---|----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------------|------------------|------------------|
| 15 | Радіус розвороту, м | 22,5 | 22,5 | 8 | 22,5 | 6,2 | 11,5 | 11,5 | 9 | 15 |
| Організаційні критерії | | | | | | | | | | |
| 1 | Час в наряді за добу, год | 16 | | | | | | | | |
| 2 | Число робочих днів за рік, дні | 252 | 270 | 290 | 300 | 240 | 250 | 260 | 252 | 252 |
| 3 | Число днів в капітальному ремонті, дні | 10 | 12 | 15 | 13 | 14 | 10 | 11 | 13 | 15 |
| 4 | Ресурс до капітального ремонту, тис. км | $1 \cdot 10^6$ | $0,8 \cdot 10^6$ | $1,1 \cdot 10^6$ | $1,3 \cdot 10^6$ | $0,9 \cdot 10^6$ | $1,2 \cdot 10^6$ | $1 \cdot 10^6$ | $1,4 \cdot 10^6$ | $1,1 \cdot 10^6$ |
| 5 | Коефіцієнт ТОіР, К, люд.·год/1000 км | 9 | 12 | 7 | 8 | 13 | 11 | 10 | 8 | 9 |
| 6 | Простої по організаційним причинам, дні | 6 | 3 | 5 | 4 | 12 | 8 | 15 | 11 | 9 |
| 7 | Кількість ремонтних робочих, чол. | 10 | 9 | 12 | 11 | 8 | 6 | 8 | 12 | 10 |
| 8 | Кількість механіків у гаражі, чол. | 6 | 5 | 4 | 7 | 8 | 12 | 11 | 7 | 6 |
| Економічні (ринкові) критерії | | | | | | | | | | |
| 1 | Термін служби тягача, років | 8 | 10 | 8 | 12 | 10 | 8 | 10 | 8 | 8 |
| 2 | Темп зростання експлуатаційних витрат на ТОР в рік, % | 0,02 | 0,05 | 0,03 | 0,04 | 0,02 | 0,09 | 0,01 | 0,06 | 0,08 |
| 3 | Тарифна ставка ремонтників, грн./год | 100 | 150 | 210 | 180 | 100 | 120 | 110 | 130 | 150 |
| 4 | Коефіцієнт накладних витрат | 1,8 | 1,6 | 1,2 | 1,5 | 1,7 | 1,9 | 2,1 | 1,3 | 1,7 |
| 5 | Коефіцієнт витрат на запасні частини | 2,0 | 2,2 | 2,5 | 2,9 | 2,0 | 2,5 | 2,7 | 2,8 | 2,3 |
| 6 | Вартість шини, тис. грн. | 34 | 46 | 50 | 46 | 11 | 55 | 46 | 46 | 46 |
| 7 | Вартість автопоїзда, млн. грн. | 15,75 | 12,10 | 14,35 | 14,60 | 4,26 | 8,10 | 7,77 | 11,87 | 13,27 |
| 8 | Частка остаточної вартості від ціни після 8 років, % | 10 | 12 | 15 | 12 | 13 | 10 | 15 | 11 | 10 |

Джерело: розроблено авторами



Рисунок 17 – Впорядкування великовагових транспортних засобів для перевезення готової продукції підприємства ЗАТ "Кіровоградграніт"

Джерело: розроблено авторами

Результатом вирішення завдання вибору на основі сформованої сукупності оціночних критеріїв та визначення розмірів шкоди від перевищення допустимих осьових навантажень та від перевищення значень допустимої маси вантажівки, як пріоритетні ВТЗ для перевезення готової продукції підприємства були визначені наступні варіанти:

- п'ятивісний автопоїзд у складі двохвісного седельного тягача з колісною формулою 4x2 та трьохвісного напівпричепа ("єврофура") (ТЗ2);
- шестивісний автопоїзд у складі трьохвісного седельного тягача та трьохвісного напівпричепа (ТЗ3);
- самоскидний автопоїзд у складі двохвісного седельного тягача з колісною формулою 4x2 та трьохвісного напівпричепа (ТЗ9).

Висновки:

1. Запропоновано три групи критеріїв для вибору можливих варіантів великовагових транспортних засобів для перевезення готової продукції підприємства: технічні, організаційні, економічні (ринкові).
2. Побудована вихідна множина можливих варіантів використання великовагових транспортних засобів для перевезення готової продукції підприємства із зазначенням граничного навантаження на вісь при повному завантаженні транспортного засобу та його повна вага.
3. Визначено варіанти та способи розміщення вантажу в кузові великовагових транспортних засобів (автопоїзду), навантаження на вісі та дано оцінку щодо допустимості їх для безпечності перевезень вантажів, зафіксовано факти перевантаження по ведучим осям та групі осей причіпних при повному завантаженні автопоїзду.
4. Проведені дослідження розмірів шкоди при перевищенні значень допустимих осьових перевантажень на одну вісь і шкоди при перевищенні значень допустимої маси на кожні 100 кілометрів перевезень вантажів для кожного варіанту великовагових транспортних засобів. За результатами досліджень побудовані регресійні залежності можливих транспортних засобів від перевищення допустимих осьових навантажень та від перевантаження значень допустимої маси транспортного засобу.
5. Сформульована сукупність оціночних критеріїв (технічні, організаційні, економічні (ринкові)) з метою оцінки ефективності перевезення готової продукції

підприємства великоваговими транспортними засобами. На основі цього здійснюється впорядкування великовагових транспортних засобів для перевезення продукції підприємства ЗАТ "Кіровоградграніт" та з дев'яти можливих варіантів запропоновано три найбільш ефективні варіанти.

Список літератури

1. Міністерство Інфраструктури України. Про затвердження Вимог до перевірки конструкції та технічного стану колісного транспортного засобу, методів такої перевірки: наказ від 26.11.2012 № 710.
2. Закон України "Про дорожній рух" (стаття 35).
3. Закон України "Про автомобільний транспорт".
4. Про єдині вимоги до конструкції та технічного стану колісних транспортних засобів, що експлуатуються: постанова Кабінету Міністрів України від 22.12.2010 № 1166.
5. Про затвердження Порядку проведення обов'язкового технічного контролю та обсягів перевірки технічного стану транспортних засобів, технічного опису та зразка протоколу перевірки технічного стану транспортного засобу: постанова Кабінету Міністрів України від 30.01.2012 № 137.
6. Про внесення змін до деяких постанов Кабінету Міністрів України: постанова Кабінету Міністрів України від 23.01.2019 № 46.
7. Про затвердження Порядку ведення реєстру суб'єктів проведення обов'язкового технічного контролю: наказ Міністерства внутрішніх справ України від 28.08.2019 № 736.
8. Вимоги до перевірки конструкції та технічного стану колісного транспортного засобу, методи такої перевірки, затв. наказом Мінінфраструктури від 26.11.2012 № 710 (у редакції наказу Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури України від 30.04.2024 № 396).
9. Редзюк, А. М., Агеев, В. Б., Мерзиевський, В. В. та ін. Обов'язковий технічний контроль колісних транспортних засобів: довідник. ДП "ДержавтотрансНДІпроект", 2013. 620 с.
10. Хаврук, В. Аналіз безпеки автотранспортних засобів і сучасного стану системи обов'язкового технічного контролю автомобільного транспорту в Україні. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Технічні науки*, 2020, Т. 31(70), № 5, с. 239-247.
11. Аулін, В. В., Гриньків, А. В., Лисенко, С. В., Головатий, А. О., Голуб, Д. В. Теоретичні і методологічні основи логістики транспортних і виробничих систем: монографія / під заг. ред. д.т.н., проф. Ауліна В. В. Кропивницький: Видав. ФОП Лисенко В. Ф., 2021. 504 с.
12. Аулін, В. В., Лисенко, С. В., Гриньків, А. В., Голуб, Д. В., Головатий, А. О. Логістика постачання транспортних і виробничих підприємств, фірм, компаній. Кропивницький: Видавець Лисенко В. Ф., 2022. 325 с.
13. Aulin, V., Lyashuk, O., Pavlenko, O., Velykodnyi, D., Hrynkiv, A., Holub, D., Lysenko, S., Vovk, Y., Dzyura, V., Sokol, M. Realization of the logistic approach in the international cargo delivery system. *Communication. Scientific Letters of the University of Zilina*, 2019, Vol. 21 (2), P. 5-14.
14. Окорочков, А. М. Удосконалення управління транспортними вантажними комплексами в транспортних вузлах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.22.01 "Транспортні системи". Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2013. 21 с.
15. Про затвердження Правил проїзду великогабаритних та великовагових транспортних засобів автомобільними дорогами, вулицями та залізничними переїздами: постанова Кабінету Міністрів України від 18.01.2001 № 30.
16. Abate, M., De Jong, G. The Optimal Shipment Size and Truck Size Choice: The Allocation of Trucks Across Hauls. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2014, Issue 59, P. 262–277.
17. Sanchez-Rodrigues, V., Piecyk, M., Mason, R., Boenders, T. The longer and heavier vehicle debate: A review of empirical evidence from Germany. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2015, Vol. 40, P. 114-131.
18. Augustyn, S., Vušanović, I., Owczarek, P., Oziębło, M. The assessment of the truck operation efficiency in safety engineering aspect. *MATEC Web of Conferences, 20th International Conference Diagnostics of Machines and Vehicles*, 2021.
19. Hallmark, S. L., Lamptey, S. Evaluation of Different Methods to Calculate Heavy-Truck VMT. Final Report, December 2004. 55 p.
20. Kügemann, M., Polatidis, H. Methodological Framework to Select Evaluation Criteria for Multi-Criteria Decision Analysis of Road Transportation Fuels and Vehicles. *Energies*, 2022, Vol. 15, P. 1-18.
21. Омельченко, О. Д., Стрелко, О. Г. Вибір виду транспорту для вантажних перевезень за критеріями прогресивності. *Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія: Транспортні системи і технології*, 2007, вип. 12, С. 146-151.

22. Аулін, В. В., & Шевченко, І. А. Новий підхід до організації та технології вантажних комплексних перевезень. Тези доповідей студентів і магістрантів на XLV наук. конф. 19 травня 2011 року. Кіровоград: КНТУ, 2011. С. 970-971.
23. Аулін В.В., Голуб Д.В., Гриньків А.В., Лисенко С.В. Методологічні і теоретичні основи забезпечення та підвищення надійності функціонування автомобільних транспортних систем: монографія під заг. ред. д.т.н., проф. Ауліна В.В. Кропивницький: Видавництво ТОВ "КОД", 2017. 370 с.
24. Аулін, В. В., Головатий, А. О., Дьяченко, В. О., & Петровський, М. Ю. Транспортно-експедиторські послуги при здійсненні збірних вантажних перевезень. *Підвищення надійності машин і обладнання* : міжнар. наук.-практ. конф., 15-17 квіт. 2020 р., м. Кропивницький : Кропивницький : ЦНТУ, 2020. С. 262-263.
25. Аулін, В. В., Голуб, Д. В., Біліченко, В. В., & Замуренко, А. С. Формування показників оцінки ефективності транспортного процесу перевезень. *Вісник машинобудування та транспорту. Вінниця* : ВНТУ, 2020. №1(11). С. 4-10.
26. Правила дорожнього руху (ПДР України) 2024.

References

1. Ministry of Infrastructure of Ukraine. (2012), November 26). Requirements for the inspection of the design and technical condition of wheeled vehicles, methods of such inspection: Order No. 710 [in Ukrainian].
2. Law of Ukraine "On Road Traffic" (Article 35) [in Ukrainian].
3. Law of Ukraine "On Motor Transport" [in Ukrainian].
4. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2010, December 22). On unified requirements for the design and technical condition of wheeled vehicles in operation: Resolution No. 1166 [in Ukrainian].
5. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2012, January 30). On approval of the procedure for mandatory technical control and scope of vehicle technical inspection: Resolution No. 137 [in Ukrainian].
6. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2019, January 23). On amendments to certain resolutions: Resolution No. 46 [in Ukrainian].
7. Ministry of Internal Affairs of Ukraine. (2019, August 28). On approval of the procedure for maintaining the register of entities conducting mandatory technical control: Order No. 736 [in Ukrainian].
8. Ministry of Infrastructure of Ukraine. (2012, November 26). Requirements for the inspection of the design and technical condition of wheeled vehicles, methods of such inspection (as amended by Order No. 396, 2024) [in Ukrainian].
9. Redziuk, A. M., Ageiev, V. B., & Merzhyevskiy, V. V. (2013). Mandatory technical control of wheeled vehicles: Handbook. DP "DerzhavotransNDIproekt" [in Ukrainian].
10. Khavruk, V. (2020). Analysis of vehicle safety and the current state of the mandatory technical control system of road transport in Ukraine. *Scientific Notes of V. I. Vernadsky Taurida National University. Technical Sciences*, 31(70)(5), P. 239-247 [in Ukrainian].
11. Aulin, V. V., Hrynykiv, A. V., Lysenko, S. V., Holovaty, A. O., & Holub, D. V. (2021). Theoretical and methodological foundations of logistics of transport and production systems: Monograph (Edited by Prof. V. V. Aulin). Kropyvnytskyi: FOP Lysenko V. F [in Ukrainian].
12. Aulin, V. V., Lysenko, S. V., Hrynykiv, A. V., Holub, D. V., & Holovaty, A. O. (2022). Logistics of supply for transport and production enterprises, firms, companies. Kropyvnytskyi: Publisher Lysenko V. F [in Ukrainian].
13. Aulin, V., Lyashuk, O., Pavlenko, O., Velykodnyi, D., Hrynkiv, A., Holub, D., Lysenko, S., Vovk, Y., Dzyura, V., & Sokol, M. (2019). Realization of the logistic approach in the international cargo delivery system. *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina*, 21(2), P 5-14 [in English].
14. Okorokov, A. M. (2013). Improvement of management of transport freight complexes in transport hubs (PhD thesis). Dnipropetrovsk: DNUZT [in Ukrainian].
15. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2001, January 18). On approval of the rules for the passage of oversized and heavy vehicles on roads, streets, and railway crossings: Resolution No. 30 [in Ukrainian].
16. Abate, M., & De Jong, G. (2014). The optimal shipment size and truck size choice: The allocation of trucks across hauls. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 59, P. 262-277 [in English].
17. Sanchez-Rodrigues, V., Piecyk, M., Mason, R., & Boenders, T. (2015). The longer and heavier vehicle debate: A review of empirical evidence from Germany. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 40, P 114-131 [in English].
18. Augustyn, S., Vušanović, I., Owczarek, P., & Oziębło, M. (2021). The assessment of truck operation efficiency in safety engineering aspect. *MATEC Web of Conferences*, 20th International Conference Diagnostics of Machines and Vehicles [in English].
19. Hallmark, S. L., & Lamptey, S. (2004). Evaluation of different methods to calculate heavy-truck VMT: Final report (December 2004) [in English].

20. Kügemann, M., & Polatidis, H. (2022). Methodological framework to select evaluation criteria for multi-criteria decision analysis of road transportation fuels and vehicles. *Energies*, 15, 1-18 [in English].
21. Omelchenko, O. D., & Strelko, O. G. (2007). Selection of transport mode for freight transport based on progressive criteria. *Scientific Proceedings of the State Economic and Technological University of Transport. Series: Transport Systems and Technologies*, 12, P.146-151 [in Ukrainian].
22. Aulin, V. V., & Shevchenko, I. A. (2011). A new approach to the organization and technology of freight complex transportation. *Proceedings of the XLV Scientific Conference of Students and Masters (May 19, 2011, Kirovohrad)* (pp. 970-971). Kirovohrad: KNTU [in Ukrainian].
23. Aulin, V. V., Holub, D. V., Hrynkyv, A. V., & Lysenko, S. V. (2017). Methodological and theoretical foundations for ensuring and improving the reliability of the functioning of automotive transport systems: Monograph (Edited by Prof. V. V. Aulin). Kropyvnytskyi: Publishing house LLC "KOD" [in Ukrainian].
24. Aulin, V. V., Holovaty, A. O., D'yachenko, V. O., & Petrovs'kyi, M. Yu. (2020). Transport and forwarding services in the implementation of consolidated freight transportation. *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Increasing the Reliability of Machines and Equipment" (April 15-17, 2020, Kropyvnytskyi)* (pp. 262-263). Kropyvnytskyi: CNTU [in Ukrainian].
25. Aulin, V. V., Holub, D. V., Bilichenko, V. V., & Zamurenko, A. S. (2020). Formation of indicators for assessing the efficiency of the transport process of transportation. *Bulletin of Mechanical Engineering and Transport*, 1(11), 4-10. Vinnytsia: VNTU [in Ukrainian].
27. Traffic Rules of Ukraine (PDR Ukraine) (2024) [in Ukrainian].

Viktor Aulin, Prof., DSc., **Oleksii Tertytsia**, post-graduate, **Taras Nadych**, post-graduate, **Andrii Hrynkyv**, Senior Researcher, PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Oleh Lyashuk, Prof., DSc., **Viktor Gud**, Prof., DSc.

Ternopil National Technical University named after Ivan Pulyuy, Ternopil, Ukraine

Serhii Zalutsky, PhD tech. sci.

VSP "Ternopil Professional College of TNTU named after I. Pulyuy", Ternopil, Ukraine

Criteria for Selecting Heavy Vehicles for Efficient and Safe Transportation

The work defines the stages of solving the problem of choosing heavy-duty vehicles for the effective and safe transportation of the enterprise's products. Technical, organizational and economic (market) criteria for choosing vehicles are formed and substantiated.

The equipment of heavy-duty vehicles was carried out in compliance with the overall dimensions and weight parameters in empty and loaded states. At the same time, the requirements for limiting the load on the axle were taken into account. The advantages of different types of equipment were clarified: curtain, open-sided, van/refrigerator. When choosing heavy-duty vehicles, their technical features and the possible location of the cargo in the body during container transportation were taken into account. Various equipment options (nine options) are presented. With different methods of placing cargo, deductions were made from the location of the center of gravity.

A diagram of the positioning of the center of gravity of a road train at maximum load was obtained. Possible options and methods of positioning cargo without overloading the axle and exceeding the permissible total weight limit were substantiated. In cases of violation of permissible limits of axial loads and exceeding the permissible mass of a heavy-duty vehicle, a set of regression equations was obtained to estimate the amount of damage. Graphical representations of regression dependencies were presented. A mechanism for solving the problem of selecting heavy-duty vehicles based on their technical readiness, organizational support and economic efficiency was developed. A ranking (layered) arrangement of vehicles for the effective transportation of finished products of the enterprise was carried out. Three of the nine options were selected that are most effectively suitable for the implementation of transportation of finished products from the enterprise of ZAO "Kirovogradgranit".

heavy-duty vehicle, criterion, efficiency, safety, reliability, maximum load, permissible weight, soft containers

Одержано (Received) 17.11.2024

Прорецензовано (Reviewed) 19.12.2024

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2024

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 625

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.188-195](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.188-195)**Н.В. Потаман**, доц., канд. техн. наук, **О.О. Орда**, доц., канд. техн. наук**О.М. Орда**, асп.*Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна**e-mail: n.potaman@khadi.kharkov.ua*

Аналіз аспектів планування сталої міської мобільності в контексті євроінтеграційних реформ в Україні

Розвиток сталої міської мобільності є важливим аспектом модернізації транспортної системи в українських містах, особливо в контексті європейської інтеграції. Впровадження планів сталої міської мобільності сприяє створенню комфортного, екологічно безпечного та ефективного транспортного середовища, що відповідає сучасним викликам урбанізації та зростаючим потребам населення. Водночас, зростає значення комплексного підходу до транспортного планування, що передбачає інтеграцію міських транспортних систем, підвищення доступності громадського транспорту та зниження екологічного навантаження. Проблема підвищення ефективності транспортної системи міста тісно пов'язана з необхідністю удосконалення законодавчої бази, реформування тарифної політики та пошуку альтернативних джерел фінансування. Використання європейського досвіду дозволяє сформулювати стратегічні підходи до розвитку сталої міської мобільності, забезпечуючи баланс між економічною ефективністю та соціальними потребами населення. Аналіз сучасних тенденцій та рекомендації, запропоновані в дослідженні, можуть бути використані для розробки комплексних стратегій управління міським транспортом, що сприятиме покращенню якості життя мешканців українських міст.

сталий розвиток, міська мобільність, євроінтеграція, реформи

Постановка проблеми. Розвиток сталої міської мобільності є ключовим аспектом проведення реформ та впровадження європейських стандартів на шляху євроінтеграційних процесів в Україні та необхідним кроком для вирішення проблем, пов'язаних із забрудненням довкілля, заторами, низького рівня якості послуг для мешканців міст. Цей процес є невід'ємною частиною глобальної мети забезпечення сталого розвитку, сформульованої в Цілях сталого розвитку ООН [1] і одним з пріоритетних напрямків європейської політики, спрямований на створення міст та населених пунктів, які є інклюзивними, безпечними та стійкими.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема ефективного розвитку міського пасажирського транспорту є предметом активної уваги на глобальному рівні як серед науковців, так і серед політиків, економістів та представників муніципальної влади. Європейська комісія приділяє значну увагу підтримці сталого розвитку міського пасажирського транспорту, регулярно розробляючи та ухвалюючи нормативні акти, які визначають ключові напрями нової транспортної політики Європейського Союзу [2]. Вітчизняні науковці активно досліджують питання розвитку транспортної системи України в контексті європейської інтеграції [3]. Їхні наукові праці зосереджені на визначенні ключових напрямів реформування державної транспортної політики, аналізі поточного стану транспортно-логістичної інфраструктури та пошуку оптимальних шляхів її модернізації. Особлива увага приділяється забезпеченню сталого розвитку галузі відповідно до європейських стандартів, інтеграції українського транспортного

сектора в європейський простір. Окрім цього автори наукових досліджень приділяють особливу увагу удосконаленню законодавчої бази, яка здійснює регулювання комунальних підприємств, реформуванню тарифної політики та пошуком альтернативних джерел фінансування для забезпечення сталого розвитку та функціонування міських транспортних систем [4].

Постановка завдання. Метою дослідження є аналіз аспектів планування сталої міської мобільності для визначення основних викликів та можливостей для її розвитку в Україні в контексті євроінтеграційних реформ. По результатах проведеного аналізу передбачено розробку рекомендацій для поліпшення планування та впровадження заходів зі створення сталої міської мобільності в містах України.

Виклад основного матеріалу. Міста виступають ключовими центрами економічного зростання та соціальних трансформацій та вимагають розробки та впровадження комплексної транспортної політики [5]. Ефективна та стійка транспортна система є необхідною умовою для забезпечення конкурентоспроможності міст, особливо в контексті повоєнної відбудови. Актуальність теми дослідження обумовлено наслідками внутрішніх міграційних процесів населення в безпечні регіони країни, що спричиняє додаткове навантаження на транспортну інфраструктуру великих міст, та загострення екологічних проблем в умовах енергетичної кризи. Водночас, зростаючі вимоги населення щодо якості муніципальних послуг, зокрема, доступності та безпеки громадського транспорту, підкреслюють необхідність переходу до більш сталих моделей міської мобільності.

В Стратегії Європейської комісії пріоритетним напрямком зазначається співпраця з містами і державами-членами із забезпечення, «щоб всі великі і середні міста, які є міськими вузлами мережі Транс'європейської транспортної мережі (TEN-T), розробили свої власні плани сталої міської мобільності до 2030 року» для досягнення планів з декарбонізації європейських міст до 2050 року на 90 % [6]. Враховуючи оновлення індикативних мап (TEN-T) – автомобільних та залізничних шляхів в 2022 році і включення до них українських міст, стратегічний напрям діяльності Європейської комісії з розробки планів сталої міської мобільності необхідно буде реалізовувати і для міст, що були включені до TEN-T.

«Плани сталої міської мобільності (ПСММ) – це стратегічні плани, що ґрунтуються на довгостроковому баченні, головною метою яких є надання комплексних рішень для задоволення потреб у транспорті та мобільності людей і товарів, гарантуючи технічну, економічну, екологічну та соціальну сталість» [7].

Багато європейських міст накопили значний досвід у розробці та реалізації заходів, спрямованих на забезпечення сталого розвитку та економічної трансформації [8]. Серед українських міст було досліджено досвід впровадження ПСММ в Житомирі, Івано-Франківську, Львові, Миколаєві та Полтаві. Транспорт вважається основним джерелом викидів парникових газів у містах, тому важливим постає питання інтеграції планів сталої міської мобільності із кліматичними планами розвитку міст. Так, «Місцеві зелені курси» передбачають використання багаторівневого підходу до управління для прискорення трансформації на принципах комплексної стратегії сталого розвитку. Однак, і успішні європейські міста стикаються з викликами на шляху впровадження міських зелених курсів, такими як [8]:

- політична нестабільність в окремих громадах;
- виникнення потреби у внутрішній координації, що виходить за межі традиційної секторальної координації на рівні міської влади;

– залучення до обговорення ініціатив ширшого кола місцевих зацікавлених сторін, які традиційно не замислювались над сталим розвитком і не працювали в цьому напрямку;

– налагодження комунікації між міськими підрозділами влади та місцевими зацікавленими сторонами;

– фінансування розробки та впровадження ініціатив, тощо.

Аналіз запроваджених планів сталої міської мобільності (ПСММ) європейських та вітчизняних міст дозволив виявити наступні спільні характеристики [7-9]:

– стратегічне бачення, орієнтоване на підвищення якості життя мешканців та зменшення антропогенного навантаження на довкілля;

– всебічний аналіз вихідних даних та розробка системи індикаторів для моніторингу прогресу;

– залучення широкого кола зацікавлених сторін до процесу планування та реалізації;

– систематичний моніторинг та оцінка ефективності ПСММ [7-9].

Відновлення деокупованих міст та повоєнна відбудова країни вимагатиме від місцевих влад чіткого плану розбудови та оновлення транспортних систем міст, а «індустрія міської мобільності може стати одним з нових стовпів економіки» [10]. Тому, важливим є розробка рекомендацій для поліпшення планування та впровадження заходів зі створення сталої міської мобільності в містах України, спрямованих на удосконалення законодавчої бази, розробку ефективних інструментів фінансування, створення партнерств між державними органами, бізнесом та громадськими організаціями. З цією метою проведено SWOT-аналіз викликів та можливостей розвитку міської мобільності в містах України (рис. 1).



Рисунок 1 – SWOT-аналіз викликів та можливостей розвитку міської мобільності в містах України

Джерело: розроблено автором

Вирішення задачі подолання існуючих викликів та забезпечення ефективного функціонування транспортної системи регіонів в Україні на прикладі досвіду європейських країн автори [10] бачать у створенні транзитних альянсів на рівні обласних центрів з об'єднанням транспортних підприємств обласних центрів та навколишніх громад у триярусну структуру, де на 1му рівні представлена місцева влада, яка визначає політику (цілі) громадського транспорту; 2й рівень – управлінський рівень (некомерційна установа, що здійснює фінансовий менеджмент з закупівлі, моніторингу та контролю, оплати за транспортні послуги); 3й рівень – автобусні та залізничні оператори.

Отже, в результаті проведеного аналізу аспектів планування сталої міської мобільності в Україні в контексті євроінтеграційних реформ в Україні можна зробити висновок про те, що сучасні умови вимагають застосування інтегрованого підходу до планування мобільності, який базується на глибокому розумінні потреб користувачів, системному аналізі транспортних потоків, з урахуванням цілей різних планів розвитку міста, у відповідності до європейських політик та практик, та використанні інноваційних технологій.

Аналіз наявного законодавства України у сфері міського транспорту свідчить про його значну невідповідність сучасним європейським стандартам та вимогам сталої мобільності. Дослідження "Рекомендації до транспортного законодавства України з урахуванням практик ЄС" [11] вказує на потребу комплексного реформування правових норм, зокрема гармонізації з директивами Європейського Союзу щодо інтегрованого транспортного планування, фінансування громадського транспорту та екологічних стандартів для міських перевезень.

Серед ключових викликів, які потребують вирішення, є необхідність розробки нормативної бази для впровадження Планів сталої міської мобільності (SUMP), що вже є обов'язковими в багатьох країнах ЄС. Окрім цього, актуальним є удосконалення механізмів державного регулювання тарифної політики, запровадження економічних стимулів для модернізації транспортного парку та адаптація європейських практик субсидування громадського транспорту через механізм *Public Service Obligation (PSO)*.

Public Service Obligation (PSO), або зобов'язання щодо надання публічних послуг, — це механізм, закріплений законодавством або договором, який вимагає від організацій надавати послуги, що є важливими для суспільства. На нашу думку, це питання недостатньо враховане в контексті євроінтеграційних реформ в Україні.

Система громадських перевезень в Україні має значні відмінності від європейських практик. У країнах ЄС застосовується модель *PSO (Public Service Obligation)*, яка передбачає чітке фінансування перевізників для компенсації витрат на перевезення. У ЄС модель *PSO* у секторі громадського пасажирського транспорту функціонує на підставі Регламенту 1370/2007/ЄС з 2009 року [12]. Цей документ встановлює основні принципи організації пасажирських перевезень громадським транспортом в конкретному регіоні. Він описує механізм взаємодії між уповноваженими органами та перевізниками, де один виступає замовником, а інший — виконавцем обов'язків щодо надання суспільно важливих послуг.

В Україні ж перевезення регулюються трьома окремими законами: «Про залізничний транспорт», «Про міський електричний транспорт» і «Про автомобільний транспорт» [13-15]. По-перше ці три окремі законодавчі акти перешкоджають синергії різних видів громадського транспорту, особливо це стосується роботи комунальних підприємств, які надають послуги на декількох видах транспорту. По-друге, в своїй більшості підприємства, які надають послуги з перевезення пасажирів у містах

працюють на засадах самоокупності, особливо це стосується приватних перевізників. Відсутність та складність встановлення комбінованої тарифної системи, що передбачає розподіл між декількома видами транспорту обумовлено наявністю значної кількості приватних перевізників в містах та недостатньою впорядкованістю їх діяльності з боку міських адміністрацій. Надані містом компенсації за перевезення окремих пільгових категорій пасажирів не покривають усіх витрат підприємства, ураховуючи при цьому, що підприємство залишає собі усі надходження від перевезення платних пасажирів рухомого складу.

Найбільш складними питаннями при впровадженні моделі PSO в Україні є ті, що стосуються нарахування компенсації за надані транспортні послуги, а також механізмів нарахування штрафів і бонусів за забезпечення необхідного рівня якості послуг та визначення строків дії договору.

Основна складність нарахування компенсацій полягає в тому, що в Україні на сьогодні не існує єдиної системи нарахування компенсації для різних видів транспорту. Законодавством передбачено нарахування компенсацій тільки за виконану транспортну роботу на електричному транспорті. Щодо автомобільного транспорту, компенсація передбачена лише для перевезення окремих категорій пільгових пасажирів. Як наслідок, підприємства, які надають послуги з перевезення пасажирів на кількох видах транспорту, наприклад комунальні підприємства, що обслуговують тролейбусні та автобусні маршрути, змушені вести окремий облік та здійснювати розрахунки за кожним видом транспорту, що часто призводить до того, що не покриваються всі витрати підприємства.

Отже, наразі надзвичайно важливо, щоб Верховна Рада ухвалила низку законопроектів, що запроваджують єдиний механізм нарахування компенсацій для всіх видів громадського транспорту. Згідно з Регламентом 1370/2007/ЕС, нарахування компенсацій може здійснюватися за таким принципом:

$$C = ((P_{bus} \cdot KM_{bus}) + (P_{trolleybus} \cdot KM_{trolleybus})) + P_r - R^* + BON - PEN \text{ грн},$$

де P_{bus} , $P_{trolleybus}$ – вартість 1 кілометра пробігу відповідно на автобусних та тролейбусних маршрутах, грн/км;

KM_{bus} , $KM_{trolleybus}$ – кількість виконаних кілометрів на автобусних та тролейбусних маршрутах, км;

P_r – обґрунтований прибуток для підприємства з надання послуг перевезення, грн;

R^* – загальний перевірений дохід, отриманий підприємством від надання послуг місцевого громадського транспорту за місяць, за який надається компенсація, тобто сума доходу від продажу проїзних документів, дохід від іншої діяльності, пов'язаної з наданням послуг місцевого громадського транспорту, будь-які гранти або інші форми підтримки доходу, на які підприємство має право, плюс всі інші доходи підприємства від діяльності, пов'язаної з наданням послуг громадського транспорту, грн;

BON – премія за результатами діяльності, яку отримує підприємство при досягненні узгоджених порогових показників діяльності, грн;

PEN – штраф, пов'язаний з результатами діяльності, який накладається на підприємство, коли ключові показники діяльності падають нижче узгоджених мінімальних порогових значень, грн.

Щодо нарахування штрафних санкцій за невиконання узгоджених мінімальних порогових значень якості надання послуг, то тут також виникають значні труднощі. По-перше, згідно з чинним законодавством, міська влада не має повноважень нараховувати штрафи підприємствам, які надають послуги з перевезення пасажирів. Єдиним

механізмом застосування штрафних санкцій є зменшення суми компенсації у разі невиконання узгоджених мінімальних вимог до якості послуг. Однак на сьогодні більшість міст не використовують таку систему стимулювання для забезпечення відповідного рівня якості надання послуг перевізниками. Тому модель PSO, яка має бути впроваджена в Україні, повинна обов'язково передбачати механізм нарахування як штрафних, так і бонусних санкцій для забезпечення дотримання високих стандартів якості послуг на узгодженому рівні.

Для запровадження моделі PSO в Україні необхідно внести зміни до Бюджетного кодексу, оскільки за цією моделлю договори з підприємствами щодо надання послуг перевезення пасажирів укладаються на 10-15 років. Натомість в Україні наразі використовуються короткострокові договори.

Проте деякі міста в Україні вже намагаються внести зміни до системи громадських перевезень, поступово наближаючись до впровадження моделі PSO, яка функціонує на основі Регламенту 1370/2007/EC.

Отже, приведення транспортного законодавства України до стандартів Європейського Союзу вимагає комплексного і системного підходу. Серед основних напрямків адаптації можна виокремити: розробку нових нормативних актів та вдосконалення нормативно-правової бази для відповідності вимогам транспортних директив ЄС; участь України в європейських транспортних організаціях, приєднання до конвенцій, протоколів і договорів, а також виконання резолюцій і рекомендацій цих організацій; підготовку та укладення двосторонніх міжурядових угод у транспортній сфері з європейськими державами.

При цьому слід враховувати, що потреба впровадження моделі PSO виникає не тільки з необхідності євроінтеграційних зобов'язань України, а і для вирішення таких критичних проблем громадського транспорту, як збитковість комунальних транспортних підприємств, недостатній рівень інвестицій перевізників в оновлення рухомого складу, недостатній розвиток автоматизації систем обліку оплати проїзду та електронного моніторингу та поточна обмеженість обслуговування маршрутів перевізниками.

Висновки. Результати проведеного дослідження підтвердили, що розвиток сталої міської мобільності є критично важливим для адаптації транспортної системи українських міст до європейських стандартів та вирішення актуальних проблем урбанізації.

Аналіз європейського досвіду показав, що впровадження Планів сталої міської мобільності (ПСММ) сприяє не лише покращенню транспортної інфраструктури, а й забезпеченню екологічної та соціальної стійкості міських територій. Водночас, основними перешкодами для розвитку сталої мобільності в Україні залишаються: недостатня інтеграція транспортного планування з іншими сферами міського розвитку, нестача фінансування та інвестицій, неузгодженість законодавчої бази, обмежене впровадження сучасних технологій та інновацій.

Перспективи розвитку сталої міської мобільності в Україні включають удосконалення нормативно-правового регулювання, розширення фінансових механізмів, залучення міжнародних інвестицій та інтеграцію міського транспорту з кліматичними політиками. Впровадження європейських практик управління міським транспортом сприятиме підвищенню якості перевезень, зменшенню екологічного навантаження та забезпеченню сталого розвитку міських територій.

Отримані результати можуть бути використані для розробки стратегічних рішень та рекомендацій щодо планування сталої міської мобільності, що дозволить

ефективно адаптувати українську транспортну систему до сучасних викликів та євроінтеграційних вимог.

Список літератури

1. Цілей сталого розвитку | Global Compact. Global Compact. URL: <https://globalcompact.org.ua/tsili-stijkogo-rozvytku/> (дата звернення: 15.10.2024).
2. Амоша О. І., Філіпова О. С. Європейський досвід забезпечення ефективного функціонування підприємств міського пасажирського транспорту. *Економіка будівництва і міського господарства*, 2010, 6.4: 179-189. URL: https://donnasa.org/publish_house/journals/esgh/2010-4/02_amoscha_filipova.pdf (дата звернення: 15.10.2024).
3. Чередніченко О. План сталої міської мобільності як один з інструментів управління міськими транспортними системами. *Просторовий розвиток*, (7), 2024 594–611. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.7.594-611>
4. Степанов В. Ю. Державне регулювання транспортною сферою. *Вісник Національного університету цивільного захисту України. Серія: Державне управління*, 2016, 1: 97-103.
5. Чаркіна Т. Ю., Задоя В. О., Юрчик О. А. Сучасний стан та перспективи розвитку відновлення і розбудови транспортної інфраструктури в Україні. *Agrosvit*. 2024. № 6. С. 103–112. URL: <https://doi.org/10.32702/2306-6792.2024.6.103> (дата звернення: 15.10.2024).
6. «Стратегія сталої та розумної мобільності – європейський транспорт на шляху до майбутнього». Європейська Комісія – Брюссель, 09.12.2020. URL: https://visionzero.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/EU_SSMS_Ukrainian-Translation.pdf-89 (дата звернення: 18.10.2024).
7. Інтегрування планів сталої міської мобільності (ПЦММ/SUMP) з планами дій сталого енергетичного розвитку та клімату (ПДСЕРК/SECAP). 2023. Вип. №6. URL: <https://enefcities.org.ua/upload/files/Publications/Urban%20Mobility/casestudy.pdf>. (дата звернення: 08.11.2024).
8. Порадник «Місцеві зелені курси. План дій» | DiXi Group. DiXi Group. URL: <https://dixigroup.org/analytic/poradnyk-miscevi-zeleni-kursy-plan-dij/> (дата звернення: 20.11.2024).
9. План сталої міської мобільності. Сучасні політики у сфері міської мобільності | City Trans UA. URL: <https://citytransua.com/wp-content/uploads/Igor-Mogila-Plan-staloj-miskoi-mobilnosti.pdf> (дата звернення: 20.11.2024).
10. Трансформація сталої мобільності. TUMI. 2023. URL: <https://transformative-mobility.org/трансформація-сталої-мобільності/> (дата звернення: 28.11.2024).
11. Трипольська г. Рекомендації до транспортного законодавства України з урахуванням практик ЄС. 2020 https://ua.boell.org/sites/default/files/2021-02/Doslidzhennia_transport_23.02_v.2.pdf (дата звернення 20.11.2024).
12. РЕГЛАМЕНТ ЄВРОПЕЙСЬКОГО ПАРЛАМЕНТУ І РАДИ (ЄС) № 1370/2007 від 23 жовтня 2007 року https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_008-07#Text (дата звернення 20.11.2024).
13. Закон України «Про залізничний транспорт» від 04.07.1996 № 273/96-ВР <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/c273/96-%D0%B2%D1%80#Text> (дата звернення 20.11.2024).
14. Закон України «Про міський електричний транспорт» від 29.06.2004 № 1914-IV <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1914-15#Text> (дата звернення 20.11.2024).
15. Закон України «Про автомобільний транспорт» від 05.04.2001 № 2344-III <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2344-14#Text> (дата звернення 20.11.2024).

References

1. Tsilei staloho rozvytku | Global Compact. Global Compact. URL: <https://globalcompact.org.ua/tsili-stijkogo-rozvytku/> (data zvernennia: 15.10.2024).
2. Amosha O. I., & Filipova O. S. (2010). Yevropeyskyi dosvid zabezpechennia efektyvnoho funktsionuvannia pidpriemstv miskoho pasazhyrskoho transportu. *Ekonomika budivnytstva i miskoho hospodarstva*, 6.4: 179-189. URL: https://donnasa.org/publish_house/journals/esgh/2010-4/02_amoscha_filipova.pdf (data zvernennia: 15.10.2024).
3. Cherednichenko O. (2024) Plan staloi miskoi mobilnosti yak odyn z instrumentiv upravlinnia miskymy transportnymy systemamy. *Prostorovi rozvytok*, (7), 594–611. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.7.594-611>
4. Stepanov V. Yu. (2016). Derzhavne rehuliuвання transportnoiu sferoiu. *Visnyk Natsionalnoho universytetu tsyvilnoho zakhystu Ukrainy*. Seria: Derzhavne upravlinnia. 1: 97-103.

5. Charkina T. Yu., Zadoia V. O., & Yurchyk O. A. (2024). Suchasnyi stan ta perspektyvy rozvytku vidnovlennia i rozbudovy transportnoi infrastruktury v Ukraini. *Agrosvit*. № 6. P. 103–112. URL: <https://doi.org/10.32702/2306-6792.2024.6.103> (data zvernennia: 15.10.2024).
6. «Stratehiia staloi ta rozumnoi mobilnosti – yevropeyskyi transport na shliakhu do maibutnoho». Yevropeiska Komisiia – Briussel, 09.12.2020. URL: https://visionzero.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/EU_SSMS_Ukrainian-Translation.pdf-89 (data zvernennia: 18.10.2024).
7. Intehruvannia planiv staloi miskoi mobilnosti (PSMM/SUMP) z planamy dii staloho enerhetychnoho rozvytku ta klimatu (PDSERK/SECAP). 2023. Vyp. №6. URL: <https://enecities.org.ua/upload/files/Publications/Urban%20Mobility/casestudy.pdf>. (data zvernennia: 08.11.2024).
8. Poradnyk «Mistsevi zeleni kursy. Plan dii» | DiXi Group. DiXi Group. URL: <https://dixigroup.org/analytic/poradnyk-miscevi-zeleni-kursy-plan-dij/> (data zvernennia: 20.11.2024).
9. Plan staloi miskoi mobilnosti. Suchasni polityky u sferi miskoi mobilnosti | City Trans UA. URL: <https://citytransua.com/wp-content/uploads/Ihor-Mohyla-Plan-staloi-miskoi-mobilnosti.pdf> (data zvernennia: 20.11.2024).
10. Transformatsiia staloi mobilnosti. TUMI. 2023. URL: <https://transformative-mobility.org/transformatsiia-staloi-mobilnosti/> (data zvernennia: 28.11.2024).
11. Trypolska h. Rekomendatsii do transportnoho zakonodavstva ukraïny z urakhuvanniam praktyk YeS. 2020 https://ua.boell.org/sites/default/files/2021-02/Doslidzhennia_transport_23.02_v.2.pdf (data zvernennia 20.11.2024).
12. REHLAMENT YeVROPEYSKOHO PARLAMENTU I RADY (IeS) № 1370/2007 vid 23 zhovtnia 2007 roku https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_008-07#Text (data zvernennia 20.11.2024).
13. Zakon Ukrainy «Pro zaliznychnyi transport» vid 04.07.1996 № 273/96-VR <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/s273/96-%D0%B2%D1%80#Text> (data zvernennia 20.11.2024).
14. Zakon Ukrainy «Pro miskyi elektrychnyi transport» vid 29.06.2004 № 1914-IV <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1914-15#Text> (data zvernennia 20.11.2024).
15. Zakon Ukrainy «Pro avtomobilnyi transport» vid 05.04.2001 № 2344-III <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2344-14#Text> (data zvernennia 20.11.2024).

Natalia Potaman, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksandra Orda**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.,
Oleksandr Orda, post-graduate

Kharkiv National Automobile and Highway Univer, Kharkiv, Ukraine

Analysis of Sustainable Urban Mobility Planning Aspects in the Context of European Integration Reforms in Ukraine

The development of sustainable urban mobility is a crucial aspect of modernizing the transport system in Ukrainian cities, particularly in the context of European integration. The implementation of Sustainable Urban Mobility Plans (SUMP) contributes to creating a comfortable, environmentally friendly, and efficient transport environment that addresses contemporary urbanization challenges and the growing needs of the population. At the same time, the importance of a comprehensive approach to transport planning is increasing, which involves integrating urban transport systems, improving public transport accessibility, and reducing environmental impact.

The issue of enhancing the efficiency of the urban transport system is closely linked to the need for improving the legislative framework, reforming tariff policies, and identifying alternative sources of funding. Leveraging European experience allows for the development of strategic approaches to sustainable urban mobility, ensuring a balance between economic efficiency and the social needs of the population.

The analysis of current trends and the recommendations proposed in this study can be utilized for developing comprehensive urban transport management strategies, ultimately contributing to improving the quality of life for residents of Ukrainian cities.

sustainable development, urban mobility, European integration, reforms.

Одержано (Received) 30.10.2024

Прорецензовано (Reviewed) 29.11.2024

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2024

І. О. Хітров, доц., канд. техн. наук, **С. В. Козак**, доц., канд. екон. наук
*Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне,
Україна*
e-mail: i.o.khitrov@nuwm.edu.ua

Безпечність транспортної діяльності

У статті розглядається безпечність транспортної діяльності як комплексна характеристика, що визначає здатність транспортної системи функціонувати з мінімальними ризиками для всіх учасників процесу. Визначено основні аспекти безпеки: технічний стан транспортних засобів, професійна підготовка персоналу, відповідність транспортної інфраструктури вимогам безпеки, екологічна відповідальність та ефективне управління ризиками. Особлива увага приділяється впливу автомобілебудування на підвищення рівня захищеності учасників дорожнього руху через впровадження інноваційних технологій та систем безпеки. Окреслено значення регулярного технічного обслуговування, екологічного контролю у забезпеченні безпеки перевезень. Стаття акцентує на важливості комплексного підходу до створення безпечного транспортного середовища в умовах зростання інтенсивності перевезень, урбанізації, технічного та технологічного прогресу.

автомобільний транспорт, транспортні технології, безпека, конструктивна безпека транспортного засобу, безпечність транспортної діяльності

Постановка проблеми. Безпечність транспортної діяльності є одним із найважливіших критеріїв, що визначають якість функціонування транспортної системи та її вплив на суспільство й економіку [1]. Зростання інтенсивності перевезень, урбанізація та впровадження новітніх технологій висувають нові виклики для забезпечення безпечних умов роботи транспортних засобів і інфраструктури.

У контексті автомобільного транспорту, який є основним видом перевезень у багатьох країнах, фактори безпечності охоплюють технічні, організаційні, екологічні та людські аспекти. Досягнення високого рівня безпечності вимагає врахування складних взаємозв'язків між технічним станом транспортних засобів, поведінкою водіїв, якістю дорожньої інфраструктури, а також дотриманням нормативно-правових вимог [2].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Публікації з цієї тематики висвітлюють як фундаментальні аспекти організації безпеки, так і інноваційні підходи, спрямовані на мінімізацію ризиків транспортної діяльності.

Зважаючи на потребу інтеграції в європейське та світове співтовариство, Україна приділяє значну увагу питанням національної транспортної безпеки [1, 2].

У роботах багатьох дослідників акцентується увага на важливості технічного стану транспортних засобів як ключового чинника безпечності [3-5].

Ряд публікацій присвячено вивченню методів підвищення ефективності безпечної організації дорожнього руху та безпечності перевезень [6-8].

Неодноразово підкреслюється важливість людського чинника у забезпеченні безпеки [9-10].

Аналіз досліджень демонструє, що ефективне забезпечення безпечності транспортної діяльності вимагає комплексного підходу. Подальші дослідження мають бути зосереджені на узагальненні стратегій розвитку максимально безпечного транспортного середовища.

Постановка завдання. Забезпечення безпечної транспортної діяльності є однією з пріоритетних задач сучасного транспортного сектору. Розвиток безпечного автомобільного транспорту, підвищення інтенсивності перевезень і насиченості транспортних потоків вимагають системного підходу до аналізу та управління безпекою. Постановка завдання у цій сфері передбачає визначення ключових проблем, цілей і шляхів їхнього вирішення. Це дозволить досягти балансу між ефективністю перевезень і мінімізацією ризиків у транспортній сфері.

Виклад основного матеріалу. Транспортні засоби широко застосовують у всіх галузях народного господарства і складають невід’ємну частину продуктивних сил суспільства. Значне зростання чисельності рухомого складу, покращення їх експлуатаційних властивостей супроводжується підвищенням швидкісного режиму руху, але і призводить до збільшення щільності та інтенсивності транспортного потоку вулично-дорожньої мережі, збільшує в рази забруднення довкілля, аварійність, що в свою чергу потребує конструктивного вдосконалення транспортних засобів на відповідність сучасним вимогам безпеки і безпечності транспортної діяльності [11].

Відмінність між поняттями «безпеки» та «безпечності транспортної діяльності» на автомобільному транспорті проявляється у їхньому змісті, спрямованості та масштабах застосування (рис. 1).



Рисунок 1 – Основні відмінності між безпекою та безпечністю транспортної діяльності

Джерело: розроблено авторами

В загальнонаціональному вимірі транспортна безпека, як комплексна характеристика, яка визначає стан захищеності об’єктів транспортної інфраструктури, що дозволяє забезпечувати безпеку та інтереси в галузі транспортної діяльності, стійкість транспортної діяльності, здатність запобігати нанесенню шкоди здоров’ю і життю людей, збитку майну та навколишньому середовищу, мінімізувати соціально-економічний збиток при транспортній діяльності [2]. Безпека є результатом реалізації заходів, спрямованих на мінімізацію ризиків і наслідків негативних подій.

Безпечність є властивістю транспортної системи та діяльності, що характеризує її здатність функціонувати з мінімальними ризиками для всіх учасників процесу та охоплює технічний стан транспортних засобів (конструктивну відповідність безпечній експлуатації), професійну підготовку водіїв і технічного персоналу, відповідність транспортної інфраструктури вимогам безпеки, екологічну відповідальність транспортної діяльності [1-7]. Безпечність транспортної діяльності є одним із ключових аспектів, що впливають на розвиток сучасного суспільства. В умовах зростаючої

урбанізації, інтенсифікації руху та технологічного прогресу забезпечення безпечності перевезень стає стратегічним завданням на державному рівні (рис. 2).

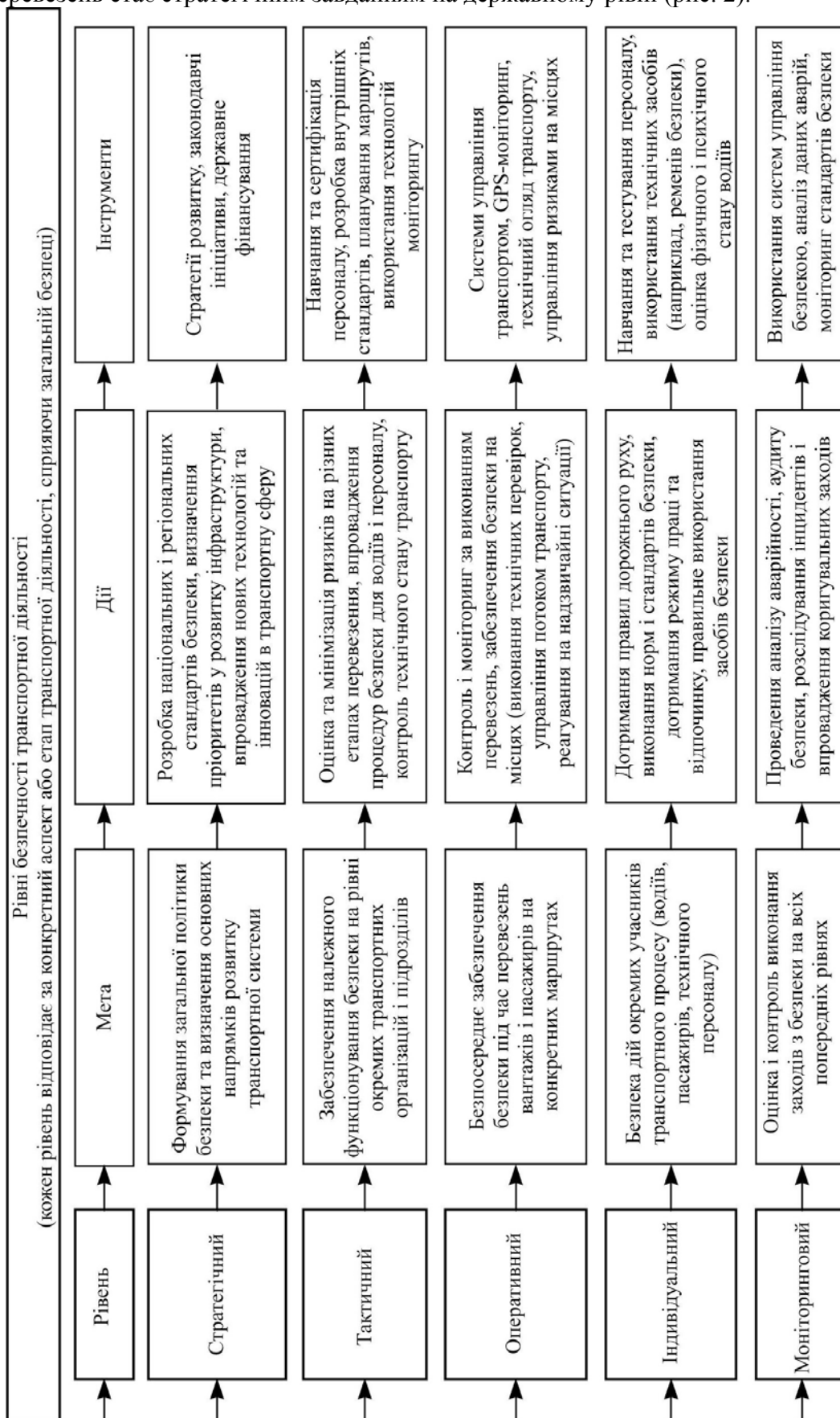


Рисунок 2 – Рівні безпечності транспортної діяльності

Джерело: розроблено авторами

Безпечність транспортної діяльності, як комплексна інтегральна характеристика визначається ключовими факторами відображення здатності транспортної системи забезпечувати перевезення людей та вантажів із мінімальними ризиками для життя, здоров'я, майна та довкілля (рис. 3).



Рисунок 3 – Ключові фактори безпечної транспортної діяльності

Джерело: на підставі [2, 8]

Транспортний засіб повинен бути завжди безпечним у будь який час, в любых дорожніх ситуаціях і природних експлуатаційних умовах. Протягом всього періоду експлуатації можуть неодноразово виникати фактори ризику нанесення шкоди внаслідок недосконалості конструкції та їх відмовою, помилок у водінні і поведінці пішоходів, забруднення довкілля, спричинення дорожньо-транспортних пригод тощо [6-8]. Для комплексного покращення безпеки транспортного засобу з одночасним забезпеченням взаємної відповідності його окремим елементів всі фактори ризику умовно поділяють за джерелом їх виникнення на чотири взаємозалежні групи: водій (людина), транспортний засіб (автомобіль), дорога, середовище (рис. 4).

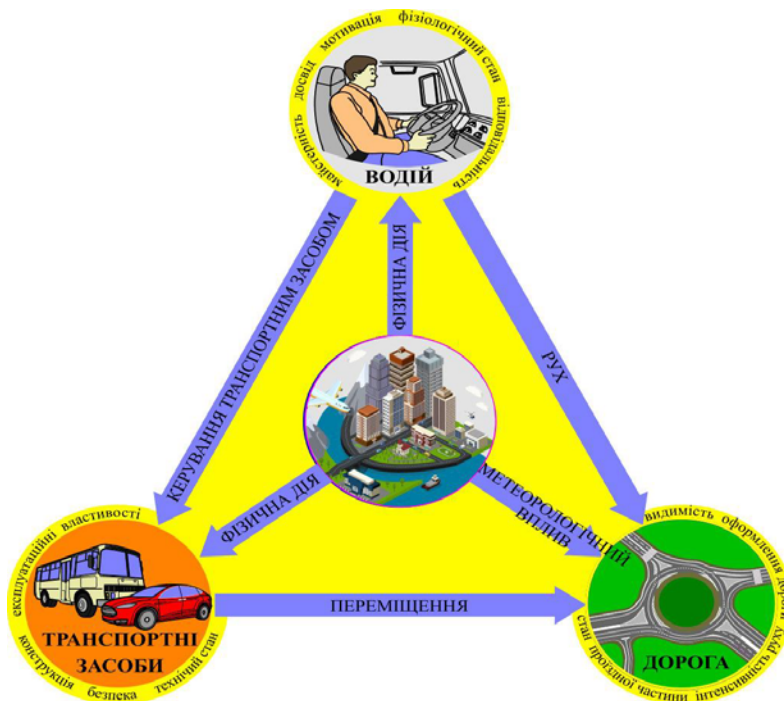


Рисунок 4 – Система безпекової взаємодії транспортного засобу в дорожньому середовищі

Джерело: на підставі [6, 7]

Безпека транспортних засобів і безпечність транспортного процесу повинні розглядатися комплексно – як умова і завдання успішного функціонування соціально-економічних систем [6-8]. Враховуючи специфічні особливі умови функціонування транспорту виникає об'єктивна необхідність в системному дослідженні чинників, які впливають на безпеку транспортного засобу, та об'єднання його експлуатаційних властивостей в складі двох комплексів – конструктивної і експлуатаційної безпеки (поділяють на активну, пасивну, післяаварійну та екологічну – табл.1).

Автомобілебудування має суттєвий вплив на безпечність транспортної діяльності, оскільки нові технології та конструктивні рішення підвищують рівень захисту водіїв, пасажирів та інших учасників дорожнього руху. Активно розробляються та впроваджуються систем активної (системи допомоги водієві, спеціальні гальмівні системи, електронні системи стабілізації руху) і пасивної (збільшення міцності конструкції кузова без збільшення ваги, системи захисту пішоходів і вантажів) безпеки, енергоефективності і зниження екологічного впливу, застосовуються сучасні матеріали та інженерні інновації, проводиться загальновизнана стандартизація та сертифікація транспортних засобів.

Таблиця 1 – Види безпеки транспортного засобу

| Конструктивна безпека транспортного засобу (вид) | Опис властивості транспортного засобу виду безпеки | Коротка характеристика |
|--|--|---|
| Активна (перша лінія захисту транспортного засобу, попередження небезпеки) | визначає ефективність використання транспортного засобу за його функціональним призначенням – перевезення вантажів і обслуговування пасажирів | Компонувальні параметри, тягова динамічність, гальмівні властивості, стійкість, керованість, інформативність, обладнання робочого місця водія, надійність та обладнання |
| Пасивна (друга лінія захисту транспортного засобу, зниження наслідків) | властивості транспортного засобу та дорожніх споруд, що забезпечують виключення або зниження тяжкості наслідків дорожньо-транспортної пригоди без активних дій учасників дорожнього руху | Компонувальні параметри, ударно-міцнісні властивості транспортного засобу та елементів облаштування доріг, займистість транспортного засобу |
| Післяаварійна (третя лінія – мінімізація шкоди в результаті аварії та забезпечення ефективної допомоги постраждалим) | властивості транспортного засобу, які сприяють зменшенню наслідків для людей, майна та навколишнього середовища після настання дорожньо-транспортної пригоди | Захист пасажирів, водія, пішоходів (енергоємні зони деформації, міцність каркасу), протизаймання (конструктивні рішення для зниження ймовірності загоряння транспортного засобу після зіткнення, використання матеріалів із підвищеною стійкістю до займання), легкість евакуації (можливість швидкого доступу) |
| Екологічна (турбота про довкілля і людей) | властивість транспортного засобу направлена на зменшення шкоди довкіллю та учасникам руху в процесі його нормальної експлуатації | Контроль на зменшення викидів шкідливих речовин у атмосферу, шумового та вібраційного забруднення, енергоефективності, управління відходами, захист природних ресурсів |

Джерело: розроблено авторами

Технічний стан транспортних засобів значною мірою впливає на безпеку перевезень, підтриманням якого досягається регулярним технічним обслуговуванням і своєчасним ремонтом. Наприклад, несправні гальма значно збільшують ризик ДТП (особливо в екстрених ситуаціях), а відсутність належного технічного обслуговування може спричинити подовження гальмівного шляху або повну втрату можливості зупинити транспорт; несправності рульового механізму можуть призвести до втрати контролю над транспортним засобом, що є особливо небезпечним під час руху на високій швидкості або в умовах інтенсивного руху; зношені або пошкоджені шини

знижують зчеплення з дорогою, що в разі збільшує ризик заносу, пробуксовування або розриву шин під час руху; несправні світлові прилади обмежують видимість для водія та знижують можливість взаємодії з іншими учасниками дорожнього руху, зношені амортизатори або пошкоджені елементи підвіски знижують стабільність автомобіля, що може призвести до втрати керуваності; надмірне завантаження або дисбаланс вантажу супроводжується перевантаженням окремих вузлів, що призводить до їх швидкого зношення або відмови.

Розвиток, модернізація та належне обслуговування транспортної інфраструктури неодмінно сприяє підвищенню рівня безпеки. Якісне дорожнє покриття знижує ризик аварій, забезпечує комфортний рух і зменшує зношення транспортних засобів; розвиненість дорожньої мережі та їх транспортних розв'язок зменшують кількість конфліктів, появи заторів, мінімізує ризики зіткнень; наявність (стан) дорожньої розмітки, світлофорів і дорожніх знаків сприяє правильній організації руху, забезпечує зрозумілість для всіх учасників руху, сприяє безпеці; транспортна логістика та контроль (моніторинг і управління) оптимізують потоки і зменшують аварійність.

Безпечна організація перевезень неможлива без планування, контролю та виконанням транспортних операцій, дотриманню режиму праці водіїв. Оптимізація маршрутів передбачає уникнення небезпечних ділянок, таких як зони з високим рівнем ДТП, поганими дорожніми умовами або недостатнім освітленням. Правильне завантаження, підготовка персоналу та використання сучасних технологій зменшують ризики аварій. Інформаційна підтримка та розробка інструкцій для дій у надзвичайних ситуаціях забезпечують оперативне реагування на небезпеки.

Контроль умов перевезень забезпечує безпеку транспортування вантажів і пасажирів шляхом перевірки технічного стану транспортних засобів та дотримання правил завантаження. Моніторинг умов перевезень, таких як температура, вологість або кріплення вантажів, мінімізує ризики пошкоджень і втрат. Поведінка водія контролюється через дотримання швидкісного режиму, часу праці та відпочинку, а також правил дорожнього руху. Сучасні інформаційні системи дозволяють виявляти відхилення в реальному часі, своєчасно реагуючи на можливі і прогнозовані небезпеки.

Екологічний контроль у сфері транспорту спрямований на зменшення негативного впливу транспортної діяльності на довкілля та передбачає визначення викидів шкідливих речовин (перевірка відповідності рівнів викидів нормам екологічних стандартів), моніторинг витрат пального (впровадження енергоефективних технологій та оптимізацію маршрутів), перевірка технічного стану (контроль справності систем, що впливають на екологічність транспорту), а також стимулювання екологічних альтернатив (використання електротранспорту, гібридних автомобілів або інших альтернативних видів палива).

Ефективне управління ризиками дозволяє знижувати кількість аварій, покращувати безпеку перевезень і зменшувати витрати на непередбачені ситуації та передбачає ідентифікацію ризиків (виявлення потенційних загроз, таких як технічні несправності, людські помилки, дорожні умови або погодні умови), їх оцінку (визначення ймовірності та наслідків кожного ризику для того, щоб виокремити їх за рівнем небезпеки), контроль (вжиття заходів для зниження впливу ризиків) та моніторинг (безперервний нагляд за виконанням заходів з управління ризиками та коригування стратегій у разі змін умов).

Професіоналізм персоналу є ключовим фактором досягнення безпечності транспортної діяльності, знижує ймовірність помилок, підвищує ефективність роботи шляхом навчання та підготовки (регулярне підвищення кваліфікації водіїв, диспетчерів та технічного персоналу, включаючи знання правил дорожнього руху, безпеки та використання новітніх технологій), професійному виконанню обов'язків (своєчасне та точне виконання інструкцій, контроль технічного стану транспортних засобів, дотримання

стандартів безпеки під час перевезень вантажів і пасажирів), набутті навичок управління стресом (здатність водіїв і персоналу ефективно реагувати на екстрені ситуації, що допомагає зберігати контроль над транспортними засобами у критичних умовах), а також своєчасне інформування та співпраця (налагодження ефективної комунікації між водіями, диспетчерами та іншими учасниками перевезень для швидкого реагування на зміни обстановки на маршруті).

Висновки. Таким чином, безпечність транспортної діяльності виступає основою для досягнення її безпеки, забезпечуючи системний підхід до попередження загроз і створення комфортного середовища для всіх учасників транспортного процесу.

В цілому, дослідження підкреслює важливість конструктивної безпеки транспортного засобу, його пристосованості до технічного обслуговування, здатності до експлуатаційного функціонування з метою забезпечення якісної і безпечної транспортної діяльності та організації перевезень.

Список літератури

1. Фердман Г. П. Деякі пропозиції щодо входження транспортної безпеки України до європейської системи безпеки на транспорті. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського*. 2020. № 4. Том 31 (70). С. 134-139. URL : https://www.pubadm.vernadskyjournals.in.ua/journals/2020/4_2020/24.pdf.
2. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 30 травня 2018 р № 430-2018-р / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-%D1%80#Text>.
3. Хаврук В.О. Аналіз безпеки автотранспортних засобів і сучасного стану системи обов'язкового технічного контролю автомобільного транспорту в Україні. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського*. 2020. № 5. Том 31 (70). С. 239-247. URL : https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2020/5_2020/41.pdf.
4. Хітров І. О. Дослідження впливу конструктивної надійності і безпечності транспортного засобу для здійснення перевезень та пристосованості до технічного обслуговування. *Центральноукраїнський науковий вісник*. 2023. Вип. 8(39), ч. II. С. 214-222. URL : [https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/8\(39\)_II/27.pdf](https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/8(39)_II/27.pdf).
5. Формальчик Є. Ю., Олісевич М. С., Мاستикаш О. Л., Пельо Р. А. Технічна експлуатація та надійність автомобілів. Львів : «Афіша», 2004. 495 с. URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2021/Formalchik_2004_492.pdf.
6. Кашканов А. А., Грисюк О. Г. Безпека руху автомобільного транспорту: навч. пос. Вінниця: ВНТУ, 2005. 177 с. https://atm.vntu.edu.ua/subject/books/Bezpeka_DR/Lek_Lab_BATZ.pdf.
7. Кишун В. А., Кузнецов Р. М., Мурований І. С., Лаба О. В. Безпека дорожнього руху та деякі правові аспекти: навч. пос. Луцьк: РВВ ЛНТУ, 2010. 226 с. https://lib.lntu.edu.ua/sites/default/files/2021-01/BDR_posibnuk_KKML_10.pdf.
8. Аулін В.В., Голуб Д.В., Гриньків А.В. Критерії реалізації процесів забезпечення та підвищення надійності і ефективності функціонування транспортних систем. *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»*. Луцьк. 2018. Вип. 62. С. 12-16. URL: <https://dSPACE.kntu.kr.ua/bitstreams/f01b025c-42c7-4bbd-a74d-f122e55681e4/download>.
9. Кокун О.М. Психофізіологія: навч. посіб. Київ: Центр навчальної літератури, 2006. 184 с. URL: http://lib.iitta.gov.ua/1608/1/Кокун_Психофізіологія.pdf.
10. Mygal G. Problems of the human factor in transport systems. *Transport technologies*. 2024. №1. Vol. 5. <https://doi.org/10.23939/tt2024.01.031>.
11. Хітров І. О., Кристопчук М. С., Никончук В. М. Експлуатаційні властивості транспортних засобів. Рівне : НУВГП, 2022. 176 с. URL: https://ep3.nuwm.edu.ua/24432/1/EVTZ_vipr_zah.pdf.

References

1. Ferdman, G. P. (2020). Some proposals for the accession of Ukraine's transport security to the European transport security system. *Scientific notes of V.I. Vernadsky Taurida National University*. No 4 (31), 134–139. Retrieved from : https://www.pubadm.vernadskyjournals.in.ua/journals/2020/4_2020/24.pdf [in Ukrainian].
2. On the approval of the National Transport Strategy of Ukraine for the period until 2030: Decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated May 30, 2018 No. 430-2018 / Verkhovna Rada of Ukraine. Retrieved from : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-%D1%80#Text> [in Ukrainian].

3. Khavruk, V. O. (2020). Analysis of the safety of motor vehicles and the current state of the mandatory technical control of motor vehicles in Ukraine. *Scientific notes of V.I. Vernadsky Taurida National University*. No 5 (31), 239–247. Retrieved from : https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2020/5_2020/41.pdf [in Ukrainian].
4. Khitrov, I. (2023). Study of the influence of structural reliability and safety of the vehicle for transportation and adaptability to maintenance. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. Vol. 8(39), 214–222. Retrieved from : [https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/8\(39\)_II/27.pdf](https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/8(39)_II/27.pdf) [in Ukrainian].
5. Fornalchik, E., Olishevych, M., Mastykash, O. & Pelo, R. (2004). The technical operation and reliability of the automobiles. Lviv. Retrieved from : https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2021/Fornalchik_2004_492.pdf [in Ukrainian].
6. Kashkanov, A. & Hrysyuk, O. (2005). Traffic safety automobile transport. Vinnytsia. Retrieved from : https://atm.vntu.edu.ua/subject/books/Bezpeka_DR/Lek_Lab_BATZ.pdf [in Ukrainian].
7. Kyshchun, V. A., Kuznietsov, R. M., Murovani, I. S. & Laba, O. V. (2010). Bezpeka dorozhnoho rukhu ta deiakii pravovi aspekty [Road safety and some legal aspects]. Lutsk. Retrieved from : https://lib.lntu.edu.ua/sites/default/files/2021-01/BDR_posibnuk_KKML_10.pdf [in Ukrainian].
8. Aulin V., Holub D. & Hrynkiv A. (2018). *Naukovi notatki*. Lutsk. 62, 12–16. Retrieved from : <https://dspace.kntu.kr.ua/bitstreams/f01b025c-42c7-4bbd-a74d-f122e55681e4/download> [in Ukrainian].
9. Kokun, O. M. (2006). *Psykhofiziologia* [Psychophysiology]. Kyiv. Retrieved from : http://lib.iitta.gov.ua/1608/1/Кокун_Психофізіологія.pdf [in Ukrainian].
10. Mygal, G. (2024). Problems of the human factor in transport systems. *Transport technologies*. No 1. Vol. 5. <https://doi.org/10.23939/tt2024.01.031> [in Ukrainian].
11. Khitrov, I., Krystopchuk, M. & Nykonchuk, V. (2022). Ekspluatatsiini vlastyvoli transportnykh zasobiv [Operational properties of vehicles]. Rivne. Retrieved from : https://ep3.nuwm.edu.ua/24432/1/EVTZ_%D0%B2%D0%B8%D0%BF%D1%80_zah.pdf [in Ukrainian].

Ihor Khitrov, Assoc. Prof. PhD tech. sci., **Svetlana Kozak**, Assoc. Prof. PhD economic. sci.

National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine

Safety of Transport Activities

In the national dimension, transport safety, as a comprehensive characteristic, defines the state of protection of transport infrastructure facilities. This ensures security and interests in the field of transport activities, resilience of transport operations, and the ability to prevent harm to human health and life, property damage, and environmental harm.

Safety is an inherent property of the transport system and operations, reflecting its ability to function with minimal risks to all participants in the process. It encompasses the technical condition of vehicles (structural compliance with safe operation), professional training of drivers and technical staff, compliance of transport infrastructure with safety requirements, and the environmental responsibility of transport activities.

The safety of transport activities is one of the most important criteria determining the quality of transport system performance and its impact on society and the economy. The growing intensity of transportation, urbanization, and the introduction of advanced technologies pose new challenges for ensuring the safe operation of vehicles and infrastructure. This includes technical, organizational, environmental, and human aspects.

The automotive industry significantly influences transport safety, as new technologies and design solutions enhance the protection of drivers, passengers, and other road users. Active and passive safety systems, energy efficiency, and reduced environmental impact are actively developed and implemented. Modern materials and engineering innovations are applied, and standardized certification of vehicles is conducted globally.

The technical condition of vehicles substantially affects transportation safety. Regular maintenance and timely repairs help maintain this condition. Monitoring transportation conditions ensures the safety of cargo and passenger transportation by checking vehicle technical conditions and adherence to loading regulations.

Environmental control in the transport sector aims to reduce the negative impact of transport activities on the environment. It includes measuring harmful emissions, monitoring fuel consumption, checking technical conditions, and promoting ecological alternatives.

Effective risk management reduces the number of accidents, improves transportation safety, and minimizes unforeseen costs. This involves identifying risks, evaluating them, and implementing controls.

Overall, the study highlights the importance of the interplay between the structural safety of vehicles and their adaptability to technical maintenance. This ensures high-quality and safe road transportation.

road transport, transport technologies, safety, structural safety of a vehicle, safety of transport operations

Одержано (Received) 04.11.2024

Прорецензовано (Reviewed) 02.12.2024

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2024

В.В. Аулін, проф., д-р техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

Д.О. Кульова, ст. вик., д-р філос.

Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна

А.В. Гриньків, ст. дослід., канд. техн. наук, **С.В. Лисенко**, доц, канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: AulinVV@gmail.com, d.coolava@gmail.com

Оцінювання ризиків несхоронних перевезень нафтопродуктів автомобільним транспортом

У статті проведено ідентифікацію та оцінювання ризиків, пов'язаних з перевезенням нафтопродуктів від нафтобаз до автозаправних станцій автомобільним транспортом. Розглянуто внутрішні фактори, зумовлені фізико-хімічними властивостями нафтопродуктів, такими як вогнебезпечність, вибухонебезпечність, випаровуваність та схильність до електризації, а також зовнішні фактори, включаючи механічні впливи, кліматичні умови, організаційні та технічні аспекти. За допомогою методу експертних оцінок визначено ймовірність виникнення ризиків і величину можливих наслідків, що дозволило встановити їх пріоритетність. Запропоновано рекомендації для зниження рівня ризиків, спрямовані на підвищення безпеки перевезень і схоронності нафтопродуктів.

нафтопродукти, фізико-хімічні властивості вантажів, транспортування, ризики, оцінювання ризиків, метод експертних оцінок, схоронність вантажів

Постановка проблеми. У сучасних умовах зростання обсягів перевезень небезпечних вантажів автомобільним транспортом питання забезпечення їх схоронності набуває важливого значення. В Україні з нафтобаз до автозаправних станцій (АЗС) транспортуються основні види нафтопродуктів, які користуються попитом серед споживачів. До бензинів належать марки А-92, А-95 та А-95 з присадками [1]. Бензин А-92, з октановим числом 92, використовується для автомобілів із середніми вимогами до якості пального, забезпечуючи належну роботу двигуна. Бензин А-95 є більш ефективним, рекомендованим для сучасних інжекторних двигунів завдяки його покращеним динамічним характеристикам. Особливе місце займає бензин А-95 з присадками, який містить спеціальні добавки, що покращують мийні, антифрикційні та антикорозійні властивості, підвищуючи ефективність роботи двигуна.

Дизельне паливо [2] представлено двома основними категоріями: стандартним дизельним паливом та паливом із покращеними характеристиками. Стандартне дизельне паливо використовується для більшості транспортних засобів (ТЗ) із дизельними двигунами, забезпечуючи їх стабільну роботу. Покращене дизельне паливо містить спеціальні присадки, які сприяють ефективнішому згорянню, знижують рівень викидів та підвищують стійкість роботи двигуна в умовах підвищених навантажень або екстремальних температур.

Врахування потенційно небезпечних властивостей нафтопродуктів є важливим з точки зору оцінювання ризиків та розробки заходів забезпечення схоронності під час їх транспортування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Загальне оцінювання ризиків для їх мінімізації, включає в себе етапи ідентифікації, аналізу та оцінки [3]. В процесі ідентифікації ризиків доцільним є визначення зовнішніх та внутрішніх факторів, які

впливають на схоронність нафтопродуктів під час транспортування [4]. Зовнішні фактори включають: механічні, фізичні, кліматичні, організаційні, соціальні.

До механічних факторів належать [5] удари, вібрація, статичні навантаження, поштовхи та тертя, які можуть виникати під час транспортування, навантаження, розвантаження або зберігання. Їх вплив обумовлений технічним станом цистерн, ТЗ, насосного обладнання та інфраструктури (дороги, перевантажувальні термінали). Несправність цистерн може призвести до механічного пошкодження тари, витоку палива та його втрати.

Вплив фізичних факторів включає сталі умови середовища транспортування, такі як температура всередині ТЗ, рівень вологості, запиленість повітря та світловий вплив. Для нафтопродуктів, зокрема бензину, критичними є низька температура спалаху та схильність до випаровування [6], що потребує герметичності цистерн та дотримання температурного режиму.

Кліматичні фактори є змінними та залежать від погодних умов або сезону. Серед них атмосферні опади (дощ, сніг), вітер, перепади температур при зміні кліматичних зон та вплив атмосферного тиску. Для дизельного палива та бензину [7] різкі температурні перепади можуть вплинути на їх фізико-хімічні властивості, знижуючи якість і об'єм через випаровування.

Неправильний вибір маршруту [8], недостатня кваліфікація персоналу та відсутність належного інструктажу й навчань є організаційними факторами. Невдало спланований маршрут може підвищити ризик ДТП, а недостатній рівень підготовки водіїв призводить до порушень правил транспортування, що особливо небезпечно для легкозаймистих вантажів. До соціальних факторів належать крадіжки та вандалізм, які можуть призводити до втрати частини вантажу [9], витоків або пошкодження цистерн. Бензин і дизельне паливо є високовартісними продуктами, що робить їх привабливими для розкрадання.

В процесі транспортування нафтопродуктів важливим є вплив внутрішніх факторів, до яких відносяться фізичні, хімічні та фізико-хімічні властивості вантажу [10]. Серед фізичних властивостей найбільш критичними є густина, в'язкість і текучість. Густина визначає об'єм і вагу вантажу, що безпосередньо впливає на параметри завантаження ТЗ. В'язкість і текучість визначають поведінку нафтопродуктів під час переміщення у трубопроводах, наливних системах та в умовах зміни температури під час транспортування. Хімічні властивості характеризують взаємодію вантажів із зовнішнім середовищем. Схильність до окислення може спричинити утворення осадів або змінити фізико-хімічні характеристики, що негативно впливає на якість продукту.

До основних фізико-хімічних властивостей нафтопродуктів [10], які створюють підвищену небезпеку під час їх перевезення та зберігання, належать вогнебезпечність, вибухонебезпечність і випаровуваність. Дані властивості підсилюють ризик виникнення статичної електризації, яка виникає через тертя або рух рідин у трубопроводах, цистернах чи під час наливно-розливних операцій. Накопичення електростатичного заряду на поверхні рідини або тари може призвести до утворення іскор. Це особливо небезпечно для нафтопродуктів із низькою провідністю, таких як бензин, оскільки вони мають обмежену здатність розсіювати електростатичні заряди. У разі досягнення критичної напруги може відбутися електричний розряд, що здатний запалити горючі пари у транспортних цистернах або під час вантажно-розвантажувальних робіт.

Ідентифікація ризиків, пов'язаних із транспортуванням нафтопродуктів, значною мірою залежить від конкретних етапів перевезення [11, 12] та супутніх вантажних операцій. Процес доставки нафтопродуктів від нафтобази до АЗС включає три основні етапи: навантаження, транспортування та розвантаження. Кожен із цих етапів

супроводжується специфічними операціями, які можуть створювати ризики для схоронності вантажу та безпеки процесу.

На етапі завантаження ТЗ нафтопродукти перекачуються з резервуарів нафтобази до цистерн. Процес вимагає суворого контролю за рівнем наповнення цистерн, забезпечення герметичності з'єднань та запобігання переповненню, яке може призвести до розливу палива. Несправність насосного обладнання або цистерн може спричинити пошкодження тари чи витік нафтопродуктів. Наступний етап передбачає перевезення нафтопродуктів спеціалізованими ТЗ, обладнаними герметичними цистернами, які мають відповідати встановленим нормативам. На завершальному етапі нафтопродукти перекачуються з транспортних цистерн до резервуарів АЗС.

Беззаперечне дотримання положень нормативно-правової бази під час транспортування нафтопродуктів є обов'язковим на кожному етапі перевезення. Компанії-оператори ринку нафтопродуктів мають право розробляти та застосовувати власні інструкції, методики та інші документи, пов'язані з експлуатацією АЗС, за умови їх відповідності чинним нормативним актам.

Постановка завдання. Метою завдання є оцінювання ризиків перевезення нафтопродуктів від нафтобази до АЗС автомобільним транспортом, що забезпечує визначення пріоритетності кожного окремого ризику і розробку заходів їх мінімізації.

Для реалізації поставленої мети в роботі вирішуються наступні завдання:

- провести ідентифікацію основних ризиків та причин несхоронності нафтопродуктів під час транспортування;
- провести оцінювання ризиків з застосуванням методу експертних оцінок;
- розробити рекомендації по мінімізації оцінених ризиків для нафтопродуктів.

Виклад основного матеріалу. Враховуючи особливості нафтопродуктів визначені істотні супутні ризики [13], що загрожують їх схоронності на різних етапах процесу транспортування (табл. 1).

Таблиця 1 – Основні типи ризиків та причини несхоронності нафтопродуктів при перевезенні

| Основні типи ризиків та їх сутність | Позначення ризиків $R_i, i = \overline{1, 7}$ |
|---|---|
| Витік нафтопродуктів через порушення герметичності шлангів і з'єднань під час наливно-розливних операцій | R_1 |
| Витік нафтопродуктів унаслідок небажаного руху ТЗ під час виконання наливно-розливних операцій | R_2 |
| Витік нафтопродуктів через механічні пошкодження цистерни, спричинені ДТП | R_3 |
| Вибух вантажу через утворення електростатичного заряду під час наливно-розливних операцій або руху ТЗ | R_4 |
| Втрати вантажу через випаровування, спричинені негерметичністю цистерни або системи з'єднань | R_5 |
| Розкрадання вантажу третіми особами або нечесним персоналом під час зупинок | R_6 |
| Зниження якості нафтопродуктів через наявність залишків попередніх вантажів або сторонніх речовин у цистернах | R_7 |

Джерело: розроблено авторами

Визначення рівня ризику потребує оцінки ймовірності його настання та величини можливих наслідків, для реалізації цієї мети, використовуються якісні, кількісні та напівкількісні методи оцінювання ризиків [14, 15]. Кількісні методи дозволяють отримати точні числові значення ризику, однак для їх застосування необхідна велика кількість вхідних даних, що не завжди можливо в умовах обмеженої інформації. У випадках, коли необхідні статистичні дані відсутні або є неповними, доцільно використовувати якісні та напівкількісні методи, які базуються на експертних оцінках, класифікаціях та шкалах оцінювання.

З метою оцінювання ризиків, пов'язаних із транспортуванням нафтопродуктів автомобільним транспортом, була залучена група незалежних експертів у кількості 6 осіб: 2 інженери-технологи, 2 фахівці з охорони праці, 1 логіст та 1 фахівець із контролю якості нафтопродуктів. Групі експертів були видані спеціально розроблені анкети з описом основних ризиків та детальним поясненням методики їх оцінювання. Експерти повинні оцінити кожен ризик за двома критеріями: ймовірністю його настання та величиною можливих наслідків для схоронності нафтопродуктів. Оцінювання здійснювалося за бальною шкалою від 1 до 10, де 1 відповідає мінімальному значенню, а 10 – максимальному. З метою обробки отриманих експертних оцінок розраховано середньозважену ймовірність настання ризику:

$$\bar{P}_i = \frac{\sum_{j=1}^n W_j \cdot P_{ij}}{\sum_{j=1}^n W_j}, \quad (1)$$

де \bar{P}_i – середньозважена ймовірність для і-го ризику;

W_j – ваговий коефіцієнт j-го експерта;

P_{ij} – оцінка ймовірності настання ризику від j-го експерта для і-го ризику;

n – кількість експертів.

Слід зазначити, що визначення ймовірності настання ризикових подій не є класичними ймовірностями, а являють собою бальні оцінки. Такий підхід дозволяє кількісно відобразити експертне сприйняття, що є необхідним для подальшого аналізу ризиків і визначення їх показників. Щоб привести отримані значення до класичної ймовірності, їх потрібно нормалізувати:

$$P_{ij}^{норм} = \frac{P_{ij}^{експ}}{10}, \quad (2)$$

де $P_{ij}^{норм}$ – нормалізоване значення ймовірності;

$P_{ij}^{експ}$ – середньозважена оцінка ймовірності.

Величину середньозважених наслідків від реалізації і-го ризику \bar{C}_i розраховували за формулою:

$$\bar{C}_i = \frac{\sum_{j=1}^n W_j \cdot C_{ij}}{\sum_{j=1}^n W_j}, \quad (3)$$

де C_{ij} – оцінка наслідків від j-го експерта для і-го ризику.

Оскільки оцінки ризиків надані групою експертів із різним рівнем досвіду та кваліфікацією то для забезпечення об'єктивності результатів доцільно врахувати вагу кожного експерта при вирішенні цього питання. Ваговий коефіцієнт експерта визначається на основі його кваліфікації, що відображає компетентність і досвід у відповідній галузі. Розрахунок вагових коефіцієнтів здійснювали за виразом:

$$W_j = \frac{Q_j}{\sum_{j=1}^n Q_j}, \quad (4)$$

де Q_j – кваліфікаційна оцінка j -го експерта;

n – кількість експертів.

На основі отриманих середньозважених значень ймовірності настання ризику (1) та його наслідків для кожного з визначених ризиків (3) розраховали інтегральний показник i -го ризику:

$$R_i = \bar{P}_i \cdot \bar{C}_i \quad (5)$$

Цей показник дозволяє комплексно оцінити рівень загроз при реалізації певних ризиків. Для підвищення достовірності та узгодженості результатів оцінювання ризиків використовували ітераційний підхід їх обговорення. Після первинного аналізу отриманих експертних оцінок було виявлено певні розбіжності у думках експертів щодо ймовірності настання та величини наслідків окремих ризиків.

На наступному етапі експертам запропоновано ознайомитись з узагальненими результатами оцінок та рекомендовано проведення додаткового обговорення у форматі повторної оцінки. При цьому кожен експерт мав можливість переглянути свої попередні оцінки. На основі середніх значень та обґрунтувань членів експертної групи проведена мінімізація крайніх значень оцінок та досягнуто більшої узгодженості. При цьому доречним є зазначити, що метод експертних оцінок, який застосовувався у дослідженні, містить елементи методу Дельфі, який передбачає ітераційний процес узгодження думок експертів.

Результати оцінювання ризиків групою експертів наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Результати оцінювання ризиків несхоронних перевезень нафтопродуктів автомобільним транспортом

| Ризик ($R_i, i = \overline{1,7}$) | Середньозважена ймовірність (\bar{P}_i) | Величина середньозважених наслідків (\bar{C}_i) | Інтегральний показник ризику (R_i) |
|-------------------------------------|---|---|--|
| R_4 | 8,17 | 9,17 | 74,95 |
| R_3 | 7,83 | 8,83 | 69,13 |
| R_1 | 7,00 | 8,00 | 56,00 |
| R_7 | 6,17 | 7,17 | 44,24 |
| R_2 | 5,83 | 6,83 | 39,83 |
| R_5 | 4,67 | 5,67 | 26,49 |
| R_6 | 4,50 | 5,17 | 23,27 |

Джерело: розроблено авторами

Отримані інтегральні показники ризику свідчать про те, що найбільш критичними ризиками є: R_4 – вибух через утворення електростатичного заряду 74.95; R_3 – витік нафтопродуктів унаслідок механічних пошкоджень цистерни в результаті ДТП 69.13 та R_1 – витік через порушення герметичності шлангів і з'єднань під час наливно-розливних операцій 56.00. Виявлено, що найменші значення ризиків мають випадки R_5 – втрати нафтопродуктів через випаровування та R_6 – розкрадання вантажу третіми особами, проте вони також потребують уваги та впровадження заходів для мінімізації їх впливу.

Аналіз отриманих результатів по кожному з ризиків (табл. 1) дозволив розробити і запропонувати заходи щодо підвищення безпеки транспортування, спрямованих на зменшення ймовірності виникнення ризикових подій та мінімізацію їх наслідків:

1. Для мінімізації ризику вибуху через утворення електростатичного заряду необхідно проводити заземлення цистерн і обладнання: використанням заземлювального ланцюга, контролем швидкості наливу рідин для уникнення надмірного накопичення зарядів, а також додаванням антистатичних добавок до нафтопродуктів. Заземлювальний ланцюг є обов'язковим елементом безпеки, оскільки він забезпечує безперервне відведення електростатичного заряду під час руху ТЗ, а також під час навантаження та розвантаження нафтопродуктів.

2. Під час транспортування водій повинен суворо дотримуватися правил дорожнього руху, зокрема уникати ризикованих маневрів, таких як обгін, оскільки це створює додаткову небезпеку для ТЗ, що перевозить легкозаймісті матеріали. Дотримання безпечної швидкості, вибір оптимального маршруту, уникнення перевантаження, правильне маркування ТЗ є необхідними умовами для мінімізації ризику витіку нафтопродуктів через механічні пошкодження цистерн під час ДТП.

3. З метою запобігання витіканню нафтопродуктів через порушення герметичності шлангів і з'єднань під час наливно-розливних операцій важливо застосовувати високоякісне обладнання, стійке до механічних пошкоджень, регулярно здійснювати огляд і технічне обслуговування, а також своєчасно проводити їх заміну. Крім того, слід впроваджувати системи автоматичного блокування операцій для зниження ризику аварійних ситуацій.

4. Перед початком наливу потрібно перевіряти чистоту цистерни, щоб уникнути зниження якості продукту, можливого забруднення або хімічної реакції з залишками попереднього вантажу.

5. Щоб зменшити ризик витікання нафтопродуктів внаслідок небажаного руху ТЗ потрібно контролювати його нерухомість за допомогою стоянкового гальма і додаткових фіксуючих пристроїв (наприклад підкладок під колеса).

6. Для мінімізації втрат вантажу через випаровування, спричинені негерметичністю цистерни або системи з'єднань, необхідно регулярно перевіряти герметичність обладнання, використовувати високоякісні ущільнювачі та дотримуватися вимог технічного обслуговування. Також важливо застосовувати системи контролю тиску та температури, щоб запобігти надмірному утворенню парів.

7. Для зменшення ризику розкрадання вантажу третіми особами або нечесним персоналом під час зупинок доцільно використовувати сучасні системи моніторингу та охорони, такі як GPS-трекери, датчики відкриття люків, а також відеоспостереження. Крім цього, на АЗС слід здійснювати перевірку якості нафтопродукту шляхом використання метроштоку зі спеціальною пастою (перевірка цистерни на наявність води, яку може залити в цистерну водій з метою розкрадання).

Отримані результати дослідження можуть слугувати основою для розроблення комплексної стратегії управління ризиками, що сприятиме підвищенню рівня безпеки та схоронності нафтопродуктів на всіх етапах транспортування.

Висновки:

1. Визначено основні зовнішні і внутрішні фактори, які впливають на схоронність перевезення нафтопродуктів автомобільним транспортом. Виявлено, що до внутрішніх факторів відносяться властивості даних вантажів, які несуть в собі потенційну небезпеку та вступають у взаємодію із навколишнім середовищем.

2. Проведено ідентифікацію основних ризиків та причин несхоронності нафтопродуктів на етапах транспортування (навантаження, перевезення, розвантаження) від нафтобаз до автозаправних станцій.

3. Проведено оцінювання ризиків із застосуванням методу експертних оцінок. Встановлено, що найбільшу величину мають ризики: вибух вантажу через утворення електростатичного заряду під час наливно-розливних операцій або руху транспортного засобу (74,95); витік нафтопродуктів через механічні пошкодження цистерни спричинені дорожньо-транспортними пригодами (69,13) та через порушення герметичності шлангів і з'єднань під час наливно-розливних операцій (56,00). Середнє значення ризику мають зниження якості через наявність залишків попередніх вантажів або сторонніх речовин у цистернах (44,24) та витік унаслідок небажаного руху транспортного засобу під час виконання наливно-розливних операцій (39,83). Найменше значення ризику у причин втрати вантажу через випаровування, спричинені негерметичністю цистерни або системи з'єднань (26,49) і розкрадання вантажу третіми особами або нечесним персоналом під час зупинок (26,27).

4. На основі результатів дослідження розроблено комплекс рекомендацій для мінімізації вибраних ризиків перевізного процесу для нафтопродуктів автомобільним транспортом.

Список літератури

1. ДСТУ 7687:2015. Бензини автомобільні Євро. Технічні умови: [зі Зміною № 1, чинною з 01-08-21, згідно наказу ДП «УкрНДНЦ» №161 від 30-04-21 (ІПС 4-2021)]. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2015. – 24 с.
2. ДСТУ 7688:2015. Паливо дизельне Євро. Технічні умови: [зі Змінами № 1 (ІПС 1-6-2019), № 2 (ІПС 2-8-2021) та Поправкою (ІПС 5-6-2020*)]. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2015. 24 с.
3. ДСТУ ІЕС/ISO 31010:2013. Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику. (ІЕС/ISO 31010:2009, IDT), Мінекономрозвитку України. Київ, 2015. 73 с.
4. Guo J., Luo C. Risk assessment of hazardous materials transportation: A review of research progress in the last thirty years. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2022. Vol. 9, Issue 4. P. 571–590. DOI: 10.1016/j.jtte.2022.01.004
5. Abid H. M., Shah Q. H., Faris W. F. The structural integrity assessment of a partially filled tank pertaining to liquid sloshing upon sudden brake applications. *Int. J. Vehicle Systems Modelling and Testing*, Vol. 6, Nos. 3/4. 2011. P. 307-317. DOI: 10.1504/IJVSMT.2011.044231
6. Дорошенко І. Ф., Люта В. Н. Огляд сучасних методик розрахунку втрат нафтопродуктів від випаровування за умов зберігання у наземних резервуарах. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 2012. Вип. 3(33). С. 81–90.
7. Бойченко С. В., Пузік О. Г., Топільницький П. І., Черняк Л. М., Романчук В. В., Бабатунд О., Каземір Л. Оцінка екологічного впливу нафтопереробного підприємства на навколишнє середовище. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2016. №4. С. 109–121.
8. Lavrukhin O., Kovalov A., Kulova D. Technological and economic estimation of efficiency of a route choice for transportation of dangerous goods. *SHS Web of Conferences*. 2019. Vol. 67. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1051/shsconf/20196702005>
9. Awodezi H., Mohammed S. U. Oil Pipelines Vandalism and Oil Theft: Security Threat to Nigerian Economy and Environment. *Journal of Environmental Law & Policy*. 2023. Vol. 3, Issue 1. P. 171–188. DOI: 10.33002/jelp03.01.05

10. Топільницький П. І., Романчук В. В., Ярмола Т. В. Дослідження властивостей нафт Передкарпатської нафтогазоносної області України. *Chemistry, Technology and Application of Substances*. 2019. Vol. 2, No 2. С. 102-109. DOI: 10.23939/ctas2019.02.102
11. Lavrukhin O., Kovalov A., Schevcenko V., Kyman A., Kulova D. Construction of an integrated criterion for estimating the consequences of emergencies involving dangerous goods. *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 2, Issue 3 (98). P. 25–31. DOI: 10.15587/1729–4061.2019.163442
12. Lavrukhin O., Vernyhora R., Schevcenko V., Kyman A., Shulika O., Kulova D., Kim K. Forming an automated technology to actively monitor the transportation of dangerous cargoes by railroad. *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 3, Issue 3 (105). P. 78–85. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.205862
13. Kumar U., Kumar A., Kumar N. Management of Risks Associated with the Transportation of Hazardous Materials. *Innovative Research in Civil Engineering: Theories and Practices*. 2024. Vol. 1. P. 299–306.
14. Radu L. D. Qualitative, Semi-Quantitative and Quantitative Methods for Risk Assessment: Case of the Financial Audit. *Audit Financiar*. 2009. Vol. 7, Issue 56. P. 643–657.
15. Шурда К. Е. Методи якісного та кількісного аналізу ризиків. *Збалансоване природокористування*. 2020. № 4. С. 64–72. DOI: 10.33730/2310-4678.4.2020.226622

References

1. DSTU 7687:2015. (2015). Benzyny avtomobilni Euro. Tekhnichni umovy: [zi Zminoyu № 1, chynnoyu z 01-08-21, zgidno nakazu DP «UkrNDNC» №161 vid 30-04-21 (IPS 4-2021)]. Kyiv: DP «UkrNDNC» [in Ukrainian].
2. DSTU 7688:2015. (2015). Palyvo dyzelne Euro. Tekhnichni umovy: [zi Zminamy № 1 (IPS 1-6-2019), № 2 (IPS 2-8-2021) ta Popravkoyu (IPS 5-6-2020*)]. Kyiv: DP «UkrNDNC» [in Ukrainian].
3. DSTU IEC/ISO 31010:2013. (2015). Keruvannya ryzykom. Metody zahalnoho otsiniuvannia ryzyku. (IEC/ISO 31010:2009, IDT). Kyiv: Minekonomrozvytku Ukrainy [in Ukrainian].
4. Guo, J., & Luo, C. (2022). Risk assessment of hazardous materials transportation: A review of research progress in the last thirty years. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 9(4), 571–590. DOI: 10.1016/j.jtte.2022.01.004 [in English].
5. Abid, H. M., Shah, Q. H., & Faris, W. F. (2011). The structural integrity assessment of a partially filled tank pertaining to liquid sloshing upon sudden brake applications. *International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing*, 6(3/4), 307–317. DOI: 10.1504/IJVSMT.2011.044231 [in English].
6. Doroshenko, I. F., & Lyuta, V. N. (2012). Ohliad suchasnykh metodyk rozrakhunku vtrat naftoproduktiv vid vyparuvuvannia za umov zberihannia u nazemnykh rezervuarakh. *Naukovyi visnyk IFNTUNG*, 3(33), 81–90 [in Ukrainian].
7. Boichenko, S. V., Puzik, O. H., Topilnytskyi, P. I., Cherniak, L. M., Romanchuk, V. V., Babatund, O., & Kazemir, L. (2016). Otsinka ekolohichnoho vplyvu naftopererobnoho pidpriemstva na navkolyshnie seredovyshche. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia*, 4, 109–121 [in Ukrainian].
8. Lavrukhin, O., Kovalov, A., & Kulova, D. (2019). Technological and economic estimation of efficiency of a route choice for transportation of dangerous goods. *SHS Web of Conferences*, 67, 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1051/shsconf/20196702005> [in English].
9. Awodezi, H., & Mohammed, S. U. (2023). Oil Pipelines Vandalism and Oil Theft: Security Threat to Nigerian Economy and Environment. *Journal of Environmental Law & Policy*, 3(1), 171–188. DOI: 10.33002/jelp03.01.05 [in English].
10. Topilnytskyi, P. I., Romanchuk, V. V., & Yarmola, T. V. (2019). Research of oil properties in the Precarpathian oil and gas region of Ukraine. *Chemistry, Technology and Application of Substances*, 2(2), 102–108. DOI: 10.23939/ctas2019.02.102 [in Ukrainian].
11. Lavrukhin, O., Kovalov, A., Schevcenko, V., Kyman, A., & Kulova, D. (2019). Construction of an integrated criterion for estimating the consequences of emergencies involving dangerous goods. *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies*, 2(3)(98), 25–31. DOI: 10.15587/1729–4061.2019.163442 [in English].
12. Lavrukhin, O., Vernyhora, R., Schevcenko, V., Kyman, A., Shulika, O., Kulova, D., & Kim, K. (2020). Forming an automated technology to actively monitor the transportation of dangerous cargoes by railroad. *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies*, 3(3)(105), 78–85. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.205862 [in English].
13. Kumar, U., Kumar, A., & Kumar, N. (2024). Management of Risks Associated with the Transportation of Hazardous Materials. *Innovative Research in Civil Engineering: Theories and Practices*, 1, 299–306 [in English].
14. Radu, L. D. (2009). Qualitative, Semi-Quantitative and Quantitative Methods for Risk Assessment: Case of the Financial Audit. *Audit Financiar*, 7(56), 643–657 [in English].

15. Shurda, K. E. (2020). Metody yakisnoho ta kilkisnoho analizu ryzykiv. *Zbalansovane pryrodokorystuvannia*, 4, 64–72. DOI: 10.33730/2310-4678.4.2020.226622 [in Ukrainian].

Viktor Aulin, Prof., DSc.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Daria Kulova, Senior Lecturer, Ph.D tech. sci.

Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine

Andrey Hrinkiv, Senior Researcher, PhD tech. sci., **Serhii Lysenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Risk Assessment of Non-Secure Transportation of Petroleum Products by Road Transport

The article identifies and assesses risks associated with the transportation of petroleum products by road from oil depots to gas stations. The main external and internal factors affecting cargo safety have been determined, including the physicochemical properties of petroleum products such as flammability, explosiveness, volatility, and susceptibility to static electrification, as well as external factors, including mechanical impacts, climatic conditions, organizational, and technical aspects.

The primary risks at the transportation stages (loading, transit, unloading) have been identified, and the key causes of petroleum product losses have been established. Risk assessment was performed using the expert evaluation method, involving a detailed analysis of probability and consequences for each identified risk. This approach enabled the classification of risks by priority, with the highest risks including cargo explosion caused by static electricity during loading and unloading operations, leaks of petroleum products due to mechanical damage to the tank caused by road accidents, and breaches of hose integrity during loading and unloading operations. Medium risks are associated with the quality degradation of petroleum products due to residues of previous cargoes in the tanks and leaks resulting from unwanted vehicle movement during loading and unloading operations. The lowest risks pertain to cargo losses due to evaporation or theft during stops. The risk levels were quantified, allowing for the prioritization of targeted interventions.

Based on the analysis, a comprehensive set of recommendations has been developed to minimize the identified risks. These include regular technical inspections and maintenance of tanks and vehicles, implementation of advanced monitoring systems, adherence to strict safety protocols during loading and unloading operations, and continuous training for personnel. Additionally, maintaining a controlled temperature regime and ensuring the use of anti-static measures were highlighted as critical for enhancing the safety and integrity of transported petroleum products.

petroleum products, physicochemical properties of cargo, transportation, risks, risk assessment, expert evaluation method, cargo integrity

Одержано (Received) 04.11.2024

Прорецензовано (Reviewed) 29.11.2024

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2024

УДК 631.145

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.214-227](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.214-227)

В.В. Аулін, проф., д-р. техн. наук., **Д.В. Голуб**, доц., канд. техн. наук, **А.В. Гриньків**, ст.дослід., канд. техн. наук, **С.В. Лисенко**, доц., канд. техн. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: AulinVV@gmail.com, Dimchik529@gmail.com, AVGrinkiv@gmail.com,
SV07091976@gmail.com*

Формування логістичних проектно-орієнтованих кластерів у регіональних ланцюгах постачань агропродукції

Розглянуто поняття логістичного проектно-орієнтованого кластеру, як ефективної регіональної економічної одиниці, яка дає змогу вирішувати проблеми регіону. Виділено переваги такого виду кластерів та запропоновано його адаптацію в структуру економіки Кіровоградської області.

Проаналізовано низку основних бар'єрів на шляху створення логістичних проектно-орієнтованих кластерів регіональних систем на прикладі Кіровоградської області. Здійснено огляд інвестиційних проектів та існуючої логістичної інфраструктури Кіровоградської області. Запропоновано в галузі логістики створення великого логістичного розподільчого центру для забезпечення оптимального та якісного просування потоку агропродукції від виробників до споживачів, включаючи послуги з переробки, транспортного, складського та інформаційного супроводу.

Представлено модель організації учасників логістичного проектно-орієнтованого кластера та виявлено тенденцію інтеграції кластерів із логістичними ланцюгами постачання, сформульовано гіпотезу про їх взаємодію та представлено концепцію трансформації.

логістичний проектно-орієнтований кластер, адаптація, регіональна система, логістичні ланцюги, агропродукція, концепція, трансформація

Постановка проблеми. Логістичні проектно-орієнтовані кластери можуть стати засобом ефективної реалізації інвестиційних проектів, що реалізуються на території Кіровоградської області у тому числі, які покликані підвищити конкурентоспроможність регіону на українському та міжнародному ринку [1, 3].

Можливо виділити наступні переваги логістичних проектно-орієнтованих кластерів:

- мобільність кластера (після реалізації інвестиційного проекту кластер має можливість трансформуватися в інший кластер для реалізації іншого проекту);
- гнучкість кластера (наявність серед учасників кластера представників малого та середнього бізнесу дає можливість швидко реагувати на зміни попиту);
- інноваційність кластера (спеціалізація учасників кластера дає можливість активного формування та впровадження інновацій).

Логістичний проектно-орієнтований кластер – це ефективна регіональна економічна одиниця, яка дає змогу вирішувати проблеми регіону. З цього випливає, що можна прогнозувати майбутню структуру економіки Кіровоградської області як кілька взаємозалежних логістичних проектно-орієнтованих кластерів. Кластери взаємодіятимуть один з одним на принципі співробітництва, за збереження принципу одночасної кооперації та конкуренції [6]. Різні підприємства, організації, фірми, компанії різних кластерних систем об'єднуюватимуться в логістичні проектно-орієнтовані кластери для реалізації прийнятих інвестиційних проектів [2, 4, 5, 7, 8]. Таким чином, економіка

Кіровоградської області буде гнучкою, але в той же час стійкою конкурентоспроможною системою взаємопов'язаних елементів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Кластерний підхід прийнято до управління розвитком економічної системи на різних рівнях у рамках реалізації інноваційної політики країн Євросоюзу [12-14]. Це узгоджується з основними положеннями стратегічних документів, таких як Національна кластерна стратегія, Національна програма розвитку кластерів, Програма розвитку кластерів, «Маніфест кластерів ЄС», «Європейський кластерний меморандум», «Кластерні програми в Європі та за її межами», «Європа 2020: «Стратегії розумного, сталого та інклюзивного зростання», «Європа 2020».

Продуктивність підвищується разом із потужністю кластера: базовий і середньопродуктивний кластери мають на 10-15% кращу продуктивність, ніж середньопродуктивний, а високопродуктивний кластер має вдвічі кращу продуктивність, ніж середньопродуктивний (140%) [12, 13].

Розглядаючи Україну, слід зазначити, що забезпечення сталого та збалансованого розвитку АПК вимагає дослідження і впровадження кластерного підходу у стратегічні галузі національної економіки. Це не суперечить положенням Угоди про асоціацію між Україною та ЄС, Стратегії національної безпеки України, Національної стратегії регіонального розвитку на 2021-2027 роки та Стратегії регіонального розвитку до 2027 року.

Згідно стратегії регіонального розвитку на 2021-2027 роки є необхідність формувати міжрегіональні та національні кластери, що не поступаються кластерам економік провідних країн. Приймається до уваги також інтернаціоналізація кластерних ініціатив [12].

У цьому контексті кластерна структура є потужним інструментом та ефективним механізмом системи управління галузями економіки. При цьому враховується вплив інституційних змін у національних економіках та глобалізація конкуренції. Визнано різні типи кластерів ефективною формою мережевої співпраці. В умовах глобалізації та євроінтеграції учасників ринку сільськогосподарської продукції є пріоритетними для реалізації стратегій розвитку агропромислового виробництва [9-11].

Дослідженням проблем кластерів в економіці, формуванням їх типів та реалізацією займаються ряд зарубіжних вчених: M. Delgado, P. Dussauge, B. Garrette, N. Grashof, M. Enright, M. Porter, M. Preveser, S. Stem, W. Mitchell, D. Fornahl, R. Hassink, A. Kowalski, O. Kwilinski, M. Mackiewicz, S. Morgulis-Yakushev, G. Swann, M. Szuster.

Питання розвитку кластерного підходу в національній економіці розробляють і українські вчені. С. Соколенко [11], започаткував кластерний рух в Україні, досліджував кластерні в економіці країни, регіонів і галузей, вивчав кластерізацію на національному і глобальному рівнях. М. Войнаренко [15] приділив особливу увагу побудові і впровадженню кластерних моделей в регіонах України.

D. L. Putri [16] на основі кластерного підходу створював моделі стратегічного планування бізнесу. Стейкхолдерами (зацікавленими юридичними особами) є: аграрний сектор, державні організації, органи місцевого самоврядування, науково-дослідні та навчальні заклади, організації підтримки інновацій, підприємства, фірми, компанії та державні установи на території. Вони є учасниками сприяння побудови моделі агропромислового кластеру. Зазначений кластер зможе покращити масштаби аграрного сектору та посилити регіональну інноваційну систему.

A. Valencia, J. Qiu, N.B. Chang [17] свідчить, що моделі стійкості розвитку і кластерізації в міських та сільськогосподарських мережах є важливими для аналізу діяльності таких систем. Н. В. Mahajan [18] досліджує проблему «розумного»

агропромислового виробництва з розробками "Інтернету речей" як технології Індустрії 4.0 і протоколу Lightweight Clustering Protocol for Industry 4.0 Enabled Precision Agriculture (LCIPA). При цьому будуються і використовуються кластерні алгоритми.

Постановка завдання. Метою даної роботи є розробка моделі організації учасників логістичного проєктно-орієнтованого кластера постачань агропродукції, на прикладі Кіровоградської області.

Виклад основного матеріалу. Варто зазначити, що існує низка бар'єрів на шляху створення логістичних проєктно-орієнтованих кластерів у Кіровоградській області. Ці бар'єри, водночас, є передумовами створення кластерів, оскільки саме створення кластерних структур дозволяє у тому чи іншою мірою подолати проблемні ситуації. Були виділені наступні основні бар'єри:

- недостатня розвиненість логістичної інфраструктури;
- недостатньо ефективного використання економічного потенціалу регіону (незавантажені виробничі потужності, обсяг виробництва нижче максимально можливого, висока частка відходів та втрат у процесі переробки сировини та ін.);
- використання застарілих технологій виробництва та комунікацій;
- відсутність міцних, гнучких зв'язків між підприємствами-постачальниками, виробниками, дистриб'юторами, перевізниками, що ґрунтуються на принципі партнерства, низький рівень кооперації;
- необхідність удосконалення бізнес-процесів на багатьох підприємствах для зниження логістичних витрат та підвищення якості продукції (послуг);
- переважання короткострокового планування на підприємствах над довгостроковими конкурентними стратегіями, тоді як повний цикл розвитку регіонального кластера становить середньому від 7 до 10 років;
- недостатній рівень підтримки учасників кластера з боку регіональної влади.

Водночас варто зазначити, що у регіоні є величезний ресурсний, виробничий, трудовий, фінансовий та споживчий потенціал для створення кластерів.

Здійснено огляд інвестиційних проєктів Кіровоградської області в період з 2008 по 2022 рік. Також проведено огляд існуючої логістичної інфраструктури Кіровоградської області. Серед усіх інвестиційних проєктів, реалізованих в області, виділяються пріоритетні проєкти. Перелік пріоритетних проєктів із 2008 по 2022 роки представлено на офіційному Інвестиційному порталі Кіровоградської області, Офіційному порталі Міністерства економіки України, Міністерства розвитку громад та територій України, Офіційному інтернет-порталі Міністерства аграрної політики та продовольства України та в Інвестиційних паспортах.

Для надання проєкту статусу «пріоритетний» оцінюються такі критерії: обсяг інвестицій, відповідність основним пріоритетам соціально-економічного розвитку області, бюджетна ефективність, соціальна ефективність, мультиплікуючий ефект.

Проєкти Кіровоградської області спрямовані на:

- розвиток рослинництва, м'ясного та молочного тваринництва;
- розвиток рибного комплексу;
- нарощування обсягів виробництва у галузі тваринництва, птахівництва та рослинництва, оновлення обладнання;
- розвиток у сфері тваринництва: нарощування обсягів виробництва, будівництво та ремонт тваринницьких комплексів, оновлення автопарку;
- розширення та модернізація молокопереробного виробництва;
- розвиток молочної галузі та харчової промисловості в цілому;
- створення мережі сучасних заготівельних пунктів для зберігання та

переробки продукції.

Проекти Кропивницького стосуються:

- розвитку енергетичного комплексу;
- створення особливої економічної зони "Технологічна долина";
- розвитку транспортно-логістичного комплексу.

В галузі логістики передбачається створення великого логістичного розподільчого центру для забезпечення оптимального та якісного просування потоку сільгосппродукції від виробників до споживачів, включаючи послуги з переробки, транспортного, складського та інформаційного супроводу.

Для вирішення проблеми затягування реалізації інвестиційних проектів у області можна створити логістичні проектно-орієнтовані кластерні структури. Для цього є всі умови: є лідируючі фірми, підприємства, компанії які випускають або можуть випускати високо конкурентоспроможну продукцію, існують мережі обслуговуючих підприємств, які покликані забезпечувати безперерійність випуску продукції провідних фірм, в наявності величезний ресурсний потенціал регіону, має місце наявність трудових ресурсів, високий рівень державної підтримки.

Для великих комплексних проектів, які передбачають велику кількість учасників, різноспрямовані виробництва та комплекси послуг, можна запропонувати модель організації учасників логістичного проектно-орієнтованого кластера, представлену на рисунку 1.

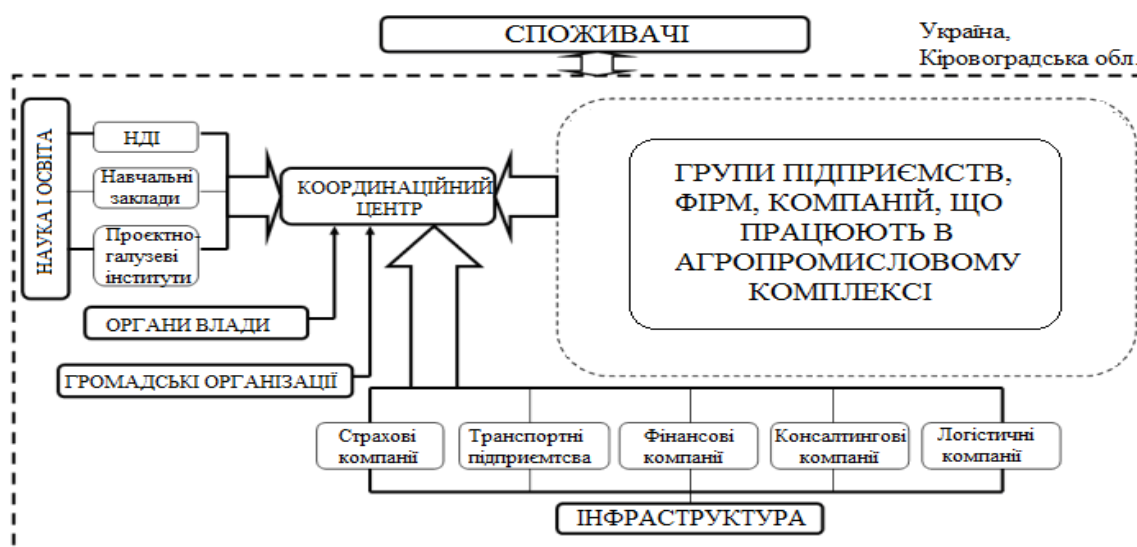


Рисунок 1 – Модель організації учасників логістичного проектно-орієнтованого кластера

Джерело: розроблено авторами

В інвестиційній стратегії Кіровоградської області до 2030 року слово "кластер", "кластерна структура", "кластерна політика" зустрічається кілька разів, проте відсутня інформація про методику створення кластера та методику управління ним. Це ускладнює для підприємств, фірм, компаній, організацій - потенційних учасників кластера, розуміння їхньої можливої ролі у реалізації кожного інвестиційного проекту та тих вигод, які вони можуть отримати від участі у кластері.

Варто відзначити задатки плідної співпраці бізнесу, влади та наукових організацій у рамках реалізації цих проектів. Кластери сформовані, а проекти

знаходяться на різних стадіях реалізації. Більшість кластерів можна ідентифікувати, як ті, що перебувають на початковій стадії розвитку. Як показує практика реалізації проєктів, є побоювання, що подальшого розвитку кластери можуть не одержати з погляду розвитку кооперації, підвищення якісного рівня взаємодії учасників кластерів тощо. Це обумовлює, що реальна економічна ефективність від реалізації проєктів буде значно нижчою, ніж можна було очікувати, незважаючи на наявність величезного ресурсного потенціалу в Кіровоградській області для переходу на наступні стадії розвитку. Також у відкритих джерелах практично немає інформації про структуру кластера, внутрішні процеси, систему управління кластером, заходи в рамках розвитку партнерства і т.д. Хоча позитивний досвід передових кластерів є дуже корисним з погляду інших проєктів.

При цьому логістичні проєктно-орієнтовані кластерні структури на території Кіровоградської області можуть стати ефективними інструментами їх реалізації, а також інших великих інвестиційних проєктів, які дозволять вирішити низку найважливіших проблем в економіці області, сприятимуть зміцненню та розвитку економічної ситуації в регіоні, і навіть сприяти зростанню конкурентоспроможності регіону, як у всеукраїнському, так і міжнародному ринку.

Аналіз опублікованих результатів досліджень дозволяє виділити когнітивний тренд міркувань, пов'язаний із трансформацією кластерних структур у ланцюгах постачання. Це зв'язано з еволюцією різновидів кластерних проявів, з різними поясненнями трансформаційних процесів у кластерах. Можна сказати, що виявлена тенденція інтеграції кластерів із логістичними ланцюгами постачання актуалізує дослідження щодо розширення методологічних аспектів кластерних утворень.

Кластер, як категорійне поняття, знаходиться у просторі управлінських, методологічних форматів. Це свідчить про доцільність його використання при проєктуванні та формуванні концептуальних підходів до управління територіальними чи галузевими економічними системами. Можна сказати, що створення кластерів сприяє активізації та вдосконаленню інноваційного середовища регіону. В той час одночасно інновація управління регіонами виявляється у сфері логістики, а саме: сучасний інтегративний інструмент ефективного управління потоками (наприклад, рухом товару) - це концептуальний підхід з точки зору управління ланцюгами постачання.

При розгляді двох підходів до управління регіональними ланцюгами постачань, мультиплікативного та інвестиційного (проєктного), виявили, що найбільше підходить до формування кластерів у нашому регіоні саме другий підхід.

В зв'язку з цим можна сформулювати гіпотезу про взаємодію ланцюгів постачання та кластерів:

- ланцюги постачання можуть функціонувати в кластерах;
- кластери можуть функціонувати в ланцюгах постачання.

Ця гіпотеза може бути методологічно представлена у вигляді процесу трансформації структури кластера у ланцюгах постачань (рис. 2, табл. 1).



Рисунок 2 - Концепція трансформації кластерів у ланцюгах постачання

Джерело: розроблено авторами

Запропонована методологія вже зустрічається практично в агропромисловому комплексі нашого регіону. У фермерів, дрібних сільгоспвиробників, які займаються виробництвом молока, існує проблема обмеженості входу в ланцюги постачання великих торгових мереж, у зв'язку з тим, що обсяги фермерів не цікаві мережам. Ця проблема стимулювала фермерів до кооперації - вони почали кооперуватися для акумулювання своїх потоків, щоб сукупний потік задовольняв вимогам входу до ланцюга постачання мережників. Це дозволило їм вбудуватися в регіональні ланцюги постачання.

Таблиця 1 – Типи та характеристика структури кластера

| Тип структури кластера | Назва кластера | Каталізatori, еволюційні перетворення |
|------------------------|--|--|
| 1-й тип | Пухкий кластер за М. Портером (наприклад, фермерське господарство) | Промислова спрямованість, об'єднання за галузевим принципом |
| 2-й тип | Галузевий кластер | Необхідність підвищення показників результативності та прибутковості підприємств та кластера - диференціація за видами продукту |
| 3-й тип | Монокластер (багато) | Відсутність гнучких зв'язків між учасниками, потреба в кооперації – кооперація |
| 4-й тип | Кооперативний (консолідаційний) кластер | Орієнтація на масштаб та необхідність пристосування до масштабного ланцюга постачань – координація дій, тотальна оптимізація, інтеграція |
| 5-й тип | Логістичний проєктно-орієнтований кластер | Входження до регіонального ланцюга постачань - інтеграція |
| 6-й тип | Кластер, інтегрований у ланцюг постачань | Розширення – міжнародний кластер |

Джерело: розроблено авторами

Фермери діяли так:

1. Фермери у сфері молочного виробництва почали працювати на принципах співробітництва та кооперації (по суті виник «пухкий» кластер).

2. Шляхом подальшої кооперації, об'єднання зусилля, взаємного використання ресурсів, інтеграції та оптимізації процесів підприємства сформували по суті проектно-орієнтований кластер, і синергія їх молочних потоків досягла мінімального критерію мережевого ритейлу за потужністю, ціною, якістю, логістичною організацією, що дозволило їм почати роботу з мережами.

3. Після вбудовування в регіональні ланцюги постачань торгових мереж підприємства кваліфікувалися як логістичні кластери регіонального ланцюга постачань та практично стали кластерною логістичною проектно-орієнтованою підсистемою регіонального ланцюга постачань у молочній галузі.

Можна коротко узагальнити результат проведених міркувань: логістичний проектно-орієнтований кластер - це одна з форм розширення інтегрованих комунікацій у ланцюгах постачань.

Одним з основних напрямів підвищення стійкості розвитку сільських територій є диверсифікація економіки та технологічне оновлення її галузей, насамперед в АПК, за рахунок: підтримки ефективної зайнятості у сфері малого та середнього сільськогосподарського підприємництва; споживчої кооперації, включаючи селянські (фермерські) господарства та особисті підсобні господарства; стимулювання збільшення робочих місць у несільськогосподарських сферах діяльності [12, 13].

Питання державної підтримки малих форм господарювання (фермерські господарства) є актуальним для Кіровоградської області.

У фермерських господарств області існують наступні проблеми:

1. Дрібні фермерські господарства зазнають труднощів при виході на ринки збуту, оскільки найбільшу частку ринку займають великі торгові мережі, які й витісняють їх. А торговим мережам працювати з фермерами, як із постачальниками, не завжди цікаво через малі обсяги виробництва.

2. Велика частка доходів від реалізації сільгосппродукції посідає сферу посередників.

3. Висока частка імпорту продовольства з інших регіонів. Висока собівартість продукції та частка логістичних витрат. Застаріла матеріально-технічна база.

Упродовж озвучених вище проблем мереж, варто відзначити, що ринок Кіровоградської області продовжує активно насичуватися державними та локальними роздрібними торговельними мережами. Обіг роздрібною торгівлю торгових мереж у Кіровоградській області в 2017 р. склав 138,7 млрд. гривень, або **27,1%** обороту роздрібною торгівлю області. У 2018 році оборот роздрібною торгівлю торгових мереж склав 172,8 млрд. гривень., що на 25% більше за попередній рік. У 2019 році оборот роздрібною торгівлю в мережах склав уже **191,1** млрд. гривень, чи 33 % від загального обороту роздрібною торгівлю області. Цей показник збільшився на 11% порівняно з 2018 роком. У 2020 році цей показник склав уже 209,9 млрд. грн., або 37,3% обороту роздрібною торгівлю області. Показник виріс на 10% порівняно з 2019 роком».

Зазначимо, що торговельні мережі витісняють об'єкти малого та середнього бізнесу, викликаючи диспропорції у розвитку форматів торгівлі, що негативно впливає на рівень конкуренції.

Вжиті заходи з боку законодавчої влади для вирішення цієї проблеми, такі як запровадження нормативів мінімальної забезпеченості населення площею стаціонарних торгових об'єктів, а також організація ярмарків, на жаль, не призвели до значного розширення можливостей допуску фермерів до роздрібного ринку.

Створення кооперативів було центральним питанням підпрограми «Підтримка малих форм господарювання» відомчої цільової програми «Про розвиток сільськогосподарської кооперації на період до 2030 року». Основною метою програми було створення сприятливих умов для об'єднання приватних виробників сільгосппродукції до кооперативів для зниження собівартості товарів на ринку збуту, а також розширення застосування інноваційних технологій для підвищення якості готового продукту.

У сучасних умовах господарювання в Україні склалася практика, що більшість грошової маси, що утворилася на всіх етапах переробки та реалізації сільгосппродукції, осідає у компаній, що надають послуги з упаковки, зберігання, транспортування та збуту товару. Сільгоспвиробники як виторг отримують лише незначну частину від кінцевої вартості товару. Таким чином, фінансові потоки залишають сільськогосподарську галузь, що негативно позначається на можливості досягнення цілей програми.

Говорячи про програму з позиції логістики та враховуючи вищевикладену проблему «відпливу» фінансових потоків із сільськогосподарської галузі, можна інтерпретувати головну мету Програми як формування стійких кіл постачань, які гарантують довгострокову та вигідну співпрацю сільгоспвиробників, з метою зниження власних витрат за рахунок самостійного забезпечення, пов'язаного з виробництвом та збутом товару кінцевому споживачеві. Через те, що для забезпечення повного циклу виробництва необхідні серйозні основні фонди, то кожному окремо взятому виробнику складно самостійно забезпечити себе, однак при колективному господарюванні, капітальні вкладення можуть бути економічно доцільними.

Відповідно до запропонованої в роботі концепції шлях вирішення проблем агропромислового комплексу з кооперації дрібних та середніх сільгосптоваровиробників міститься у створенні регіональних логістичних проектно-орієнтованих кластерів. При цьому для створення логістичного проектно-орієнтованого кластера необхідні такі основні складові:

- центральні (провідні, фокусні) підприємства, фірми, компанії - «ядро» кластера, що мають сучасні виробничі потужності, здатні забезпечити стабільне та якісне виробництво кінцевих продуктів;
- конкурентоспроможність підприємств, фірм, компаній – учасників кластера;
- мережу логістичних операторів, що забезпечує безперебійне просування потоків у ланцюгах постачання кластера;
- бізнес-клімат у регіоні (рівень розвитку логістичної інфраструктури, рівень наукового, освітнього та кадрового потенціалу регіону, рівень залучення інвестицій у регіоні та ін.)

Кластери можуть створюватися двома шляхами: з ініціативи органів державної влади (шлях I) або стихійно, коли підприємства, фірми, компанії та організації самі починають кооперуватися в ході реалізації спільних проектів та програм (шлях II) (рис. 3).

Відомо, що будь-який кластер проходить через певні стадії життєвого циклу:

1. Агломерація (на території кластера є підприємства, фірми, компанії та організації, які можуть стати його учасниками).
2. Виникає кластер (між учасниками кластера виникають коопераційні зв'язки, зростає рівень спеціалізації).
3. Кластер, що розвивається (розширюється склад учасників, посилюється інформаційний обмін, рівень кооперації зростає).

4. Зрілий кластер (кластер досяг деякого критичного складу учасників, зв'язки стабільні, механізм функціонування кластера налагоджений).

5. Трансформація (зміна кластера, викликана змінами ринку, технологій, економічної ситуації у регіоні та інших.).

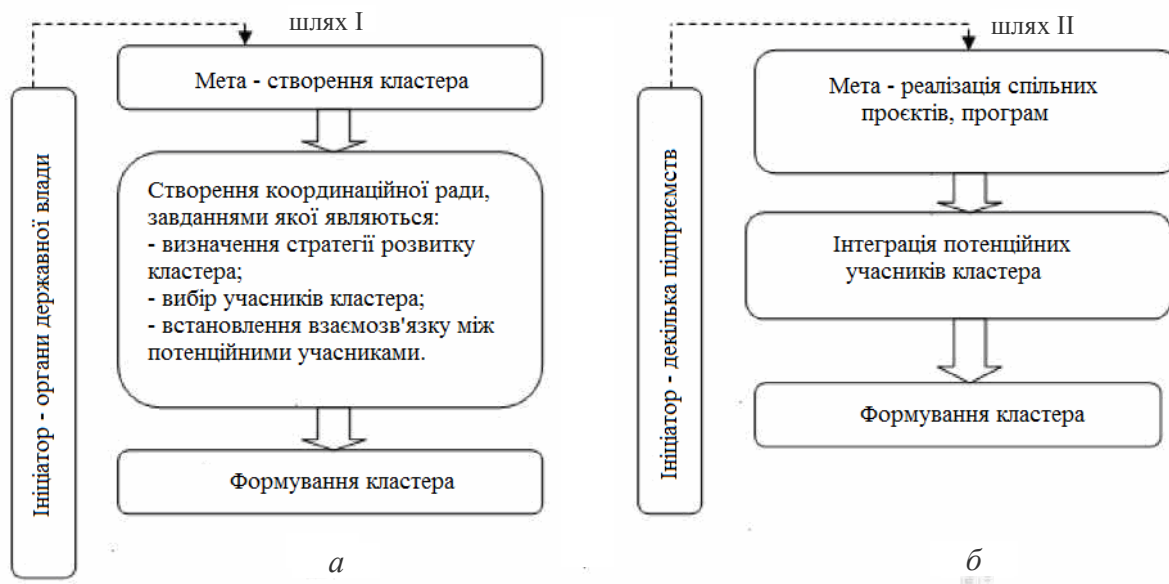


Рисунок 3 – Можливі шляхи створення кластера: а - шлях I; б - шлях II

Джерело: розроблено авторами

Логістичні проєктно-орієнтовані кластери в т.ч. мають такі ж стадії життєвого циклу. Однак специфікою такого роду кластерів є інвестиційний проєкт, навколо якого і будується функціонування кластера: учасники вибираються на підставі оцінки їх ресурсів щодо повного забезпечення потреби в них, зазначеної в проєкті. Головною метою, окрім накопичення капіталу, є ефективна реалізація інвестиційного проєкту. У цьому, кластер може бути більш гнучким, тобто з часом він повинен адаптуватися до умов довкілля.

Варто зазначити, що для логістичного проєктно-орієнтованого кластера останній етап життєвого циклу – трансформація, особливо важливий. Оскільки даний тип кластера є тимчасовою структурою, то після реалізації проєкту кластер може припинити своє існування, або трансформуватися в інший кластер, створений для реалізації іншого інвестиційного проєкту, який має іншу мету. При трансформуванні кластера крім мети може змінитися склад учасників (великі підприємства, фірми, компанії переважно залишаються у складі кластера, додаються інші учасники), межі кластера та інші характеристики. Наприклад, кластер створювався для реалізації інвестиційного проєкту з метою розвитку певного регіону (міста) до планових показників. З часом показники розвитку регіону (міста) зросли до запланованих чи стали вищими, і кластер трансформувався, оскільки досяг мети. Тепер його метою може стати, наприклад, вихід регіону або міста на місце в Україні або світі з виробництва якого-небудь продукту. Після досягнення поставленої мети кластер знову трансформується для досягнення нової мети. (рис. 4).

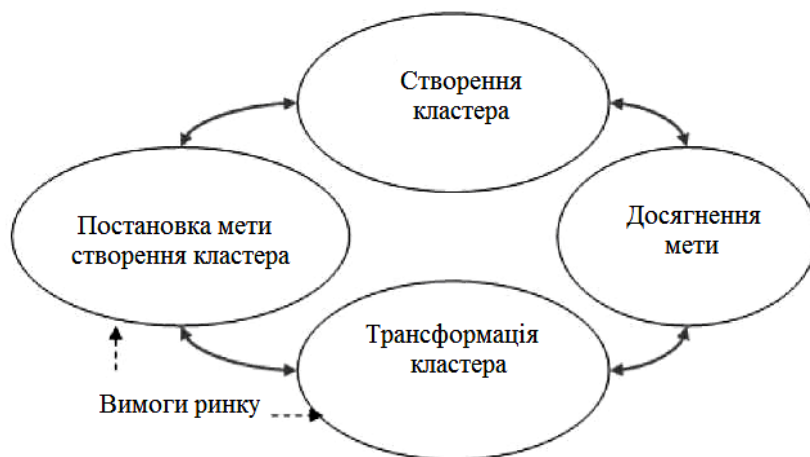


Рисунок 4 – Цикл формування логістичного проектно-орієнтованого кластера

Джерело: розроблено авторами

Концепція формування логістичного проектно-орієнтованого кластера представлена на рисунку 5.



Рисунок 5 – Концепція трансформації логістичних проектно-орієнтованих кластерів

Джерело: розроблено авторами

В основі заключного етапу трансформації лежить принцип безперервного розвитку логістичного проектно-орієнтованого кластера, який відображено на рисунку 6.

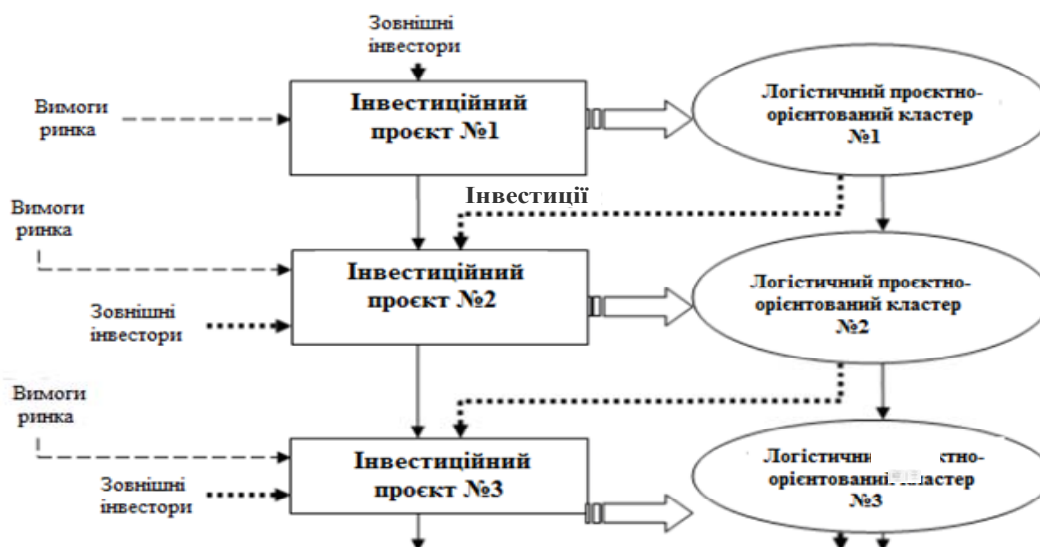


Рисунок 6 – Принцип безперервного розвитку логістичного проектно-орієнтованого кластера

Джерело: розроблено авторами

Алгоритм формування логістичного проектно-орієнтованого кластера представлено на рисунку 7.

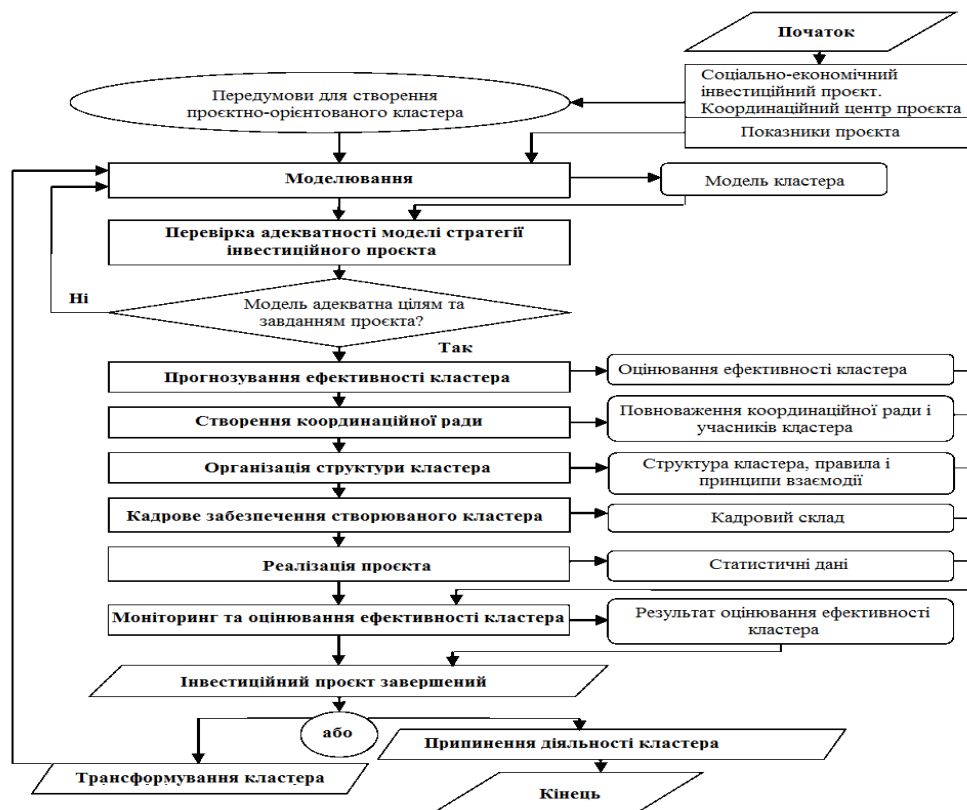


Рисунок 7 – Алгоритм формування логістичного проектно-орієнтованого кластера

Джерело: розроблено авторами

Таким чином, проектно-орієнтований кластер може виникнути у будь-якому місці, де функціонують хоча б кілька підприємств, фірм, компаній. Не можна точно визначити час, коли кластер створено. Кластера як такого може не бути, але водночас може бути потенціал його створення. На даному етапі кластер можна назвати «сплячим». І початок взаємодії та кооперації підприємств, фірм, компаній та організацій одного регіону сприяє його «пробудженню».

Висновки.

1. З'ясовано сутність та дано характеристику поняття логістичного проектно-орієнтованого кластеру, як ефективної регіональної економічної одиниці, яка дає змогу вирішувати проблеми регіону. Виділено переваги такого виду кластерів та запропоновано його адаптацію в структуру економіки Кіровоградської області.

2. Проаналізовано низку основних бар'єрів на шляху створення логістичних проектно-орієнтованих кластерів регіональних систем, на прикладі Кіровоградської області. Здійснено огляд інвестиційних проектів та існуючої логістичної інфраструктури Кіровоградської області. Запропоновано в галузі логістики створення великого логістичного розподільчого центру для забезпечення оптимального та якісного просування потоку агропродукції від виробників до споживачів, включаючи послуги з переробки, транспортного, складського та інформаційного супроводу.

3. Представлено модель організації учасників логістичного проектно-орієнтованого кластера та виявлено тенденцію інтеграції кластерів із логістичними ланцюгами постачання, сформульовано гіпотезу про їх взаємодію та представлено

концепцію трансформації.

4. Обґрунтовано категорійне поняття кластеру, яке знаходиться у просторі управлінських, методологічних форматів та доцільність його використати при проектуванні та формуванні концептуальних підходів до управління територіальними чи галузевими економічними системами.

5. Розглянуто типи та характеристики структур кластера та їх практичне застосування в агропромисловому комплексі Кіровоградської області, узагальнено результат проведених досліджень.

6. Окреслено напрямки підвищення стійкості розвитку сільських територій, проблем фермерських господарств області та основні складові і шляхи для створення логістичного проектно-орієнтованого кластера в регіонах України.

7. Виявлено, що в основі заключного етапу трансформації лежить принцип безперервного розвитку логістичного проектно-орієнтованого кластера та наведено його принцип і алгоритм формування.

Список літератури

1. Аулін В.В., Гриньків А.В., Лисенко С.В., Головатий А.О., Голуб Д.В. Теоретичні і методологічні основи логістики транспортних і виробничих систем: монографія під заг.ред. д.т.н., проф. Ауліна В.В. - Кропивницький: Видав. ФОП Лисенко В.Ф., 2021. 504 с.
2. V. Aulin, A. Hrynkiv, O. Lyashuk, Y. Vovk, S. Lysenko, D. Holub, T. Zamota, A. Pankov, M. Sokol, V. Ratynskiy, O. Lavrentieva Increasing the functioning efficiency of the working warehouse of the «UVK Ukraine» company transport and logistics center, Communications, 2020. Vol. 22(2). P. 3-14.
3. Аулін В.В., Лисенко С.В., Гриньків А.В., Голуб Д.В., Головатий А.О. Логістика постачання транспортних і виробничих підприємств, фірм, компаній: Навчальний посібник. - Кропивницький: Видавець Лисенко В.Ф., 2022. 325 с.
4. Голуб Д.В., Аулін В.В., Біліченко В.В., Замуренко А.С. Реалізація системного підходу при визначенні ефективності функціонування складних регіональних транспортних систем. *Вісник машинобудування та транспорту* №15(1), 2022. С. 6-14.
5. Аулін В.В., Голуб Д.В., Лисенко С.В., Гриньків А.В., Дьяченко В.О., Замуренко А.С. Теоретичний підхід до оцінки ймовірностей безвідмовної роботи транспортних та виробничих систем і ланцюгів постачань на основі їх логічних структурних схем надійності. Кропивницький: ЦНТУ, 2020. Вип. 1. С. 47-57.
6. V. Aulin, O. Lyashuk, O. Pavlenko, D. Velykodnyi, A. Hrynkiv, D. Holub, S. Lysenko, Y. Vovk, V. Dzyura, M. Sokol Realization of the logistic approach in the international cargo delivery system, Communication. Scientific Letters of the University of Zilina. 2019. Vol.21 (2), P. 5-14.
7. Аулін В.В., Голуб Д.В., Великодний Д.О., Дьяченко В.О. Розв'язання проблеми надійності технологічних процесів вантажних перевезень підприємствами агропромислового виробництва. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. Кропивницький: ЦНТУ, 2019. Вип. 1(32). С. 36-45.
8. Голуб Д.В., Аулін В.В., Великодний Д.О., Дьяченко В.О. Підвищення ефективності управління логістичним ланцюгом постачання в транспортній системі. Зб. тез доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції "Крамаровські читання" 21-22 лют. 2019 р., м. Київ: НУБіП, Видавничий центр НУБіП України, 2019. С. 195-198.
9. Мусатенко О.В. Підвищення ефективності логістичної системи постачань з використанням автомобільного транспорту: дис... канд. техн. наук: 05.22.01 / Національний транспортний університет, Київ, 2017. 168 с.
10. Голуб Д.В., Аулін В.В., Кічура Р.П., Ювженко О.Ю. Цільовий підхід синтезу транспортно-логістичних систем як складних організаційно-технічних процесів. Тези XVII міжнародної науково-практичної конференції 21-23 жовтня 2024 року "Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту", м. Житомир: Житомирська політехніка, 2024. С. 54-56.
11. Соколенко С. І. Кластери в глобальній економіці : монографія. Київ : Логос, 2004. 848 с.
12. Wolewski A., G. Ślusarz G., Dergachova V. Cluster Policy of Innovative Development of the National Economy: Integration and Infrastructure Aspects: monograph. Poznań: Wydawnictwo naukowe WSPIA, 2020. 382 p.

13. Khaustova V. Y., Trushkina N. V. Strategic Management of Agrocluster Structures Development: The Foreign and National Practice. *Business Inform*, 7(546), 2023. P. 182-197.
14. Pulina, T., Khmara, N. and Skripka, N. The creation of the concept agro-industrial cluster in the Zaporozhye region, *Management and Entrepreneurship: Trends of Development*, 4(06), 2018. P. 52-61.
15. Voynarenko M. P. Clusters in the institutional econom-ics : monograph. Schweinfurt, Germany: Time Realities Scientific Group UG (Haftungsbeschränkt), 2018. 276 p.
16. Putri D. L. Agro Industrial Cluster Development Strategy Coastal Region District Banyuwangi. *Procedia Earth and Planetary Science*. 2015. Vol. 14. P. 136–143. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.07.094>
17. Valencia A., Qiu J., Chang N.-B. Integrating sustainabil-ity indicators and governance structures via cluster-ing analysis and multicriteria decision making for an urban agriculture network. *Ecological Indicators*. 2022. Vol. 142. Art. 109237. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109237>
18. Mahajan H. B. et al. LCIPA: Lightweight clustering protocol for industry 4.0 enabled precision agricul-ture. *Microprocessors and Microsystems*. 2022. Vol. 94. Art. 104633.

References

1. Aulin V.V., Hrynkiv A.V., Lysenko S.V., Holovaty A.O., & Holub D.V. (2021) Teoretychni i metodolohichni osnovy lohistyky transportnykh i vyrobnychkh system: monohrafiia pid zah.red. d.t.n.,prof. Aulina V.V. [Theoretical and methodological foundations of the logistics of transport and production systems] Kropyvnytskyi: Vydav. FOP Lysenko V.F. 504 p. [in Ukrainian].
2. V. Aulin, A. Hrynkiv, O. Lyashuk, Y. Vovk, S. Lysenko, D. Holub, T. Zamota, A. Pankov, M. Sokol, V. Ratynskiy, & O. Lavrentieva (2020). Increasing the functioning efficiency of the working warehouse of the «UVK Ukraine» company transport and logistics center, *Communications*. Vol. 22(2). P. 3-14. [in English].
3. Aulin V.V., Lysenko S.V., Hrynkiv A.V., Holub D.V., & Holovaty A.O. (2022). Lohistyka postachannia transportnykh i vyrobnychkh pidprijemstv, firm, kompanii: Navchalnyi posibnyk. [Logistics of supply of transport and production enterprises, firms, companies] Kropyvnytskyi: Vydavets Lysenko V.F. 325 p. [in Ukrainian].
4. Holub D.V., Aulin V.V., Bilichenko V.V., & Zamurenko A.S. (2022). Realizatsiia systemnoho pidkhodu pry vyznachenni efektyvnosti funktsionuvannia skladnykh rehionalnykh transportnykh system [Implementation of a system approach in determining the effectiveness of functioning of complex regional transport systems]. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu* №15(1). P. 6-14. [in Ukrainian].
5. Aulin V.V., Holub D.V., Lysenko S.V., Hrynkiv A.V., Diachenko V.O., & Zamurenko A.S. (2020). Teoretychni pidkhid do otsinky ymovirnosti bezvidmovnoi roboty transportnykh ta vyrobnychkh system i lantsiuhiv postachan na osnovi yikh lohichnykh strukturnykh skhem nadiinosti [A theoretical approach to estimating the probabilities of failure-free operation of transport and production systems and supply chains based on their logical structural reliability schemes]. Kropyvnytskyi: TsNTU. Vyp. 1. P. 47-57. [in Ukrainian].
6. V. Aulin, O. Lyashuk, O. Pavlenko, D. Velykodnyi, A. Hrynkiv, D. Holub, S. Lysenko, Y. Vovk, V. Dzyura, & M. Sokol (2019). Realization of the logistic approach in the international cargo delivery system, *Communication. Scientific Letters of the University of Zilina*. Vol.21 (2), P. 5-14. [in English].
7. Aulin V.V., Holub D.V., Velykodnyi D.O., & Diachenko V.O. (2019). Rozviazannia problemy nadiinosti tekhnolohichnykh protsesiv vantazhnykh perevezhen pidprijemstvamy ahropromysloвого vyrobnytstva [Solving the problem of reliability of technological processes of freight transportation by enterprises of agro-industrial production. *Central Ukrainian scientific bulletin*]. *Tsentralkoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*. Kropyvnytskyi: TsNTU. Vyp. 1(32). P. 36-45. [in Ukrainian].
8. Holub D.V., Aulin V.V., Velykodnyi D.O., & Diachenko V.O. (2019). Pidvyshchennia efektyvnosti upravlinnia lohistychnym lantsiuhom postachannia v transportnii systemi [Increasing the efficiency of logistics supply chain management in the transport system.]. *Zb. tez dopovidei VI Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii "Kramarovski chytannia" 21-22 liut. 2019 r., m. Kyiv: NUBiP, Vydavnychy tsestr NUBiP Ukrainy*. P. 195-198. [in Ukrainian].
9. Musatenko O.V. (2017). Pidvyshchennia efektyvnosti lohistychnoi systemy postachan z vykorystanniam avtomobilnoho transportu [Increasing the efficiency of the logistics system of supplies using road transport]: dys... kand. tekhn. nauk: 05.22.01 / Natsionalnyi transportnyi universytet, Kyiv. 168 p. [in Ukrainian].
10. Holub D.V., Aulin V.V., Kichura R.P., & Yuvzhenko O.I. (2024). Tsilovi pidkhid syntezy transportno-lohistychnykh system yak skladnykh orhanizatsiino-tekhnichnykh protsesiv [A targeted approach to the synthesis of transport and logistics systems as complex organizational and technical processes]. *Tezy KhVII mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii 21-23 zhovtnia 2024 roku "Suchasni tekhnolohii ta perspektyvy rozvytku avtomobilnoho transportu"*, m. Zhytomyr: Zhytomyrska politekhnika. P. 54-56. [in Ukrainian].

11. Sokolenko S. I. (2004). *Klastery v hlobalnii ekonomitsi [Clusters in the global economy]: monohrafiia*. Kyiv: Lohos. 848 s.12.
12. Bolewski A., G. Ślusarz G., Dergachova V. (2020). *Cluster Policy of Innovative Development of the National Economy: Integration and Infrastructure Aspects: monograph*. Poznań: Wydawnictwo naukowe WSPIA. 382 p. [in Ukrainian].
13. Khaustova V. Y., & Trushkina N. V. (2023). Strategic Management of Agrocluster Structures Development: The Foreign and National Practice. *Business Inform*, 7(546), 2023. P. 182-197. [in English].
14. Pulina, T., Khmara N., & Skripka N. (2018). The creation of the concept agro-industrial cluster in the Zaporozhye region, *Management and Entrepreneurship: Trends of Development*, 4(06). P. 52-61. [in English].
15. Voynarenko M. P. (2018). *Clusters in the institutional econom-ics: monograph*. Schweinfurt, Germany: Time Realities Scientific Group UG (Haftungsbeschränkt). 276 p. [in English].
16. Putri D. L. (2015). *Agro Industrial Cluster Development Strategy Coastal Region District Banyuwangi*. *Procedia Earth and Planetary Science*. Vol. 14. P. 136–143. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.07.094> [in English].
17. Valencia A., Qiu J., & Chang N. B. (2022). Integrating sustainability indicators and governance structures via clustering analysis and multicriteria decision making for an urban agriculture network. *Ecological Indicators*. Vol. 142. Art. 109237. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109237> [in English].
18. Mahajan H. B. et al. (2022). LCIPA: Lightweight clustering protocol for industry 4.0 enabled precision agriculture. *Microprocessors and Microsystems*. Vol. 94. Art. 104633. [in English].

Viktor Aulin, Prof., DSc., **Dmytro Holub** Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Andrii Hrynkiv**, Senior Researcher, PhD tech. sci., **Serhii Lysenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Formation of Logistic Project-Oriented Clusters in Regional Supply Chains of Agricultural Products

The concept of a logistics project-oriented cluster, as an effective regional economic unit, which makes it possible to solve the problems of the region, is considered. The advantages of this type of clusters are highlighted and its adaptation into the structure of the economy of Kirovohrad region is proposed.

A number of main barriers to the creation of logistics project-oriented clusters of regional systems were analyzed using the example of the Kirovohrad region. An overview of investment projects and the existing logistics infrastructure of the Kirovohrad region was carried out. It is proposed in the field of logistics to create a large logistics distribution center to ensure optimal and high-quality promotion of the flow of agricultural products from producers to consumers, including processing, transport, storage and information support services.

The model of the organization of the participants of the logistics project-oriented cluster is presented and the tendency of integration of clusters with logistics supply chains is revealed, a hypothesis about their interaction is formulated and the concept of transformation is presented. The categorical concept of a cluster, which is in the space of managerial and methodological formats, and the expediency of using it in the design and formation of conceptual approaches to the management of territorial or sectoral economic systems are substantiated.

The types and characteristics of cluster structures and their practical application in the agro-industrial complex of the Kirovohrad region were considered, and the results of the considerations were summarized. The directions for increasing the sustainability of the development of rural areas, the problems of farms in the region, and the main components and ways to create a logistics project-oriented cluster are outlined. It was revealed that the principle of continuous development of a logistics project-oriented cluster is the basis of the final stage of transformation, and its principle and algorithm of formation are given.

logistics project-oriented cluster, adaptation, regional system, logistics chains, agricultural production, concept, transformation

Одержано (Received) 30.10.2024

Прорецензовано (Reviewed) 29.11.2024

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2024

УДК 656.2

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.228-232](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.228-232)

В.В. Кулешов, доц., канд. техн. наук, **К.В. Крячко**, доц., канд. техн. наук,
А.С. Магальяс асп.

Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна
e-mail: kuleshov@kart.edu.ua; kryachko@kart.edu.ua

Удосконалення інформаційної технології роботи опорної станції при перевезеннях парком різних власників

Більша кількість перевезень на території України здійснюється власним парком операторських компаній. Опорні станції, функції яких можуть виконувати дільничні, сортувальні або вантажні станції, на яких виконуються операції технічного обслуговування, комерційного огляду вагонів та оформлення перевізних документів.

Такі станції, а також підпорядковані їм станції працюють на робочих місцях, які використовують АРМ єдиної автоматизованої системи керування вантажними перевезеннями АТ "Укрзалізниця" (АСК ВП УЗ-Є).

Ця система призначена для автоматизації технологічних процесів роботи станції, надання оперативної інформації з метою прийняття управлінських рішень персоналом станції, підвищення рівня достовірності вхідної інформації, станційних звітів, оперативної довідкової інформації, яка передана в систему верхнього рівня, за рахунок комплексного контролю.

автоматизована система керування, інформаційна технологія роботи, опорна станція

Постановка проблеми. Через військове вторгнення РФ, 2023 рік, як і попередній, був для залізничного транспорту України роком виживання, а не розвитку. Залізницями України за 2023 рік перевезено 327,9 млн. тонн вантажів, що на 3,3% більше від 2022 року, але на 47,2% менше від 2021 року.

З березня по грудень минулого року Укрзалізниця кожного місяця перевозила в середньому на 23% вантажів більше, ніж за той самий період 2022 року. Завдяки спільній роботі Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури, спецслужб та військових для відкриття Українського коридору, зокрема вдалося наростити перевезення через морські порти [1].

Таким чином, через морські порти перевезено 22,3 мільйона тонн усіх вантажів. У грудні 2023 року компанія вийшла на рекордне вивантаження – 3,8 млн тонн для чорноморських портів з початку повномасштабного вторгнення. Також залізниця майже на 33% наростила обсяги перевезень у напрямку портів Дунаю, зокрема транзитом через Молдову та Румунію.

Через сухопутні переходи перевезено всього 34,4 мільйона тонн.

Щомісяця перевезення складали в середньому понад 12 мільйонів тонн вантажів. Рекордним став листопад, коли залізницею було перевезено 14,1 мільйона тонн вантажів. Найпомітніше у 2023 виростили показники внутрішніх перевезень. У порівнянні з 2022 роком вони збільшилися на 11,4% – до 84,8 млн тонн.

Загалом, порівняно з періодом березень-грудень 2022 року за аналогічний період 2023 року, Укрзалізниця збільшила загальні обсяги перевезень зі 102 до 126 мільйонів тонн. Найбільше при цьому перевезено зернових вантажів.

В Україні на теперішній час більшість перевезень виконується власним парком операційних компаній. Так, корисний парк ЦТЛ (Центр транспортної логістики) по всім типам вантажних вагонів складає близько 18 тис. вагонів. Фактичний обіг власного вагона ЦТЛ 9,5 доби. Середньодобове навантаження 5465 вагони. Середньодобове фактичне навантаження у власних вагонах ЦТЛ 328 вагонів. Задіяний парк власних вагонів ЦТЛ 3116 вагонів.

В умовах повномасштабної війни, розв'язаної Росією проти України, залізниці виявилися артеріями, що підтримують стабільне функціонування вітчизняної економіки. Організація роботи опорної станції повинна враховувати сучасні інформаційні технології.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В ряді досліджень розглянуті окремі важливі питання організації технологічних маршрутів з місць навантаження на опорних станціях; розглянуті умови сервісу перевезень, дотримання термінів доставки вантажів [2, 3, 5].

Але для можливості інтеграції всієї управлінської, фінансової і технічної інформації також необхідно створення єдиного інформаційного простору комплексів задач управління перевезеннями у взаємодії з користувачами в рамках послуг та сервісів, які надають в АТ «Укрзалізниця».

Постановка завдання. Основною метою статті є удосконалення підсистеми «е.Портал УЗ-Карго» АСК ВП УЗ-Є за рахунок розширення її функціональних можливостей, що дозволить забезпечити додатковий облік інформації та ефективну комунікацію з користувачами.

Виклад основного матеріалу дослідження. Опорна станція є однією з організаційних ланок на залізничному транспорті, яка здійснює перевезення пасажирів, вантажу, вантажобагажу у визначеному регіоні транспортної мережі, та іншу виробничу діяльність на підпорядкованих роздільних пунктах.

Опорна станція здійснює делеговані регіональною філією функції у визначеному регіоні транспортної мережі, відповідно до мети, завдань та предмету діяльності регіональної філії у межах підпорядкованих виробничо-технологічних підрозділів.

Начальник опорної станції (ДС) відповідає за виконання завдань регіональної філії та виробничого підрозділу «Служба роботи станцій» (Служба Д). Для виконання функцій опорної станції він має у своєму безпосередньому підпорядкуванні заступників, що призначаються і звільняються з посади у встановленому порядку.

Для виконання функцій опорної станції ДС у своєму підпорядкуванні також має господарство комерційної роботи та маркетингу; цех формування поїздів; цех вагонного господарства; господарчий цех.

Функції опорної станції, як правило, може виконувати дільнична, сортувальна або вантажна залізнична станція, на якій виконуються операції із технічного обслуговування, комерційного огляду вагонів, оформлення перевізних документів [4].

Опорні станції та підпорядковані їм станції працюють на робочих місцях, які використовують автоматизовані робочі місця (АРМ) єдиної автоматизованої системи керування вантажними перевезеннями АТ «Укрзалізниця» (АСК ВП УЗ-Є). Вони забезпечують підвищення продуктивності та якості роботи працівників станцій за рахунок автоматизації обробки та збереження інформації, видачі документів на поїзди, оперативності та обґрунтованості прийняття рішень управління станціями, видачі рекомендацій по регулюванню станційних процесів, подання необхідних даних для прийняття рішень управління в регіональних філіях та АТ «Укрзалізниця» в цілому [7].

Призначення АСК ВП УЗ-Є: автоматизація технологічних процесів роботи станції; надання оперативної інформації з метою прийняття управлінських рішень

персоналом станції; підвищення рівня достовірності вхідної інформації, станційних звітів, оперативної довідкової інформації, переданої у системи верхнього рівня, за рахунок комплексного логічного контролю.

АСК ВП УЗ-Є є системою організаційного управління і функціонує на базі інформації, що вводиться з автоматизованих робочих місць користувачами – працівниками станцій, наприклад АРМ_СТЦ, АРМ_ДСП, операторами при ДСП, агентами комерційними, товарними касирами, прийомоздавальниками вантажу.

Підсистема «е.Портал УЗ-Карго» побудована за трирівневою архітектурою (сервер баз даних – сервер додатків – користувач). Схема функціонування підсистеми (ПС) «е.Портал УЗ-Карго» в умовах АСК ВП УЗ-Є наведена на рисунку 1. ПС «е.Портал УЗ-Карго» – єдиний електронний портал вантажних перевезень, створений для автоматизації процесів взаємодії з користувачами в рамках послуг та сервісів, які надаються АТ «Укрзалізниця» або структурними підрозділами.

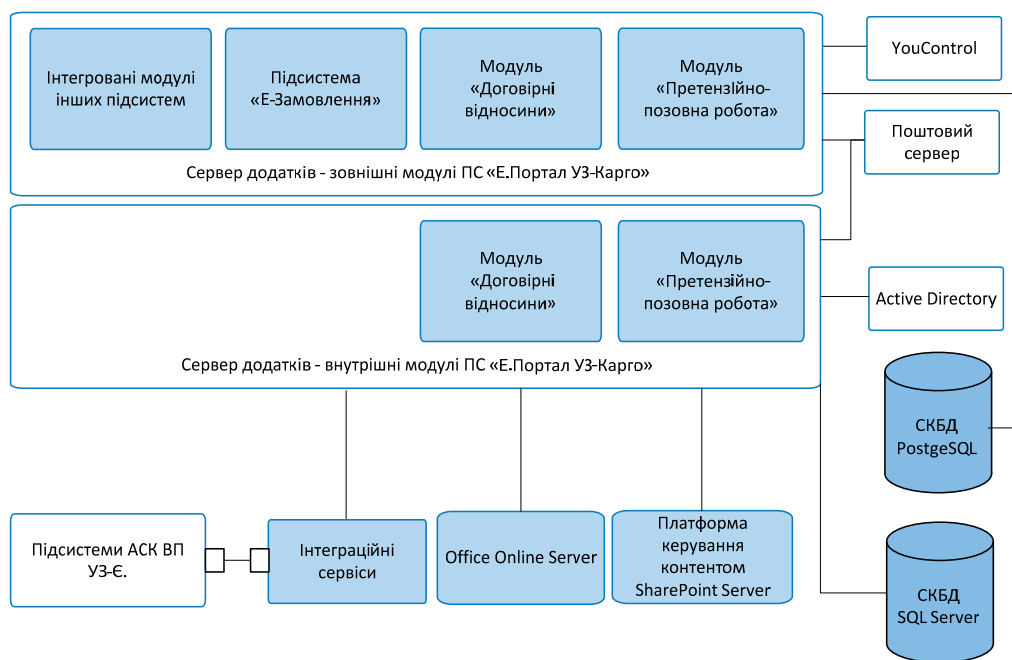


Рисунок 1 – Схема функціонування підсистеми «е.Портал УЗ-Карго» в умовах АСК ВП УЗ-Є
Джерело: розроблено авторами

На структурній схемі наведені ключові компоненти підсистеми «е.Портал УЗ-Карго», внутрішні та зовнішні інформаційні підсистеми. Зовнішній модуль підсистеми «е.Портал УЗ-Карго» призначений для забезпечення автоматизованої взаємодії із користувачами [8]. Внутрішній модуль ПС «е.Портал УЗ-Карго» призначений для забезпечення автоматизації бізнес-процесів в структурних підрозділах АТ «Укрзалізниця» та інтеграції з іншими підсистемами АСК ВП УЗ-Є.

Для роботи клієнтів «е.Портал УЗ-Карго» для замовлення послуг з вантажних перевезень АТ «Укрзалізниця» впроваджує єдине цифрове вікно.

В «е.Портал УЗ-Карго» зосереджені електронні сервіси для організації перевезень вантажів залізничним транспортом та для отримання інших послуг, пов'язаних з ними.

Наприклад, надання планів та замовлень на перевезення, обміну електронними документами та даними щодо послуг з організації перевезень, проведення розрахунків за них тощо.

Особистий кабінет замовників послуг для роботи в системі «е.Портал УЗКарго» розроблено з використанням програмних рішень, які дозволяють зручно та швидко виконувати налаштування відповідно до власних потреб і спрощують процедуру реєстрації та автентифікації у системі.

«е.Портал УЗ-Карго» оснащено сучасними засобами захисту інформації від несанкціонованих втручань у роботу системи та інших спроб зламу. При цьому АТ «Укрзалізниця» постійно проводить роботу по удосконаленню роботи системи, та усі нові сервіси, пов'язані з вантажними перевезеннями, будуть розміщатися у системі «е.Портал УЗ-Карго».

Висновки. За рахунок удосконалення підсистеми «е.Портал УЗ-Карго» можливе розширення можливостей АСК для забезпечення додаткового обліку інформації.

Розширення функціональних можливостей підсистеми «е.Портал УЗ-Карго» АСК ВП УЗ-Є забезпечить додаткові сценарії роботи користувачів з електронними двосторонніми договорами в підсистемі «е.Портал УЗ-Карго», дозволить виконувати розрахунок та аналіз даних, що виникають при роботі із претензіями та позовами у внутрішньому модулях підсистеми.

Розширення функціональних можливостей зовнішнього модуля підсистеми забезпечить ефективну комунікацію з користувачами.

Список літератури

1. Протягом 2023 року Укрзалізницею перевезено 148,4 млн тонн вантажів. *Новини Уряду. Єдиний веб-портал органів виконавчої влади України*. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/protiahom-2023-roku-ukrzaliznytseiu-perevezeno-1484-mln-tonn-vantazhiv> (дата звернення: 03.10.2024).
2. Транспортна стратегія України на період до 2030 року. Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 30 травня 2018 р. № 430-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-%D1%80#Text> (дата звернення: 03.10.2024).
3. Данько М.І., Кулешов В.В. Визначення парку вагонів операторських компаній для забезпечення перевезень вантажів залізничним транспортом. *Зб. наук. праць УкрДАЗТ*, 2004. Вип. 57. С. 121–128.
4. Данько М.І., Кулешов В.В., Ломотко Д.В. Удосконалення організаційно-технологічної моделі використання вантажних вагонів різної форми власності на залізницях України. *Зб. наук. праць УкрДАЗТ*, 2012. Вип. 129. С. 5–12.
5. Sathaporn Opasanon, Songyot Kitthamkesorn Border crossing design in light of the ASEAN Economic Community: Simulation based approach. *Transport Policy*. Vol. 48, 2016. P. 1–12.
6. Thijs Dewilde, Peter Sels, Dirk Cattrysse, Pieter Vansteenwegen Robust railway station planning: An interaction between routing, timetabling and platforming. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. Vol. 3, 2013. P. 68–77.

References

1. During 2023, Ukrzaliznytsia transported 148.4 million tons of cargo. *Government news. The only web portal of executive authorities of Ukraine*. (2024, October 03). <https://www.kmu.gov.ua/news/protiahom-2023-roku-ukrzaliznytseiu-perevezeno-1484-mln-tonn-vantazhiv> [in Ukrainian].
2. Transport strategy of Ukraine for the period until 2030. Approved by the order of the Cabinet of Ministers of Ukraine (2018, May 30). №430. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-%D1%80#Text> [in Ukrainian].
3. Danko, M.I., & Kuleshov, V.V. (2004). Determination of the fleet of wagons of operating companies to ensure the transportation of goods by rail transport. Kharkiv: *Collection of Scientific Works of UkrDAZT* [in Ukrainian].
4. Danko, M.I., Kuleshov, V.V., & Lomotko, D.V. (2012) Improvement of the organization and technological model of the use of freight cars of different forms of ownership on the railways of Ukraine. Kharkiv: *Collection of Scientific Works of UkrDAZT* [in Ukrainian].
5. Sathaporn, O., & Songyot, K. (2016). Border crossing design in light of the ASEAN Economic Community. Simulation based approach. *Transport Policy*, P. 1-12.

6. Dewilde, T., Sels, P., Cattrysse, D., & Vansteenwegen, P. (2013). Robust railway station planning: An interaction between routing, timetabling and platforming. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. P. 68-77.

Valery Kuleshov, Assoc. Prof., PhD tech sci, **Katerina Kriachko**, Assoc. Prof., PhD tech sci,

Artem Magalyas, post-graduate

Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine

Improvement of the Information Technology of the Operation of the Reference Station During Transportation By a Fleet of Different Owners

The majority of transportation on the territory of Ukraine is carried out by our own fleet of operator companies.

Base stations, the functions of which are to be performed by the precinct, sorting or freight stations, where maintenance operations, commercial inspection of wagons, and processing of transport documents are performed.

Such stations, as well as the stations subordinate to them, work at workplaces that use the automated control system of the unified freight transportation management system of JSC "Ukrzaliznytsia" (ASK VP UZ-E).

This system is designed to automate the technological processes of the station, provide operational information for the purpose of making management decisions by the station staff, increase the level of reliability of input information, station reports, operational reference information, which is transferred to the upper-level system, due to complex control.

ASK VP UZ-E is an organizational management system and functions on the basis of information entered from automated workplaces by users - employees of stations, for example ARM_STZ, ARM_DSP, operators at DSP, commercial agents, commodity cashiers, cargo receivers.

The "e.Portal UZ-Cargo" subsystem is built according to a three-level architecture (database server - application server - user). The scheme of functioning of the subsystem (PS) "e.Portal UZ-Cargo" in the conditions of the ASK of the UZ-E VP is shown in the figure. PS "e.Portal UZ-Cargo" is a single electronic portal of freight transportation created to automate processes of interaction with users within the framework of services provided by JSC "Ukrzaliznytsia" or its structural divisions.

"e.Portal UZ-Cargo" concentrates electronic services for the organization of cargo transportation by rail transport and for obtaining other services related to them.

automated control system, reference station

Одержано (Received) 18.11.2024

Прорецензовано (Reviewed) 17.12.2024

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2024

ЗМІСТ

Комп'ютерні науки

| | |
|---|---|
| <i>О.А. Ревнюк, Н.В. Загорода, О.С. Улічев</i> Адаптивна методологія розрахунку кількісного показника стану захищеності вебзастосунків | 3 |
|---|---|

Комп'ютерна інженерія

| | |
|---|----|
| <i>Є.В. Мелешко, М.С. Якименко, В.В. Міхав, Я.П. Шуліка</i> Математична модель виявлення аномальних зв'язків між компонентами складної комп'ютерної системи..... | 11 |
|---|----|

Кібербезпека та захист інформації

| | |
|---|----|
| <i>О.П. Доренський, О.С. Улічев, К.О. Задорожний, А.С. Коваленко, Г.М. Дресва</i> Концептуальна модель системи інформаційного протидіючого координаційного центру з питань національної безпеки і оборони..... | 23 |
|---|----|

| | |
|---|----|
| <i>Д.І. Прокопович-Ткаченко, В.П. Зверев, В.Г. Бушков, Б.С. Хрушков, О.В. Черкаський</i> Таргетовані атаки на супутникові інтернет-системи: виклики та підходи до захисту..... | 32 |
|---|----|

Прикладна механіка

| | |
|--|----|
| <i>О. Ф. Сіса, В. Я. Мірзак, О. А. Кислун, Д. С. Тупаленко</i> Удосконалення фільтра грубого очищення робочих рідин фільтрувальним елементом із металеві сітки..... | 39 |
|--|----|

| | |
|---|----|
| <i>А.Б. Гупка, В.В. Аулін, Г.Б. Цьонь, В.М. Буховець, Т.Б. Пиндус</i> Оцінка величини і характеру зношування зірочок ланцюгових передач сільськогосподарських машин..... | 47 |
|---|----|

| | |
|---|----|
| <i>О.Ю. Стібайло</i> Технологічні та конструктивні особливості виготовлення гвинтових елементів сільськогосподарської техніки..... | 55 |
|---|----|

| | |
|---|----|
| <i>К.К. Щербина, В.А. Годорожа, А.М. Кириченко, А. Р. Апаракін</i> Технологічні та конструктивні особливості виготовлення гвинтових елементів сільськогосподарської техніки..... | 65 |
|---|----|

Матеріалознавство

| | |
|--|----|
| <i>В.М. Гвоздецький, М.М. Студент, Х.Р. Задорожна, С.І. Маркович</i> Вплив матеріалу металеві основи на механічні характеристики електродугових покриттів | 75 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| <i>І.М. Рибалко, О.В. Тіхонов, А.В. Захаров</i> Вплив модифікуючих домішок на мікроструктуру та властивості наплавлених електрошлаковим наплавленням шарів для відновлення плужних лемішів та культиваторних стрілочастих лап | 82 |
|--|----|

Галузеве машинобудування

Р.Ю. Бойко, В.В. Аулін, А.А. Тихий, С.О. Карпушин, О.П. Коваль
Інтеграція штучного інтелекту в системи підтримки прийняття рішень
в оптимізації виробничих процесів машинобудівного підприємства
на прикладі машинного навчання..... 95

А.М. Красота, І.В. Шепеленко, М.В. Красота, Р.А. Осін
Обґрунтування ефективності та класифікація компонентів технологічних
середовищ для фінішної антифрикційної безабразивної обробки деталей
машин 104

Vitalii Koshulko, Ihor Kudriavtsev
Justification of the Design of an Aerodynamic Separator for Cleaning Sunflower
Seed Mixture Waste 113

В.Ю. Дудін, І.М. Білоус
Дослідження процесу руйнування зерна кукурудзи з використанням
цифрових моделей..... 123

Elchyn Aliiev, Olha Aliieva, Volodymyr Govorukha, Oleksandr Kobets
Development of Mechatronic Systems for Targeted Division and Selection
of Seed Material 131

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

С.Г. Ковальов, В.В. Аулін, А.В. Гриньків, В.В. Варваров
Підвищення надійності та ефективності експлуатації виробничих ліній
методами штучного інтелекту, використовуючи моніторинг акустичних
сигналів 142

Будівництво та цивільна інженерія

Roman Sivak
Modified Cellular Concrete: Structure, Properties, and Potential Applications 152

Агроінженерія

М.В. Красота, І.В. Шепеленко, Ю.В. Кулешков, Р.А. Осін, Т.В. Руденко
Стан і напрямки підвищення ефективності технічного сервісу вантажних
автомобілів в агропромисловому комплексі..... 161

Автомобільний транспорт

*В.В. Аулін, О.М. Тертиця, Т.М. Надич, А.В. Гриньків, О.Л. Ляшук, В.З. Гудь,
С.З. Залуцький*
Критерії вибору великовагових транспортних засобів для ефективних і
безпечних перевезень..... 169

Транспортні технології (за видами)

Н.В. Потаман, О.О. Орда, О.М. Орда
Аналіз аспектів планування сталої міської мобільності в контексті
євроінтеграційних реформ в Україні 188

| | |
|--|-----|
| <i>І. О. Хітров, С. В. Козак</i> Безпечність транспортної діяльності..... | 196 |
| <i>В.В. Аулін, Д.О. Кульова, А.В. Гриньків, С.В. Лисенко</i> Оцінювання ризиків несхоронних перевезень нафтопродуктів автомобільним транспортом | 205 |
| <i>В.В. Аулін, Д.В. Голуб, А.В. Гриньків, С.В. Лисенко</i> Формування логістичних проектно-орієнтованих кластерів у регіональних ланцюгах постачань агропродукції..... | 214 |
| <i>В.В. Кулешов, К.В. Крячко, А.С. Магальяс</i> Удосконалення інформаційної технології роботи опорної станції при перевезеннях парком різних власників | 228 |

CONTENT

Computer Science

- Oleksandr Revniuk, Nataliya Zagorodna, Oleksandr Ulichev*
Adaptive Methodology for Computing the Quantitative Security Status Indicator
of Web Applications..... 3

Computer Engineering

- Yelyzaveta Meleshko, Mykola Yakymenko, Volodymyr Mikhav, Yaroslav Shulika*
A Mathematical Model of Detecting Anomalous Connections Between
Components of a Complex Computer System 11

Cybersecurity and Information Protection

- Oleksandr Dorenskyi, Oleksandr Ulichev, Kostiantyn Zadorozhnyi,
Anastasiia Kovalenko, Hanna Drieieva*
The Conceptual Model of the Information Counteraction System of the
Coordination Center for National Security and Defense Issues..... 23

- Dmytro Prokopovych-Tkachenko, Volodymyr Zverev, Valeriy Bushkov,
Borys Khrushkov, Oleksandr Cherkaskiy*
Targeted Attacks on Satellite Internet Systems: Challenges and Protection
Approaches..... 32

Applied Mechanics

- Oleh Sisa, Volodymyr Mirzak, Oleh Kyslun, Denys Tupalenko*
Improvement of a Coarse Filtration System for Working Fluids with a Metal
Mesh Filter Element..... 39

- Andrii Gypka, Victor Aulin, Ann Tson, Valeriy Buhovets, Tetyana Pyndus*
Assessment of the Magnitude and Nature of Wear of Sprockets of Chain
Drives of Agricultural Machines..... 47

- Oleg Stibailo*
Technological and Constructive Features of the Production of Screw Elements
of Agricultural Machinery..... 55

- Kyryl Shcherbyna, Viktor Hodorodozha, Andrii Kyrychenko, Anton Aparakin*
Study of the Accuracy Parameters of the Production of Gear Wheels for
Hydraulic Gear Pumps Size 1 65

Material Science

- Volodymyr Hvozdetzkii, Mykhajlo Student, Khrystyna Zadopozna,
Sergiy Markovych*
Influence of Metal Base Material on Mechanical Characteristics of Arc-Deposited
Coatings..... 75

- Ivan Rybalko, Oleksandr Tihonov, Andrii Zakharov*
Influence of Modifying Impurities on Microstructure and Properties of Electroslag
Surfacing Layers for Restoration of Ploughshares and Cultivator Tines..... 82

Industry Engineering

Roman Boiko, Viktor Aulin, Andrii Tykhyi, Serhii Karpushyn, Oleh Koval
Integration of Artificial Intelligence Into Decision Support Systems in
Optimizing Production Processes of a Machine-Building Enterprise Using
the Example of Machine Learning 95

Artem Krasota, Ihor Shepelenko, Mykhailo Krasota, Ruslan Osin
Determination of Effectiveness and Component Classification of Technological
Mediums for Finishing Antifriction Non-Abrasive Treatment of Automobile
Details..... 104

Vitalii Koshulko, Ihor Kudriavtsev
Justification of the Design of an Aerodynamic Separator for Cleaning Sunflower Seed
Mixture Waste..... 113

Volodymyr Dudin, Illia Bilous
Investigation of the Corn Kernel Destruction Process Using Digital Models 123

Elchyn Aliiev, Olha Aliieva, Volodymyr Govorukha, Oleksandr Kobets
Development of Mechatronic Systems for targeted Division and Selection
of Seed Material 131

Automation and Computer-Integrated Technologies

Serhii Kovalov, Viktor Aulin, Andrii Hrynkiv, Valerii Varvarov
Increasing the Reliability and Efficiency of Production Lines Using Artificial
Intelligence Methods Using Acoustic Signal Monitoring..... 142

Construction and Civil Engineering

Roman Sivak
Modified Cellular Concrete: Structure, Properties, and Potential Applications 152

Agroengineering

*Mykhailo Krasota, Igor Shepelenko, Yuriy Kuleshkov, Ruslan Osin,
Timofey Rudenko*
State and Directions for Improving the Efficiency of Technical Service for Trucks
in the agro-Industrial Complex 161

Road Transport

*Viktor Aulin, Oleksii Tertytsia, Taras Nadych, Andrii Hrynkiv, Serhii Lysenko,
Oleh Lyashuk, Viktor Gud, Serhii Zalutsky*
Criteria for Selecting heavy Vehicles for Efficient and Safe Transportation 169

Transport Technologies (by Types)

Natalia Potaman, Oleksandra Orda, Oleksandr Orda
Analysis of Sustainable Urban Mobility Planning Aspects in the Context
of European Integration Reforms in Ukraine 188

| | |
|--|-----|
| <i>Ihor Khitrov, Svetlana Kozak</i> Safety of Transport Activities | 196 |
| <i>Viktor Aulin, Daria Kulova, Andrey Hrinkiv, Serhii Lysenko</i> Risk Assessment of Non-Secure Transportation of Petroleum Products by Road Transport..... | 205 |
| <i>Viktor Aulin, Dmytro Holub, Andrii Hrynkiv, Serhii Lysenko</i> Formation of Logistic Project-Oriented Clusters in Regional supply Chains of Agricultural Products | 214 |
| <i>Valery Kuleshov, Katerina Kriachko, Artem Magalyas</i> Improvement of the Information technology of the Operation of the Reference Station During Transportation by a Fleet of Different Owners | 228 |

Матеріали подаються у друкованому вигляді та на електронному носії. Обсяг статті – 5-12 сторінок. Основний текст рукопису друкується 12 кеглем; шрифт – Times New Roman; міжрядковий інтервал – 1,0; відступ – 1,25 см; поля: верх – 2 см, низ – 3см, право, ліво – 2 см. Текст повинен бути вирівняний по ширині аркуша.

Підписи до рисунків і набирати шрифтом Times New Roman 10 (по центру), таблиць 14 (з абзацу). Після рисунка, таблиці схеми – вказується джерело

Рисунки й таблиці розміщуються в тексті статті з вирівнюванням по центру сторінки, без обтікання текстом у рамках поля набору. Рисунки й таблиці подаються в статті безпосередньо після тексту, де їх згадано вперше. На кожен формулу, таблицю, рисунок, графік у тексті мають бути обов'язкові посилання.

Анотація українською мовою – до 10 рядків тексту (до 500 знаків), обов'язково 3-7 ключових слів;

Анотація англійською мовою повинна бути не менше ніж 1800 знаків:

Структура анотацій:

- мета статті;
- короткий опис виконаної роботи;
- висновки по роботі;
- перелік ключових слів;

Структура основного тексту статті:

1. **Постановка проблеми.**
2. **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**
3. **Постановка завдання (мета статті).**
4. **Виклад основного матеріалу.**
5. **Висновки і перспективи подальших досліджень.**

Схема організації матеріалу статті:

1. УДК
2. Ініціали, прізвище, вчене звання, науковий ступінь
3. Місце роботи, місто, країна. e-mail
4. Назва статті.
5. Анотація і ключові слова мовою статті.
7. Основний текст статті.
8. Список літератури. *
9. References
10. Розширена анотація і ключові слова англійською (українською) мовою.

Редакційна колегія Центральноукраїнського наукового вісника повідомляє, що всі статті які надходять перевіряються на плагіат системою Turnitin

Адреса для надсилання: zbirnyk_tech@kntu.kr.ua

ДОВІДКА ПРО АВТОРА
українською та англійською мовами

| | Українською | Англійською |
|---|-------------|-------------|
| Прізвище, ім'я, по-батькові: | | |
| Місце роботи (повна назва, без абревіатур), місто, країна: | | |
| Посада (повна назва, без абревіатур): | | |
| Наукова ступінь: | | |
| Вчене звання: | | |
| Назва статті: | | |
| *Спеціальність: | | |
| Адреса для надсилання збірнику: | | |
| Контактні телефони (бажано мобільний): | | |
| E-mail: | | |
| ORCID ID (XXXX-XXXX-XXXX-XXXX) | | |

* – 122 Комп'ютерні науки, 123 Комп'ютерна інженерія, 125 Кібербезпека, 131 Прикладна механіка, 132 Матеріалознавство, 133 Галузеве машинобудування, 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, 192 Будівництво та цивільна інженерія, 208 Агроінженерія, 274 Автомобільний транспорт, 275 Транспортні технології (за видами)

Кожен автор (співавтор) заповнює форму довідки про автора за посиланням <https://mapiea.kntu.kr.ua/requirements.html>

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВИЙ ВІСНИК.
ТЕХНІЧНІ НАУКИ

В и п у с к 10(41)
Частина II

Відповідальний за випуск С.В. Лисенко, О.П. Доренський

Комп'ютерна верстка Н. Стеннік

Тиражування О. Г. Каліч

*Приватне підприємство «Ексклюзив-Систем»
Свідоцтво № ДК 4470 від 17.01.2013р.
25006, м. Кіровоград, вул. Шевченка, 25
тел./факс 24-35-53*

Підписано до друку 23.12.2024р. Формат 60x84/8. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman. Офсетний друк. Умов. друк. арк. 30
Тираж 300 прим. Зам. № 0824